

dr inż. Beata Nienartowicz¹⁾

ORCID 0000-0002-3759-0812

mgr inż. Remigiusz Gut^{2)*}

ORCID 0000-0002-3327-4142

dr Wiktor Jasiński²⁾

ORCID 0000-0001-6612-4207

dr inż. Tomasz Abel³⁾

ORCID 0000-0003-0020-1614

Analysis of deflections and strains during construction and operating loads of circular GRP culvert

Analiza ugięć i odkształceń przepustu z tworzywa GRP o przekroju kołowym w fazie zabudowy i obciążeń eksploatacyjnych

DOI: 10.15199/33.2025.10.07

Abstract. The article presents an analysis of the results of tests of a large-diameter culvert with a circular cross-section DN 2100 made of GRP (Glass Reinforced Plastic) composite material in a full-scale. The culvert was installed in a test embankment at a laboratory stand and loaded with forces in a system simulating traffic loads in accordance with “Load Model 1” according to [1]. The analysis covered vertical and horizontal displacements of the structure and deformations of the walls occurring under the action of static and cyclically variable – sinusoidal loads, during tests and at the stage of installation at the test stand.

Keywords: culverts; GRP; flexible structures; model studies; road loads.

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wyników badań wielkośrednicowego przepustu o przekroju kołowym DN 2100 w skali naturalnej, wykonanego z materiału kompozytowego GRP (Glass Reinforced Plastic). Przepust zabudowano w nasypie badawczym na stanowisku laboratoryjnym i obciążano siłami w układzie symulującym obciążenia komunikacyjne zgodnie z „Modelem Obciążenia 1”, wg [1]. Analizie poddano przemieszczenia pionowe i poziome konstrukcji oraz odkształcenia ścianek, występujące pod działaniem obciążeń statycznych i cyklicznie zmiennych – sinusoidalnych, podczas badań i na etapie zabudowy na stanowisku badawczym.

Słowa kluczowe: przepusty; GRP; konstrukcje podatne; badania modelowe; obciążenia drogowe.

Road culverts are a vital component in transportation engineering, and play a crucial role in the development of transport infrastructure. They facilitate the passage of watercourses and animal crossings under roadways, and can also accommodate pedestrian walkways, utility corridors, and other service routes. There is a wide variety of culvert designs and available construction materials. Traditionally, culverts were built as rigid structures using materials like stone, concrete, or brick, and were capable of bearing loads on their own. However, modern civil engineering requires advanced technologies and materials that not only ensure durability and safety, but which are also cost-effective and technically efficient. Consequently, the majority of modern culverts are designed as flexible, soil-interacting structures, typically made from plastic (PE, HDPE), glass-reinforced plastic (GRP), or corrugated steel or aluminum plates [2]. The primary advantage of flexible culverts is their interaction with the surrounding soil, which in turn helps to reduce and evenly distribute stresses within the load-bearing components. Embedding a flexible structure in the ground significantly decreases horizontal wall displacement and deflection. The load-bearing system is a composite of the pipe and the soil, which work together as a single static system to

Przepusty drogowe, stosowane w budownictwie komunikacyjnym, umożliwiają przeprowadzenie pod drogami cieków wodnych, ścieżek dla zwierząt, pieszych ciągów komunikacyjnych, ciągów technicznych, gospodarczych i innych. Przepusty tradycyjne budowane były jako konstrukcje sztywne, zdolne do samodzielnego przenoszenia obciążeń i wykonywano je z materiałów takich jak kamień, beton czy cegła. Współczesne wymagania inżynierii budowlanej wymuszają stosowanie zaawansowanych technologii oraz materiałów, które zapewnią trwałość i bezpieczeństwo, a jednocześnie będą efektywne ekonomicznie i technicznie. Z tego względu nowoczesne przepusty projektowane są już najczęściej jako konstrukcje podatne, współpracujące z gruntem i wykonane z tworzyw sztucznych (PE, PEHD), kompozytów zbrojonych włóknem szklanym (GRP) czy blach falistych ze stali lub aluminium [2]. Główną zaletą przepustów o konstrukcjach podatnych jest to, że przez ich współpracę z gruntem możliwa jest redukcja i wyrównanie naprężeń w elementach nośnych. Umieszczenie konstrukcji podatnej w gruncie powoduje znaczne zmniejszenie przemieszczeń poziomych ścian i ugięć. Układ nośny stanowi połączenie rury oraz gruntu, które razem tworzą układ statyczny, zdolny do przenoszenia obciążeń [3]. Otoczenie gruntowe ma bezpośredni wpływ na nośność i bezpieczeństwo takiej konstrukcji.

W ostatnich latach coraz większą popularność w produkcji rur i przepustów zdobywają kompozyty. Wśród nich na szczególną uwagę zasługuje tworzywo GRP (Glass Reinforced

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów – Filia Wrocław

³⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Correspondence address: remigiusz.gut@ibdim.edu.pl

carry applied loads [3]. Therefore, the surrounding soil conditions directly influence the load capacity and safety of the entire structure.

In recent years, the use of composite materials for manufacturing pipes and culverts has become increasingly popular. Among these, GRP (Glass Reinforced Plastic) stands out due to its properties, which make it ideal for broad applications in road and bridge infrastructure. GRP, also known as glass fiber reinforced composite, is characterized by its high resistance to environmental factors like moisture, corrosion, and abrasion.

One key manufacturing technology for GRP pipes and profiles is filament winding. This process involves winding layers of glass fibers and polyester resin onto a rotating mandrel, enabling the pipe's wall thickness and structure to be precisely tailored to specific design requirements. The filament winding method offers several key advantages:

- it allows for the production of pipes in various shapes and large cross-sections, with a wall thickness and structure that can be varied circumferentially, all through a relatively simple technology;
- it enables the use of continuous fibers that are oriented along desired stress paths, in turn making them more resistant to long-term and fatigue loading when compared to chopped fibers;
- it ensures minimal dimensional deviations in the pipe's internal cross-section;
- it provides the ability to form integrated bell-and-spigot joints on the pipe's exterior, and also to create a rough external texture for improved soil interaction.

Culverts constructed from filament-wound pipes are utilized for building new infrastructure and for rehabilitating existing structures using both traditional open-cut and modern trenchless methods. In practice, GRP profiles with a ribbed structure (Figure 1a) and a non-ribbed structure are encountered (Figure 1b). The use of ribs allows, among other things, the achievement of pipes with a lighter construction and an increased mechanical strength. These pipes exhibit better soil-structure interaction.

The structural layer of GRP pipes ($S_{3/1}$) is always made of glass fibers (in the form of mats, roving fabrics, and/or continuous fibers) saturated with resin. The outer layer (S_5) is also a glass fiber mat saturated with resin, but also has the addition of quartz sand to increase the external surface roughness. The inner layers (a mat or chopped glass fiber soaked in resin (S_2), a gelcoat, or resin (S_1)) are made with the addition of powdered silicon carbide or silicon dioxide. The inner layers provide low roughness below 0.01 mm and low abrasiveness. The structure of the ribs is always built from two load-bearing layers ($S_{3/1}$ and $S_{3/2}$) filled with, for example, polyurethane. The

Plastic), które dzięki właściwościom jest powszechnie stosowane w infrastrukturze drogowej i mostowej. GRP, znane także jako kompozyt zbrojony włóknem szklanym lub tworzywo wzmacniane szkłem (TWS), charakteryzuje się dużą odpornością na działanie czynników środowiskowych, takich jak wilgoć, korozja czy ścieranie.

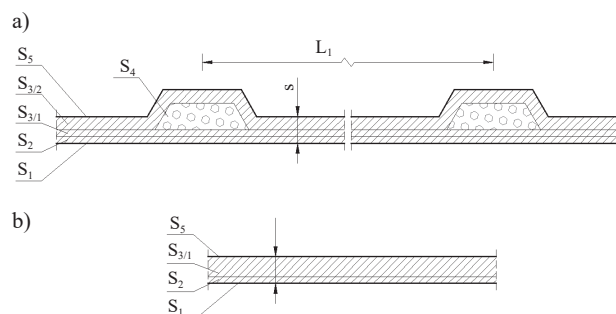
Jedną z technologii produkcji rur i profili z GRP jest metoda nawojowa, która polega na nawijaniu warstw włókien szklanych i żywicy poliestrowej na obrotową formę. Ta technologia umożliwia precyzyjne dostosowanie grubości ścianki oraz struktury rury do wymagań projektowych. Metoda nawojowa ma wiele zalet, wśród których najważniejsze to:

- możliwość produkcji rur o dowolnych kształtach, dużym przekroju poprzecznym oraz ze zmienną grubością i strukturą ścianki na obwodzie, z zastosowaniem w miarę prostej technologii;
- możliwość stosowania włókna ciągłego, zorientowanego w żądanym kierunku działania naprężeń, odporniejszego na obciążenia długotrwałe i zmęczeniowe od włókien ciętych;
- małe odchyłki wymiarowe wewnętrznego przekroju rur;
- możliwość pogrubień kształtowania na zewnętrznej powierzchni złączy kielichowych oraz nadania zewnętrznej powierzchni szorstkiej faktury w celu dobrej współpracy z gruntem.

Przepusty wykonywane z rur produkowanych metodą nawojową są stosowane do budowy nowych, a także renowacji istniejących konstrukcji w technologiach wykopu otwartego i bezwykopowych. W praktyce spotyka się profile GRP o konstrukcji żebrowanej (rysunek 1a) i nieżebrowanej (rysunek 1b). Stosowanie żeber pozwala m.in. na uzyskanie rur o lekkiej konstrukcji, dużej wytrzymałości mechanicznej i wykazujących dobrą współpracę z gruntem.

Warstwa nośna rur z GRP ($S_{3/1}$) wykonana jest zawsze z włókien szklanych (w postaci mat, tkanin rovingowych i/lub włókien ciągłych) przesyconych żywicą. Warstwę zewnętrzną (S_5) stanowi również mata z włókna szklanego przesycona żywicą i z dodatkiem piasku kwarcowego w celu zwiększenia chropowatości powierzchni zewnętrznej. Warstwy wewnętrzne wykonane są z dodatkiem sproszkowanego węgla krzemu lub dwutlenku krzemu i są to maty lub cięte włókno szklane nasączone żywicą (S_2) oraz żelkot lub żywica (S_1). Warstwy wewnętrzne zapewniają małą chropowatość na poziomie poniżej 0,01 mm i małą ścieralność. Konstrukcja żeber, jeśli są wykonywane, składa się zawsze z dwóch warstw nośnych ($S_{3/1}$ i $S_{3/2}$) wypełnionych np. poliuretanem. Żebra mogą być wykonane w wersji pustej lub pełnej, bez wypełnienia (S_4).

Badania modelowe konstrukcji wielkogabarytowych z tworzywa GRP prowadzone w warunkach laboratoryjnych, pozwalają na analizę param-



L_1 – distance between ribs; s – wall thickness; S_1 , S_2 – inner layer; $S_{3/1}$, $S_{3/2}$ – supporting layer; S_4 – rib structure; S_5 – outer layer

Oznaczenia: L_1 – odległość między żebrami; s – grubość ścianki; S_1 , S_2 – warstwy wewnętrzne; $S_{3/1}$, $S_{3/2}$ – warstwy nośne; S_4 – konstrukcja żebra; S_5 – warstwa zewnętrzna

Fig. 1. Construction of culvert walls made of GRP composite: a) ribbed profile; b) non-ribbed profile

Rys. 1. Budowa ścian przepustów wykonanych z kompozytu GRP: a) profil o konstrukcji żebrowanej; b) profil o konstrukcji nieżebrowanej

ribs can also be made as a hollow or solid version without filler (S_4).

Model testing of large-scale GRP structures in laboratory conditions allows for the analysis of technical parameters such as deflection, wall strain, and the structure's response to various types of loads. This research is not only important for verifying the durability and reliability of these structures, but also for assessing their performance under real-world conditions. It should be emphasized that GRP, like other plastics, exhibits viscoelastic properties, meaning it possesses both viscous (viscoplastic) and elastic characteristics. Its behavior under load is a combination of two mechanisms: elastic deformation (typical for elastic materials like steel or rubber) and viscous flow (observed in fluids). This gives viscoelastic materials unique properties that allow them to absorb and dissipate energy [4]. The mechanical properties of viscoelastic materials are temperature-dependent, change over time, and are influenced by the duration and type of loading. For this reason, both short-term and long-term values for strength parameters are always provided for design purposes. The basic performance properties of GRP pipes are listed below:

- modulus of elasticity (short-term loads): $\geq 13,000$ MPa;
- modulus of elasticity (long-term loads in an aqueous environment): $\geq 9,490$ MPa;
- flexural strength (short-term loads): ≥ 240 MPa;
- flexural strength (long-term loads): ≥ 160 MPa;
- internal surface roughness coefficient: ≤ 0.01 mm;
- abrasion (Darmstadt test method): ≤ 0.15 mm after 100,000 cycles.

The remainder of this article presents the results of full-scale model testing, which focused on analyzing the behavior of a GRP culvert under loading conditions that simulated road traffic. This research provides crucial information regarding the structural mechanics of flexible structures, as well as the potential for their optimization in infrastructure design. Model tests conducted on such objects allow for the verification of the structure's actual behavior when interacting with the soil, in turn contributing significantly to engineering knowledge in the design of flexible structures under combined geotechnical and traffic conditions. The results of such research enable the precise adaptation of designs to operational requirements, which is essential for ensuring the long-term durability and safety of transportation infrastructure.

Test Stand and Research Parameters

The research was conducted on the „STEND” Dynamic and Fatigue Test Stand located at the Road and Bridge Research Institute – Wrocław Branch (IBDiM – Wrocław Branch). The test stand is equipped to perform strength tests on products and structures subjected to direct loading, indirect loading via intermediate systems, and within assembled models that replicate real-world operating conditions. The facility includes an 80-meter-long reinforced concrete foundation, which serves as a base for positioning test elements and constructing

trów technicznych, takich jak ugięcia, odkształcenia ścianek czy reakcje konstrukcji na różnego rodzaju obciążenia. Badania te mają znaczenie nie tylko w przypadku weryfikacji trwałości i niezawodności konstrukcji, ale również oceny ich zachowania w warunkach rzeczywistych. Należy podkreślić, że materiał GRP, tak samo jak inne tworzywa sztuczne, wykazuje właściwości lepkosprężyste, tzn. ma jednocześnie cechy lepkie (lepkoplastyczne) i sprężyste. Pod wpływem obciążeń występują dwa mechanizmy w zachowaniu GRP: elastyczne odkształcenie (charakterystyczne w przypadku materiałów sprężystych, jak stal czy guma) oraz lepki przepływ (obserwowany np. w cieczach). Dzięki temu materiały lepkosprężyste mają wyjątkowe właściwości, pozwalające na absorpcję i rozpraszanie energii [4]. Właściwości mechaniczne materiałów lepkosprężystych zależą od temperatury oraz długości i rodzaju obciążania, ale też są zmienne w czasie, dlatego do projektowania podaje się zawsze wartości krótkotrwałe i długotrwałe parametrów wytrzymałościowych. Podstawowe właściwości użytkowe rur GRP są następujące:

- moduł sprężystości w przypadku obciążeń krótkotrwałych $\geq 13\,000$ MPa;
- moduł sprężystości w przypadku obciążeń długotrwałych w środowisku wodnym $\geq 9\,490$ MPa;
- wytrzymałość na zginanie w przypadku obciążeń krótkotrwałych ≥ 240 MPa;
- wytrzymałość na zginanie w przypadku obciążeń długotrwałych ≥ 160 MPa;
- współczynnik chropowatości powierzchni wewnętrznej $\leq 0,01$ mm;
- ścieranie wg próby Darmstadzkiej $\leq 0,15$ mm po 100 000 cykli.

W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki badań modelowych w skali naturalnej, które koncentrowały się na analizie zachowania przepustu z GRP w warunkach obciążeniowych, symulujących m.in. ruch drogowy. Przeprowadzone badania dostarczają istotnych informacji dotyczących mechaniki pracy konstrukcji podatnych oraz możliwości ich optymalizacji w projektowaniu obiektów infrastrukturalnych. Badania modelowe takich obiektów pozwalają zweryfikować rzeczywiste zachowanie konstrukcji we współpracy z gruntem i stanowią istotny wkład w rozwój wiedzy inżynierskiej dotyczącej projektowania konstrukcji podatnych w warunkach gruntowo-komunikacyjnych. Rezultaty takich badań umożliwiają precyzyjne dostosowanie projektów do wymagań eksploatacyjnych, co jest szczególnie istotne do zapewnienia trwałości i bezpieczeństwa infrastruktury komunikacyjnej w długim okresie użytkowania.

Stanowisko badawcze i parametry badań

Badania przeprowadzono na Stanowisku do Badań Dynamicznych i Zmęczeniowych STEND, znajdującym się w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów – Filii Wrocław (IBDiM-Filia Wrocław). Stanowisko umożliwia prowadzenie badań wytrzymałościowych wyrobów i konstrukcji obciążanych bezpośrednio przez układy pośredniczące oraz w zabudowanych modelach odzwierciedlających rzeczywiste warunki pracy konstrukcji. Stanowisko wyposażone jest w fundament żelbetowy o długości 80 m, stanowiący podstawę do ustawienia badanych elementów i zabudowy stanowiska badawczego oraz ramę ob-

the experimental setup. It also features a loading frame with a SCHENCK hydraulic actuator system, complete with measurement, control, and power supply systems. This apparatus allows for strength testing under variable loads of any waveform (e.g., sinusoidal, trapezoidal) and enables the recording of the test elements' behavior using a system of displacement transducers, force transducers, strain gauges, pressure cells, and other sensors.

The tested GRP culvert, featuring a circular cross-section with a nominal diameter of DN 2100, was installed on a prepared foundation of structural soil (Photo). The soil in the haunches, as well as the backfill and cover soil, was placed in layers alternately on both sides of the pipe, in accordance with the *Design and Technological Recommendations for Flexible Road Engineering Structures Made of Plastics* [5]. Loads were applied using two synchronized hydraulic actuators onto a system of four loading plates, arranged according to the „Load Model 1” schematic [1]. For the tests under static (quasi-static) and variable (cyclic) loads, the following load values were adopted (per PN-EN 1991-2:2007):

- vehicle traffic load – axle load $Q_{ik} = 300$ kN (totaling 600 kN over two axles);
- permanent, uniformly distributed load $q_{ik} = 9$ kN/m² (totaling 68 kN over 7.5 m²).

For the static tests, a five-cycle trapezoidal load waveform was applied, with a loading rate of 10 kN/s and an unloading rate of 20 kN/s. During these tests, readings from strain gauges and transducers were recorded upon reaching 50% of the first load cycle, at the peak of each subsequent cycle, and after unloading. For the variable (cyclic) load tests, a sinusoidal load cycle with a frequency ranging from 1.0 to 1.15 Hz was used.

The research aimed to determine the behavior of the installed culvert structure under loads simulating heavy vehicle traffic. To measure the structure's deflections and strains, the model was instrumented with the following (Figure 2):



“STEND” test stand with a built-in GRP culvert

Stanowisko badawcze „STEND” z zabudowanym przepustem z tworzywa GRP

ciążającą z układem siłowników hydraulicznych, wraz z systemami pomiarowymi, systemem sterowania i zasilania. Aparatura umożliwia przeprowadzanie badań wytrzymałościowych pod obciążeniem zmiennym o dowolnym przebiegu (np. w cyklu sinusoidalnym, trapezowym itp.) i rejestrację zachowania badanych elementów za pomocą systemu przetworników przemieszczeń, przetworników siły, tensometrów, presjometrów oraz innych czujników i przetworników.

Badany przepust z tworzywa GRP, o przekroju kołowym i średnicy nominalnej DN 2100, został posadowiony na przygotowanym fundamencie z gruntu budowlanego (fotografia). Grunt w pachwinach oraz grunt zasypki i nadsypki układał się warstwami, naprzemiennie z obu stron rur zgodnie z zaleceniami projektowymi i technologicznymi dotyczącymi podatnych drogowych konstrukcji inżynierskich z tworzyw sztucznych [5]. Obciążenia przekazywano za pomocą dwóch zsynchronizowanych siłowników hydraulicznych na układ czterech pól obciążających o rozkładzie wg schematu „Model Obciążenia 1” [1]. Do badań pod obciążeniami statycznymi (wolnozmiennymi) i zmiennymi (cyklicznymi) przyjęto następujące wartości obciążeń (wg PN-EN 1991-2:2007):

- obciążenie od ruchu taboru – na oś $Q_{ik} = 300$ kN (sumarycznie 600 kN na dwóch osiach);
- obciążenie stałe, równomiernie rozłożone $q_{ik} = 9$ kN/m² (sumarycznie 68 kN na 7,5 m²).

Do obciążeń statycznych zastosowano trapezowy, pięciokrotny przebieg obciążeń w czasie, z prędkością przyrostu obciążeń 10 kN/s i prędkością odciążenia 20 kN/s. Odczyty z tensometrów i przetworników pomiarowych, w czasie badań pod obciążeniami statycznymi, rejestrowano po osiągnięciu 50% pierwszego obciążenia oraz w maksimach kolejnych obciążeń i po odciążeniu. Do badań pod obciążeniami zmiennymi (cyklicznymi) zastosowano sinusoidalny kształt cyklu zmian obciążenia o częstotliwości 1,0÷1,15 Hz.

Badania miały na celu określenie zachowania zabudowanej konstrukcji przepustu pod wpływem obciążeń symulujących ruch ciężkich pojazdów kołowych. W celu wyznaczenia ugięć i odkształceń konstrukcji, zainstalowano w modelu (rysunek 2):

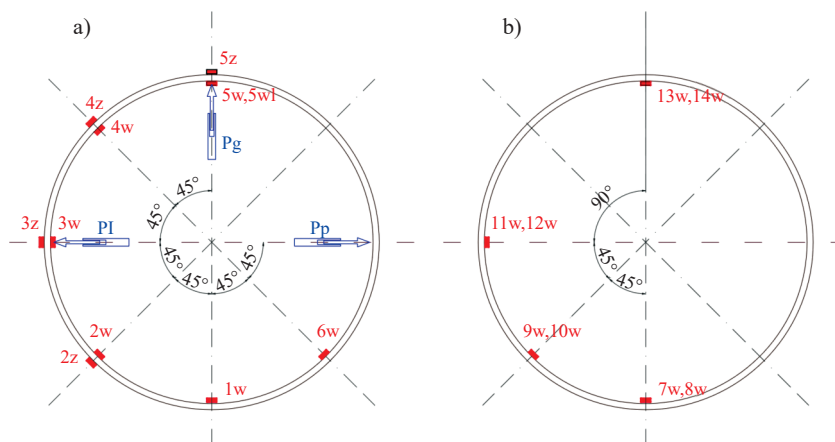


Fig. 2. Schematic layout of displacement transducers and foil strain gauges on the surfaces of a circular pipe in the plane of load action (a) and on pipe joints (b)

Rys. 2. Schemat rozmieszczenia przetworników przemieszczenia i tensometrów foliowych na powierzchni rury o przekroju kołowym w płaszczyźnie działania obciążenia (a) i na złączach rur (b)

- inductive displacement transducers with a 100 mm measurement range, installed inside the culvert pipes to measure vertical and horizontal deflections;
- pressure cells with a measurement range of up to 0.5 MPa, used to measure pressure within the soil in the plane of load application, and local pressures on the external surface of the culvert pipes;
- foil-type, electrical resistance strain gauges with a 10 mm gauge length, used to measure strains in the GRP material in the circumferential (hoop) and longitudinal directions. These were installed on the inner and outer surfaces of the culvert pipes, in the plane of load application, and at the pipe joints.

Test results

Results during the installation of the culvert. During the backfilling process, measurements of the strain and displacement of the tested culvert structure were taken after the placement and compaction of each backfill and cover layer. Measurements were also recorded after the load-transfer structure was positioned and the test stand was subjected to a permanent (dead) load. A total of 19 measurement sessions were conducted during the installation of the culvert structure.

Consistent with previous IBDiM model tests on flexible elements [6÷8], the maximum levels of deflection and strain were recorded when the soil backfill reached a height of approximately 2/3 of the culvert's height. Subsequently, the readings decreased as the cover layers were added, with localized strains changing from tension to compression or vice versa. Further peaks were observed after the model's construction was completed and the load-transfer structure was set in place, as shown in Figures 3÷5.

Test results under static loading. Loading of the culvert model began with the application of five quasi-static loads using a trapezoidal waveform. This type of cycle allows for the precise recording of readings (with a clear division into the phases of load increase, maintaining a constant load, unloading, and the zero-load period). During initial stat-

• indukcyjne przetworniki przemieszczenia, o zakresie pomiarowym 100 mm, wewnątrz rur przepustowych w płaszczyźnie pionowej i poziomej;

• presjometry o zakresie pomiarowym do 0,5 MPa do pomiaru nacisków w gruncie w płaszczyźnie działania obciążeń oraz do pomiaru miejscowych nacisków na zewnętrzną powierzchnię rur przepustowych;

• tensometry foliowe, elektrooporowe o długości pomiarowej 10 mm do pomiaru odkształceń materiału GRP w kierunku obwodowym i wzdłużnym, zainstalowane na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni rur przepustowych, w płaszczyźnie działania obciążeń oraz na złączach rur przepustowych.

Wyniki badań

Wyniki badań w trakcie zabudowy konstrukcji przepustu.

Podczas procesu zasypywania dokonywano pomiarów odkształceń i przemieszczeń badanej konstrukcji przepustu po wbudowaniu i zagęszczeniu każdej warstwy zasyпки i nadsypki oraz po ustawieniu konstrukcji przenoszącej obciążenia i obciążeniu stanowiska obciążeniem stałym. Podczas zabudowy konstrukcji przepustu przeprowadzono po 19 sesji pomiarowych.

Podobnie jak we wcześniej wykonywanych w IBDiM badaniach modelowych z elementami podatnymi [6÷8], maksymalne poziomy ugięcie i odkształcenia notowano podczas wbudowania gruntu do wysokości ok. 2/3 wysokości konstrukcji przepustu, po czym wartości odczytów malały w trakcie układania warstw nadsypki, lokalnie przechodząc z rozciągania na ścisnienie lub odwrotnie. Kolejne maksima notowano po zakończeniu budowy modelu i ustawieniu konstrukcji przekazującej obciążenia, co przedstawiono na rysunkach 3÷5.

Wyniki badań w trakcie obciążeń statycznych konstrukcji przepustu.

Obciążanie modelu konstrukcji przepustu rozpoczęto od przeprowadzenia pięciu obciążeń wolnozmiennych w cyklu trapezowym. Przebieg taki umożliwia dokładną rejestrację odczytów z wyraźnym podziałem na fazy przyrostu obciążenia, utrzymania stałego obciążenia, odciążania i czas bez działania obciążeń. Podczas obciążeń statycznych

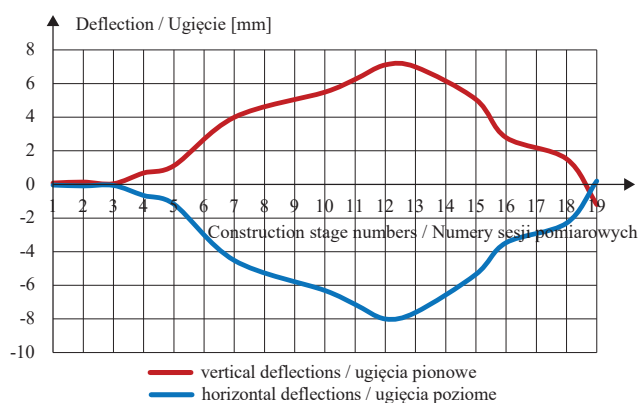


Fig. 3. Vertical and horizontal deflections of the culvert diameter during construction

Rys. 3. Ugięcia pionowe i poziome średnicy przepustu w trakcie zabudowy

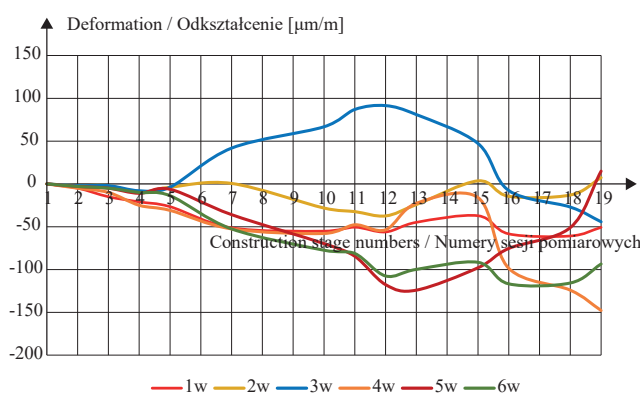


Fig. 4. Readings from internal strain gauges during the construction of the culvert of layers 1-6

Rys. 4. Odczyty z tensometrów wewnętrznych w trakcie zabudowy przepustu warstw 1-6

ic loading, phenomena such as local soil densification, the elimination of clearances (settling), and the seating of components (e.g., at the joints) usually occur. As a result, this phase can exhibit relatively large increases in deformation and strain. In the tested culvert, deflections recorded during the static tests did not exceed 1.5% of the pipe's diameter. Strains did not exceed 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ on the pipe barrel and 910 $\mu\text{m}/\text{m}$ at isolated locations on the joint.

Furthermore, the increases in deformation between the first and final load cycles were gradual, not abrupt, which indicates a low stress level in the structure and the absence of any signs of distress. The readings from the strain gauges and displacement transducers at the static load points are shown in Figures 6 and 7.

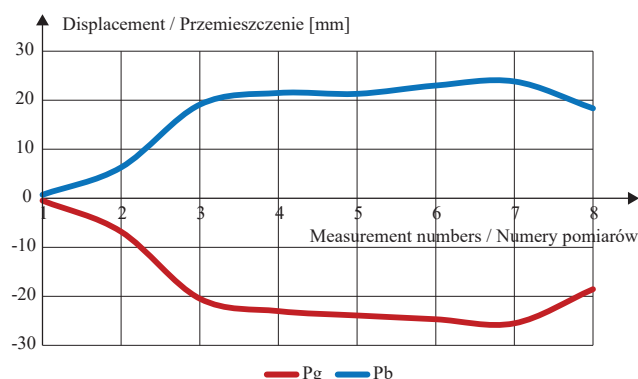


Fig. 6. Vertical (Pg) and horizontal (Pb) deflections of the diameter of a circular pipe under static loads

Rys. 6. Ugięcia pionowe (Pg) i poziome (Pb) średnicy rury o przekroju kołowym podczas obciążeń statycznych

Test results under cyclic loading. Testing under variable loads is the most critical phase of model testing, as it allows for the determination of long-term deformations and strains and helps to characterize the nature of their increase over time. Within the first 1,000 load cycles, progressive deflections and strains can exceed the initial static load values by a significant percentage. Further testing helps determine if the increases in these deflections and strains exhibit a linear trend on a logarithmic scale. In the tested models, most of the deflection and strain progressions showed a linear trend on a logarithmic scale (Figures 8 and 9). This linearity allows for the reliable estimation of their values in subsequent load cycle intervals.

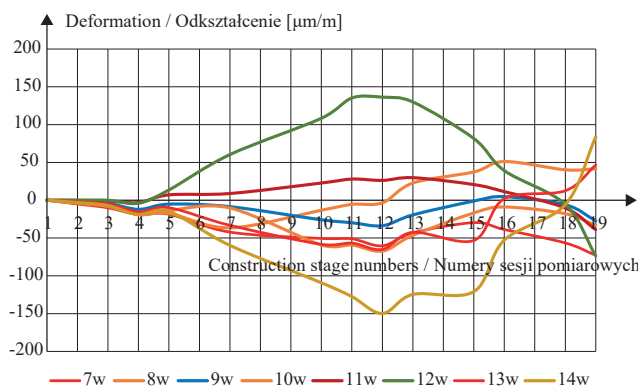


Fig. 5. Readings from internal strain gauges during the construction of the culvert of layers 7-14

Rys. 5. Odczyty z tensometrów wewnętrznych w trakcie zabudowy przepustu warstw 7-14

następuje lokalne dogęszczenie gruntu, wykasowanie miejscowych luzów i dopasowanie elementów np. na złączach, dlatego w tej fazie mogą występować względnie duże przyrosty deformacji i odkształceń. W badanym przepście zanotowano ugięcia podczas obciążeń statycznych nieprzekraczające 1,5% średnicy w przypadku kształtu kołowego, natomiast odkształcenia trzonu rury nie przekazywały 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ i 910 $\mu\text{m}/\text{m}$ w pojedynczych lokalizacjach na złączu. Ponadto, przyrost deformacji pomiędzy pierwszym i ostatnim obciążeniem nie miał charakteru skokowego, co świadczy o niewielkim wyężeniu konstrukcji i braku niepokojących zjawisk. Odczyty z tensometrów i przetworników przemieszczeń w punktach obciążeń statycznych przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

W badanym przepście zanotowano ugięcia podczas obciążeń statycznych nieprzekraczające 1,5% średnicy w przypadku kształtu kołowego, natomiast odkształcenia trzonu rury nie przekazywały 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ i 910 $\mu\text{m}/\text{m}$ w pojedynczych lokalizacjach na złączu. Ponadto, przyrost deformacji pomiędzy pierwszym i ostatnim obciążeniem nie miał charakteru skokowego, co świadczy o niewielkim wyężeniu konstrukcji i braku niepokojących zjawisk. Odczyty z tensometrów i przetworników przemieszczeń w punktach obciążeń statycznych przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

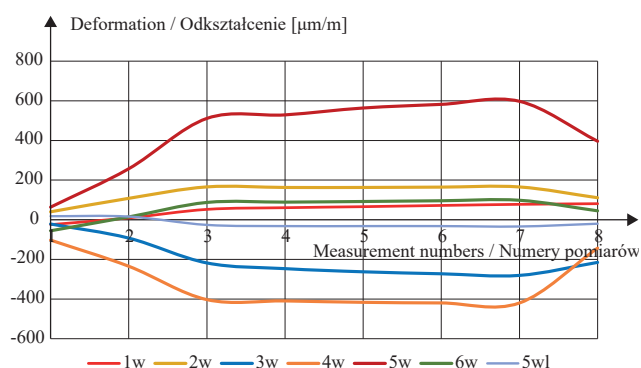


Fig. 7. Readings from internal strain gauges during static loads on the culvert

Rys. 7. Odczyty z tensometrów wewnętrznych podczas obciążeń statycznych przepustu

Wyniki badań podczas obciążeń cyklicznie zmiennych konstrukcji przepustu. Badania pod obciążeniami zmiennymi są najważniejszym etapem badań modelowych, ponieważ pozwalają wyznaczyć deformacje i odkształcenia w dłuższej perspektywie czasu i określić charakter przyrostu tych zmian. Już podczas pierwszych 1000 cykli obciążeń postępujące ugięcia i odkształcenia mogą przekroczyć o kilkadziesiąt procent wartości z pierwszych obciążeń statycznych. Dalsze badania pozwalają określić, czy przyrosty ugięć i odkształceń mają charakter liniowy w skali logarytmicznej. W badanych modelach większość przebiegów ugięć i odkształceń miała taki przebieg (rysunki 8 i 9), co pozwala na ich szacowanie w kolejnych przedziałach cykli obciążeń.

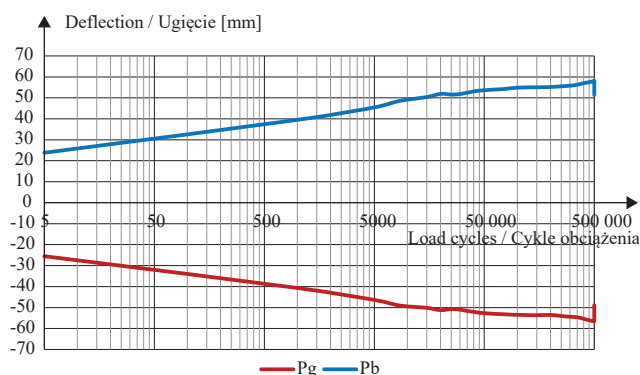


Fig. 8. Vertical (Pg) and horizontal (Pb) deflections during variable load cycles of the culvert

Rys. 8. Ugięcia pionowe (Pg) i poziome (Pb) podczas cykli obciążeń zmiennych przepustu

Summary and conclusions

Throughout the tests, no damage, cracking, or delamination was observed in any part of the tested culvert structure. The GRP material strains, recorded using foil-type electrical resistance strain gauges, did not exceed $1300 \mu\text{m/m}$ at any measurement point. The highest strain values were recorded at the joints (in cross-section Figure 2b, strain gauges No. 12w, 13w, and 14w), on internal strain gauge 3w, and external gauge 5z. Under cyclic loading, the deflection and most of the strain plots exhibited an approximately linear trend on a logarithmic scale. There were no significant breaks or changes in the plots that would indicate damage or a loss of stability in the pipe-soil system. (Note: The anomalies around the 20,000-cycle mark were due to a scheduled pause, during which the load distribution system was readjusted.) The largest increase in strain per decade of fatigue cycles (on a log scale) was recorded by internal strain gauge 3w; however, in the final decade of loading (from 50,000 to 500,000 cycles), this rate of increase slowed to $70 \mu\text{m/m}$ per decade, which is an acceptable value.

The increases in strain recorded by the longitudinally oriented gauges did not exceed $110 \mu\text{m/m}$ throughout the entire test. This indicates the pipe's good resistance to longitudinal bending moments and confirms that it was adequately supported along its length. It can be concluded that the processes of soil densification, settlement, and any potential soil slip-page relative to the GRP pipe were completed between the 5,000th and 20,000th load cycles. In subsequent cycles, the rate of change in deflections and strains at key measurement points decreased significantly.

The analysis of the measurement results indicates a predictable structural behaviour of the structure. This in turn confirms the absence of manufacturing defects or damage in the GRP pipes, the proper selection and compaction of the soil, and the correct soil-structure interaction. During the back-filling stage, the properly compacted soil absorbed a portion of the loads, in turn limiting pipe deflection. Simultaneously, due to the high stiffness of the pipes, the „arching” or „peak-ing” of the crown during the placement of the backfill was minimal and remained within a safe range (diameter change

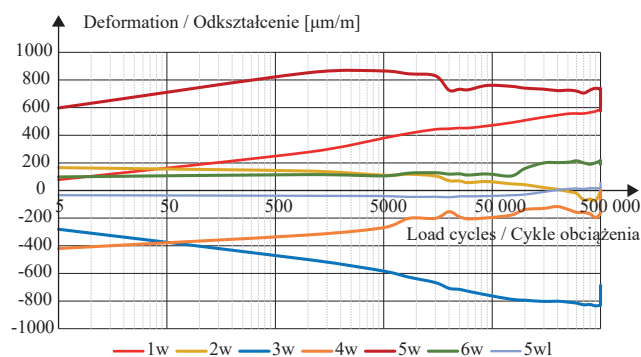


Fig. 9. Readings from internal strain gauges during variable load cycles of the culvert

Rys. 9. Odczyty z tensometrów wewnętrznych podczas cykli obciążeń zmiennych przepustu

Podsumowanie i wnioski

Podczas badań w żadnej części konstrukcji badanego przepustu nie zaobserwowano uszkodzeń, pęknięć i delaminacji. Odształcenia materiału GRP zarejestrowane za pomocą tensometrów foliowych, elektrooporowych, nie przekroczyły w żadnym z punktów pomiarowych wartości $1300 \mu\text{m/m}$. Największe wartości odształceń zanotowano na złączach (w przekroju – rysunek 2b, nr tensometrów 12w, 13w i 14w) oraz na tensometrze wewnętrznym 3w i zewnętrznym 5z. Wykresy ugięć i większość wykresów odształceń, w czasie badań pod obciążeniami cyklicznymi, przebiegają na skali logarytmicznej w przybliżeniu liniowo, bez istotnych załamań i zmian przebiegu wykresów mogących świadczyć o uszkodzeniach lub utracie stateczności układu rura – grunt (załamania w okolicy 20000 cyklu wynikają z przerwy technologicznej, w czasie której skorygowano ustawienie układu rozkładającego obciążenia). Największy przyrost odształceń na dekadę cykli zmęczeniowych w skali logarytmicznej zarejestrowano na tensometrze wewnętrznym 3w, ale w ostatniej dekadzie obciążeń (od 50 000 do 500 000 cykli) przyrost zmniejszył się do $70 \mu\text{m/m}$ na dekadę, co jest wartością akceptowalną.

Przyrosty odształceń rejestrowane na tensometrach zorientowanych wzdłużnie nie przekraczały $110 \mu\text{m/m}$ w ciągu całego badania, co świadczy o dobrej wytrzymałości rur na wzdłużny moment zginający i odpowiednim podparciu rur na długości. Zakończenie zjawisk dogęszczania gruntu oraz układania i ewentualnych poślizgów gruntu względem rury z GRP można przyjąć pomiędzy 5000 a 20 000 cyklem, w kolejnych cyklach tempo zmian ugięć i odształceń w kluczowych punktach pomiarowych uległo wyraźnemu zmniejszeniu.

Analiza wyników pomiarów wskazuje na przewidywalny charakter pracy konstrukcji, co świadczy zarówno o braku wad produkcyjnych i uszkodzeń rur z GRP, jak i o prawidłowym doborze i zagęszczeniu gruntu oraz właściwej współpracy podanej rury z gruntem. Już na etapie zasypki odpowiednio zagęszczony grunt przejął część obciążeń, ograniczając ugięcia rur, jednocześnie dzięki dużej sztywności rur zjawisko wybrzuszenia górnej części na etapie układania zasypki wystąpiło w niewielkim, bezpiecznym zakresie (zmiana średnicy mniej niż 0,5%, maksymalne odształcenia $150 \mu\text{m/m}$).

below 0.5%, maximum strain 150 $\mu\text{m/m}$). The soil, with a degree of compaction of 0.98, provided effective support for the structure by creating a cohesive system with the pipes and by transferring loads (elastically). As a result, the variable loads induced acceptable levels of deflection and strain. When extrapolated to 20 million and 50 million cycles, the strains at all the measurement points did not exceed 1500 $\mu\text{m/m}$, and the extrapolated deflections did not exceed 70 mm. These are safe values for the tested GRP culvert pipes over the designed service life of such engineering structures.

The conducted model tests confirmed the high load-bearing capacity and design adequacy of the DN2100 circular GRP culvert, even in the case of the minimum height of the ground cover and during the long-term operation of high-magnitude variable loads.

This paper was co-financed under the research grant of Warsaw University of Technology, which supports scientific activity in the discipline of Civil Engineering, Geodesy and Transport.

Received: 12.05.2025

Revised: 21.07.2025

Published: 23.10.2025

Grunt o wskaźniku zagęszczenia 0,98 zapewnił skuteczne podparcie, tworząc z rurami spójny układ i przejmując obciążenia w sposób sprężysty. Dzięki temu obciążenia zmienne wywoływały akceptowalne ugięcia i odkształcenia. Odkształcenia ekstrapolowane do 20 mln i 50 mln cykli nie przekraczają w żadnym z punktów pomiarowych 1500 $\mu\text{m/m}$, natomiast ekstrapolowane ugięcia nie przekraczają 70 mm i są to wartości bezpieczne w przypadku badanych rur przepustowych z GRP w projektowanym okresie eksploatacji obiektów inżynierskich.

Przeprowadzone badania modelowe potwierdziły bardzo dużą nośność i adekwatność projektową przepustu z rur GRP o przekroju kołowym DN 2100, przy minimalnej wysokości nadsypki, w warunkach narażenia na długotrwałe duże obciążenia o zmiennym przebiegu.

Publikacja jest współfinansowana w ramach grantu badawczego Politechniki Warszawskiej wspierającego prowadzenie działalności naukowej w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

Artykuł wpłynął do redakcji: 12.05.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 21.07.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

- [1] PN-EN 1991-2 Eurokod 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges.
- [2] Wysokowski A, Howis J. Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej – cz. 1, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, pp. 52-56, March-April 2008.
- [3] Wysokowski A, Machelski C., Howis J. Ekologiczne obiekty gruntowo-powłokowe w budownictwie komunikacyjnym, Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2022.
- [4] Janson L-E. Rury z tworzyw sztucznych do zaopatrzenia w wodę i odprowadzania ścieków, Toruń: Polskie Towarzystwo Producentów Rur i Kształtek z Tworzyw Sztucznych, 2010.
- [5] Zalecenia projektowe i technologiczne dla podatnych drogowych kon-

strukcji inżynierskich z tworzyw sztucznych (Appendix to Ordinance No. 30 of the General Director for National Roads and Motorways of November 2, 2006.

- [6] Jasiński W, Walczak R. Badania modelowe przepustów drogowych z GRP w skali naturalnej. Materiały Budowlane, 11/2018, 28-30.
- [7] Gut R, Jasiński W, Duszyński A, Czaplą A, Drewnowski J. Badania porównawcze wpływu grubości ścianki powłoki o przekroju niekołowym wykonanej z tworzywa GRP w obiekcie gruntowo-powłokowym. Materiały Budowlane, 02/2022.
- [8] Korusiewicz L, Chruścielski G, Jasiński W. 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.