

mgr inż. Remigiusz Gut^{1*)}

ORCID: 0000-0002-3327-4142

dr Wiktor Jasiński¹⁾

ORCID: 0000-0001-6612-4207

dr inż. Andrzej Duszyński¹⁾

ORCID: 0000-0002-8842-5630

mgr inż. Aleksander Czapla²⁾

ORCID: 0000-0003-2500-9098

prof. dr hab. Jakub Drewnowski²⁾

ORCID: 0000-0003-1424-0403

Badania porównawcze wpływu grubości ścianki powłoki o przekroju niekołowym, wykonanej z tworzywa GRP, w obiekcie gruntowo-powłokowym

Comparative tests of the wall thickness effect of a GRP coating with a non-circular cross section in a soil-coating object

DOI: 10.15199/33.2022.02.02

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania porównawcze przepustów wykonanych z tworzywa GRP (*Glass Reinforcement Poliester*) zabudowanych w warunkach naturalnych i obciążanych układem sił symulujących obciążenia komunikacyjne zgodne z „Modelem Obciążenia 1” wg [7]. Analizowano dwie konstrukcje o identycznym przekroju poprzecznym (profil dzwonowy DN3000/2400), ale różnej grubości ścianki: standardowej 45 mm i zredukowanej 35 mm. Badania obejmowały pomiary przemieszczeń pionowych i poziomych konstrukcji oraz odkształceń ścianki w części środkowej odcinka i przy złączu. Wyniki badań poddano analizie w celu sprawdzenia wpływu redukcji grubości ścianki na odkształcenia wewnętrznego przekroju konstrukcji oraz na naprężenia w ściankach.

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

Abstract. The article presents comparative research of culverts made of GRP (Glass Reinforcement Polyester) built in natural conditions and loaded with a system of forces simulating traffic loads in accordance with the „Load Model 1” according to [7]. Two structures with the same cross-section (bell profile DN3000/2400) but with a different wall thickness: standard 45 mm and reduced 35 mm were analyzed. The tests included measurements of vertical and horizontal displacements of the structure as well as wall deformations in the middle part of the section and at the joint. The test results were analyzed in order to check the influence of the wall thickness reduction on the deformation of the internal cross-section of the structure and on the wall stresses.

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

W przypadku rur o przekroju kołowym z tworzywa GRP zagadnienie możliwości redukcji grubości i sztywności ścianki jest dosyć dobrze rozpoznane. Normy [5, 6, 8] podają metody badania umożliwiające określenie parametrów wytrzymałościowych wyrobów zarówno przy obciążeniu krótkotrwałym, jak i długotrwałym, ekstrapolowanym za pomocą obliczeń do kilkudziesięciu lat. Rury o przekroju niekołowym z tworzywa GRP wymagają głębszej analizy ze względu na bardziej skomplikowany rozkład naprężeń w różnych miejscach przekroju. Norma [9] dotycząca rur z GRP o przekroju niekołowym podaje

metody wyznaczania oraz sprawdzania krótkotrwałej i długotrwałej wytrzymałości na zginanie oraz modułów sprężystości przy zginaniu, a także obejmujące analizy zachowania konstrukcji poddanej obciążeniom zmiennym charakterystycznym dla obszarów narażonych na obciążenia od ruchu pojazdów kołowych. W Instytucie Badawczym Dróg i Mostów – Filii Wrocław przeprowadzono badania modelowe w pełnej skali obejmujące budowę nasypu z przepustem i konstrukcją rozkładającą obciążenia wg [7] oraz badania wytrzymałościowe przy cyklicznym obciążeniu zmiennym.

Charakterystyka rur z GRP o przekroju niekołowym

Tworzywo GRP (*Glass Reinforcement Poliester*) i FRP (*Fibre Reinforced Plastic*), znane w Polsce także jako TWS

(Tworzywo Wzmacniane Szklę), to materiał kompozytowy, którego osnową jest matryca polimerowa wzmocniona najczęściej włóknami szklanymi, węglowymi, bazaltowymi lub aramidowymi [4]. Produkcja rur z tworzywa GRP polega na nakładaniu na wirującą formę kolejnych warstw kompozytu złożonego z włókien szklanych, piasku kwarcowego oraz żywicy poliestrowej (fotografia 1). Ścianki profilu niekołowego z tworzywa GRP są projektowane jako konstrukcje warstwowe o różnej funkcji poszczególnych warstw (rysunek 1). Warstwa e_5 o grubości co najmniej 0,5 mm jest odporna na promieniowanie UV, warunki atmosferyczne i uszkodzenia mechaniczne (np. zarysowania) oraz chroni warstwę e_4 bogatą we włókna szklane. Warstwy e_4 i e_2 mają przetrzymać naprężenia osiowe i obwodowe spowodowane obciążeniami zewnętr-

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów – Filia Wrocław; Ośrodek Badań Mostów, Betonów i Kruszyw

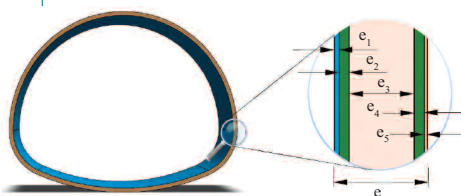
²⁾ Politechnika Gdańska; Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

*) Adres do korespondencji: rgut@ibdim.edu.pl



Fot. 1. Technologia produkcji profili niekołowych z tworzywa GRP [1]

Photo 1. Production technology of non-circular profiles made of GRP material [1]



Oznaczenia: e_1 – wewnętrzna warstwa – liner; e_2 – wewnętrzna warstwa wzmacniająca; e_3 – rdzeń; e_4 – zewnętrzna warstwa wzmacniająca; e_5 – zewnętrzna warstwa ochronna; e_6 – całkowita grubość ścianki

Rys. 1. Warstwy konstrukcyjne ścianki rury z tworzywa GRP o profilu niekołowym [1]

Fig. 1. Structural layers of the wall GRP pipes with a non-circular profile [1]

nymi (grunt, woda gruntowa, ruch drogowy itp.) oddziałującymi na zainstalowany rurociąg. Ze względu na dużą wytrzymałość włókna szklanego (~1500 MPa, czyli ok. 4 razy większa od wytrzymałości stali), jego ilość i położenie decydują o wytrzymałości mechanicznej kompozytu. Warstwa e_3 , składająca się głównie z piasku kwarcowego, włókna szklanego i żywicy termoutwardzalnej, przyczynia się do uzyskania określonej sztywności rury, a także dużej wytrzymałości na ściskanie, tworząc w ten sposób typowy kompozyt warstwowy. Warstwa e_1 o grubości co najmniej 0,8 mm składa się z żywicy odpornej na agresywne środowisko i tworzy powierzchnię o doskonałych właściwościach hydraulicznych oraz dużej odporności chemicznej. Pomiędzy warstwami e_1 i e_2 znajduje się bariera składająca się z posiekanych włókien szklanych, z ograniczoną ilością piasku kwarcowego, w celu zapewnienia lepszego wiązania między tymi warstwami.

Rury o przekroju niekołowym wykonane z tworzywa GRP mogą być stosowane do renowacji starych przepustów oraz wykonania nowych instalacji w wykopach otwartych (fotografia 2). Technologia ta zapewnia bardzo dobre właściwości hydromechaniczne przepustów w przypadku dowolnych wymiarów przekroju poprzecznego (300 ÷ 4000 mm).



Fot. 2. Przepust drogowy z tworzywa GRP o profilu niekołowym o wymiarach 3000/2250 na trasie S6 Szemud – Gdynia Wielki Kack [1]

Photo 2. GRP road culvert with a non-circular profile, dimensions 3000/2250 on the S6 road Szemud – Gdynia Wielki Kack [1]

Podstawowe właściwości użytkowe rur z tworzywa GRP o profilu niekołowym wg [2, 3]:

- moduł sprężystości dla obciążeń krótkotrwałych: 9 500 – 13 500 MPa;
- moduł sprężystości dla obciążeń długotrwałych: 6 000 – 8 500 MPa;
- wytrzymałość na zginanie dla obciążeń krótkotrwałych: 200 – 250 MPa;
- wytrzymałość na zginanie dla obciążeń długotrwałych: 125 – 160 MPa;
- ścieranie wg próby Darmstadt: poniżej 0,25 mm po 100 000 cyklach;
- współczynnik rozszerzalności liniowej: $30 \cdot 10^{-6} 1/K$;
- współczynnik Poissona: 0,3.

Przy projektowaniu przepustów drogowych bardzo ważną rolę odgrywają badania długoterminowe.

Badania porównawcze

Badano dwie konstrukcje gruntu-powłokowe o profilu niekołowym, identycznym kształcie i wymiarach w przekroju, lecz różnej grubości ścianki: profil dzwonowy o DN3000/2400, nominalnej rozpiętości 3000 mm, wysokości 2400 mm i standardowej grubości ścianki z kompozytu GRP 45 mm oraz zmniejszonej grubości ścianki z kompozytu GRP 35 mm [11].

Badania przeprowadzono na Stnowisku do Badań Dynamicznych i Zmęczenia STEND, znajdującym się w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów – Filii Wrocław. Tworzy je fundament żelbetowy o długości 80,0 m i szerokości 12,0 m wraz z halą oraz ramą stalową stanowiącą konstrukcję oporową hydraulicznych urządzeń wymuszających obciążenia. Wyposażone jest w układ siłowników hydraulicznych SCHENCK z systemami pomiarowymi, systemem sterowania i zasilania. Aparatura umożliwia przeprowadzanie badań wytrzymałościowych pod obciążeniami zmiennymi o dowolnym przebiegu (np. w cyklu sinusoidalnym, trapezowym itp.) i rejestrację zachowania badanych elementów za pomocą m.in. przetworników przemieszczeń, przetworników siły, tensometrów oraz innych czujników.

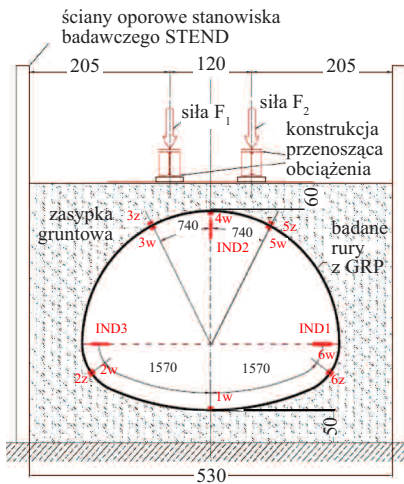
Badane konstrukcje zabudowano na stanowisku badawczym zgodnie z obowiązującymi przepisami i normami dotyczącymi budownictwa komunikacyjnego i wykonywania robót budowlanych [10, 12]. Pod profilami z kompozytu GRP zastosowano podłoże z gruntu budowlanego, który zagęszczano warstwami, naprzemiennie z obu stron, z docelowym minimalnym wskaźnikiem zagęszczenia gruntu fundamentu, zasypki i nadsypki $I_s = 0,98$ [12].

Obciążenia przekazywano za pomocą układu dwóch zsynchronizowanych siłowników hydraulicznych wg schematu „Model Obciążenia 1” [7], co pokazano na rysunku 2 i fotografii 3. Przyjęto następujące obciążenia zmienne wg [7]:

- od ruchu taboru $Q_{ik} = 300 \text{ kN/oś}$;
- równomiernie rozłożone $q_{ik} = 9 \text{ kN/m}^2$.

Obciążenia zmienne realizowano za pomocą zsynchronizowanych w czasie dwóch siłowników hydraulicznych stanowiska STEND. Zastosowano sinusoidalny kształt cyklu zmian obciążenia o częstotliwości $f = 1 \text{ Hz}$, wykonując 500 000 cykli obciążenia/odciążenia.

Do pomiaru przemieszczeń profilu z GRP zastosowano trzy indukcyjne przetworniki przemieszczenia o zakresie pomiarowym $\pm 50 \text{ mm}$, zamocowane w jednej z dwóch płaszczyzn działania obciążenia. W celu rejestracji odkształceń w płaszczyźnie obciążenia zainstalowano 18 tensometrów elektroopor-



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego z zabudowaną konstrukcją

Fig. 2. Diagram of the test stand with built-in structure



Fot. 3 Zabudowany model z konstrukcją przekazującą obciążenia

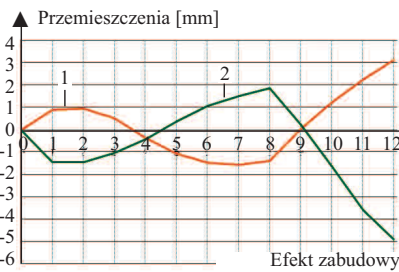
Photo 3. Built-in model with structure transmitting the load

wych, które pozwalały na pomiar odkształcenia obwodowego ϵ . Pomiary prowadzono w fazie wbudowywania gruntu zasypki i nadsypki, montażu konstrukcji przenoszącej obciążenia i podczas badań pod obciążeniami zmiennymi.

Wpływ grubości ścianki na odkształcenia konstrukcji kompozytowej w fazie budowy modelu

Bardzo duży wpływ na odkształcenia konstrukcji powłokowej w fazie budowy modelu ma jakość prowadzo-

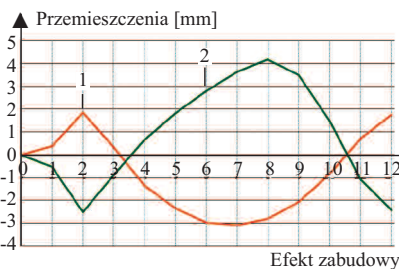
nych prac ziemnych, przede wszystkim właściwe zagęszczenie gruntu w dolnych pachwinach oraz przestrzeganie zaleceń dotyczących naprzemiennego układania i zagęszczania zasyпки. Błędy popełnione na tym etapie mogą skutkować nieodwracalną deformacją profilu konstrukcji gruntowo-powłokowej, a w skrajnym przypadku przekroczeniem dopuszczalnego ugięcia i odkształcenia. W badaniach porównawczych zastosowano identyczne warunki układania i zagęszczania gruntu oraz identyczny grunt i sprzęt budowlany. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przemieszczenia profili z kompozytu GRP w fazie wbudowania zasyпки.



Oznaczenia: 1 – poziome; 2 – pionowe

Rys. 3. Przemieszczenia profilu z kompozytu GRP o grubości ścianki 45 mm w fazie wbudowania zasyпки

Fig. 3. Displacements of a profile made of GRP composite with a wall thickness of 45 mm during the incorporation of the backfill



Oznaczenia: 1 – poziome; 2 – pionowe

Rys. 4. Przemieszczenia profilu z kompozytu GRP o grubości ścianki 35 mm w fazie wbudowania zasyпки

Fig. 4. Displacements of a profile made of GRP composite with a wall thickness of 35 mm during the incorporation of the backfill

Największe przemieszczenia profilu z kompozytu GRP o grubości ścianki 45 mm występuje w ostatniej fazie budowy modelu, tj. po montażu konstrukcji symulującej obciążenia stałe od nawierzchni drogowej. W profilu o grubości ścianki 35 mm maksymalne przemieszczenia odnotowano po ułożeniu i zagęszczeniu warstw gruntu do wysokości ok. 88% nominalnej wysokości

powłoki z kompozytu GRP. Natomiast w dalszych fazach budowy modelu, głównie w czasie układania nadsypki, przemieszczenia zniwelowały się i ostatecznie osiągnęły mniejsze wartości niż w przypadku profilu o grubości ścianki 45 mm. Zjawisko to może jednak przebiegać różnie, zależnie od kształtu oraz wymiarów konstrukcji.

W przypadku obu grubości ścianek profili pomiary z tensometrów elektrooporowych w fazie budowy modelu nie wykazały przekroczenia dopuszczalnego zaprojektowanego odkształcenia w kompozycie GRP. Odkształcenia materiału GRP na etapie wbudowania zasyпки są z reguły kilkakrotnie mniejsze od występujących w fazie obciążania modelu.

Wpływ grubości ścianki na przemieszczenie i odkształcenie konstrukcji kompozytowej w czasie obciążania modelu

W przypadku obu badanych konstrukcji największy przyrost przemieszczeń i odkształceń następuje do ok. 10 000 cykli, co wynika głównie z dogęszczenia gruntu i wyrównania lokalnych luzów w konstrukcji (np. w obszarze złączy z uszczelką elastomerową). Przy dalszym obciążeniu wykres przemieszczeń w skali logarytmicznej zbliża się do liniowego. Pewnym zaskoczeniem jest większe przemieszczenie w kierunku pionowym po 500 000 cykli w profilu o grubości ścianki 35 mm (różnica 7,3 mm). Trend przyrostu przemieszczenia jest jednak wyraźnie większy w modelu z konstrukcją o grubości ścianki 35 mm.

Zgodnie z oczekiwaniami, największe odkształcenie materiału GRP zanotowano w punktach pomiarowych zlokalizowanych w szczycie konstrukcji oraz w miejscach o największej krzywiznie łuku profilu (rysunki 5 i 6). Mimo dużej różnicy grubości ścianek obu badanych konstrukcji, wartości odkształceń z tensometrów w odpowiednich miejscach pomiarowych są porównywalne.

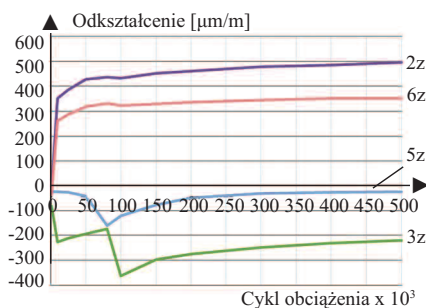
Pomiary odkształceń za pomocą tensometrów prowadzono również w obszarze złącza typu wpust – pióro, uszczelnionego klinową uszczelką gumową. Są one większe od odkształceń zarejestrowanych w obszarze litej ścianki (w środ-

ARBOCEL P – The Power of Innovation

- nieograniczone możliwości regulacji konsystencji,
- łatwe i szybkie mieszanie,
- zagęszczanie i stabilizacja tynków i farb przy jednoczesnej poprawie aplikacji

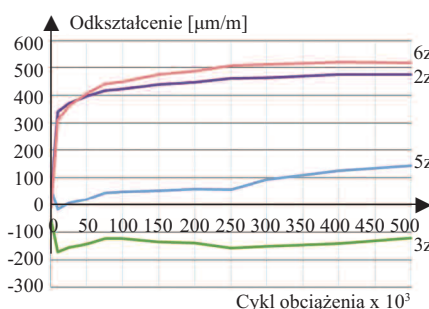


Rettenmaier Polska
Sp. z o.o.
Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B
02-366 Warszawa
mobile +48 600 423 423
Tel + 48 22 608 51 00
e-mail: arbocel@jrs.pl



Rys. 5. Odształcenia materiału GRP (zewnątrznej warstwy e_2) profilu o grubości ścianki 45 mm w czasie badań pod obciążeniem zmiennym

Fig. 5. Deformation of the GRP material (outer layer e_2) of a profile with a wall thickness of 45 mm during tests under variable load



Rys. 6. Odształcenia materiału GRP (zewnątrznej warstwy e_2) profilu o grubości ścianki 35 mm w czasie badań pod obciążeniem zmiennym

Fig. 6. Deformation of the GRP material (outer layer e_2) of a profile with a wall thickness of 35 mm during tests under variable load

ku długości panelu konstrukcji). W żadnym punkcie pomiarowym nie zarejestrowano przekroczenia dopuszczalnego zaprojektowanego odkształcenia materiału.

Wnioski

Analiza wyników zarejestrowanych w czasie badań wykazuje, że **dopuszczalne jest zmniejszenie grubości ścianek konstrukcji gruntowo-powłokowych bez istotnego negatywnego wpływu na stabilność i trwałość konstrukcji, po uprzedniej głębokiej analizie obliczeniowo-projektowej** uwzględniającej m.in. żadaną wielkość i kształt konstrukcji wynikający z warunków, które ta instalacja ma spełnić, wysokość obciążenia nazimem, rodzaj obciążeń komunikacyjnych, poziom wody gruntuwej, rodzaj gruntu w strefie wykopu. Po określeniu tych parametrów oraz kształtu profilu niekołowego i jego wymiarów można przystąpić do obliczenia wymaganej grubości jego ścianki. W celu zapewnienia dużej dokładności obli-

czeń należy posłużyć się metodą elementów skończonych, która daje najbardziej precyzyjny wynik. Obliczenia przeprowadza się z uwzględnieniem obciążeń krótko- i długookresowych.

W przypadku zoptymalizowanych konstrukcji gruntowo-powłokowych z tworzywa GRP o profilu niekołowym szczególnie ważne jest odpowiednie prowadzenie robót ziemnych, przede wszystkim zagęszczenie gruntu w nierównolicznych miejscach oraz niedopuszczanie do nadmiernych deformacji konstrukcji w czasie wbudowywania gruntu.

Literatura

- [1] Amiblu, Flowtite Norway, Folwite Produkt Guide, Sandefjord.
- [2] Amiblu Poland, Flowtite Norway wyniki badań laboratoryjnych na podstawie sprawozdań z badań okresowych.
- [3] Amiblu Technology, Sandefjord. Dokumentacja Know How producenta.
- [4] Jasiński W., R. Walczak. 2018. „Badania modelowe przepustów drogowych z GRP w skali naturalnej”. *Materiały Budowlane* 546 (11): 28 – 30.
- [5] PN-EN 14364:2013-07 Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych do ciśnieniowego i beciśnieniowego odwadniania i kanalizacji – Termoutwardzalne tworzywa sztuczne wzmocnione włóknom szklanym (GRP), na bazie nienasyconej żywicy poliestrowej (UP) – Specyfikacje rur, kształtek i połączeń.
- [6] PN-EN 1796:2013-07 Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych do ciśnieniowego i beciśnieniowego przesyłania wody – Termoutwardzalne tworzywa sztuczne wzmocnione włóknom szklanym (GRP), na bazie nienasyconej żywicy poliestrowej (UP).
- [7] PN-EN 1991-2:2007 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 2: Obciążenia ruchome mostów.
- [8] PN-ISO 25780:2013-05 Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych do ciśnieniowego i beciśnieniowego przesyłania wody, nawadniania, odwadniania, kanalizacji deszczowej i sanitarnej – Systemy z termoutwardzalnych tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknom szklanym (GRP), na bazie nienasyconej żywicy poliestrowej (UP) – Rury z połączeniami elastycznymi przeznaczone do instalowania z wykorzystaniem technik przeciskania.
- [9] PN-ISO 16611:2018-06 Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych do beciśnieniowego odwadniania i kanalizacji – Rury i połączenia o przekroju niekołowym wykonane z termoutwardzalnych tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknom szklanym (GRP), na bazie nienasyconej żywicy poliestrowej (UP) – Wymiary, wymagania i badania.
- [10] PN-EN 1610: 2015-10 Budowa i badania przewodów kanalizacyjnych.
- [11] Sprawozdanie nr 46/17/TW-1 z badań modelowych przepustów z GRP. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Pracownia Mostów i Urządzeń Odwadniająca. Żmigród, listopad 2017.
- [12] Zalecenia projektowe i technologiczne dla podatnych konstrukcji inżynierskich z tworzyw sztucznych. Załącznik do Zarządzenia nr 30 GDD-KiA z 2 listopada 2006 r.

Przyjęto do druku: 13.01.2022 r.