

mgr inż. Jan Biernacki^{1*)}

ORCID: 0000-0002-3573-4763

prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec¹⁾

ORCID: 0000-0001-90825-6343

Researching of reinforcements of masonry arches fragments subjected to compressive force

Badanie wzmocnień fragmentów murowanych łuków poddanych działaniu siły ściskającej

DOI: 10.15199/33.2024.11.03

Abstract. The aim of the presented research was to determine the effect of reinforcement on the behavior of compressed masonry arches. Three research series were tested: unreinforced models and reinforced with a reinforced concrete rib and the FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*) system. In each series, two models were tested. The research was conducted at the Faculty of Civil Engineering of the Silesian University of Technology.

Keywords: historic structures; masonry constructions; reinforcement; ground deformation; arches; vaults.

Streszczenie. Celem prezentowanych badań było określenie wpływu wzmocnienia na zachowanie ściskanych łuków murowanych. Przeprowadzono badania trzech serii modeli: niewzmocnionych oraz wzmocnionych żebrem żelbetowym i systemem FRCM (ang. *Fiber Reinforced Cementitious Matrix*). W każdej serii badano dwa modele. Badania realizowano na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej.

Słowa kluczowe: konstrukcje zabytkowe; konstrukcje murowe; wzmocnianie; deformacje terenu; łuki; sklepienia.

Both in Poland and worldwide, numerous deformations of the terrain are observed, caused by, for example, seismic movements, mountain tremors, or landslide displacements. The consequences of these deformations can be catastrophic, particularly when buildings are located in these areas. Historical structures are particularly vulnerable to the forces that occur during terrain deformations, as they were not designed with specialized solutions aimed at ensuring their safety against the effects of displacements.

While studies on curved masonry structures subjected to axial forces in various loading conditions and on various surface types (beam models, rod models) are widely known, analyses of curved masonry constructions subjected to shear or tensile forces due to displacements at supports are less common. Research on the strengthening of such structures is discussed in references [1 ÷ 5]. However, there are few international publications related to studies on the loading and reinforcement of masonry arch constructions subjected to horizontal forces [6]. This article presents selected studies on the reinforcement of masonry vaults and arches using composites and reinforced concrete, conducted at the Silesian University of Technology.

Genesis of Horizontal Forces

In the case of structures located in areas where ground deformations occur, there is a risk of them being subjected to horizontal forces, which may arise as a result of uneven displacement of supports. This situation often occurs in areas of mountain tectonic activity, where the effects can manifest

Zarówno w Polsce, jak i na świecie obserwuje się liczne deformacje terenu spowodowane np. ruchami sejsmicznymi, uszkodzeniami górniczymi czy przemieszczeniem skarp. Ich skutki mogą być katastrofalne, szczególnie gdy na tych terenach zlokalizowane są budowle. Szczególnie narażone na działanie sił występujących podczas deformacji terenu są konstrukcje historyczne, w których nie przewidziano specjalistycznych rozwiązań projektowych mających na celu ich zabezpieczenie przed skutkami przemieszczeń.

O ile badania zakrzywionych konstrukcji murowanych poddanych obciążeniu siły pionowej w różnych wariantach jej działania i na różnego rodzaju powierzchniach (modele powłokowe, prętowe) są powszechnie znane, to analizy zakrzywionych konstrukcji murowych pod działaniem siły ściskającej lub rozciągającej na skutek przemieszczeń podpór nie są już tak powszechne. W publikacjach [1 ÷ 5] omówiono badania dotyczące sposobów wzmocnienia takich konstrukcji. Niewiele jest natomiast publikacji zagranicznych dotyczących badań pod obciążaniem i wzmocniania łukowych konstrukcji murowych obciążonych siłą poziomą [6]. W artykule przedstawiono wybrane badania dotyczące wzmocnienia murowanych sklepień i łuków za pomocą kompozytów oraz żelbetu, przeprowadzone na Politechnice Śląskiej.

Geneza działania sił poziomych

W przypadku konstrukcji usytuowanych na terenach, gdzie występują deformacje podłoża, istnieje ryzyko ich obciążenia siłą poziomą, która może wystąpić na skutek nierównomiernego przemieszczania podpór. Sytuacja taka ma miejsce często na terenach eksploatacji górniczej, której wpływy mogą objawiać się przez występowanie deformacji ciągłych i nieciągłych. Deformacje ciągłe są niebezpieczne ze względu na występowanie krzywizny w niecce osiadań. Zjawisko to zagraża

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*} Correspondence address: Jan.Biernacki@polsl.pl

as continuous and discontinuous deformations. Continuous deformations are particularly hazardous due to the occurrence of bending in the settlement axes. This phenomenon is particularly concerning for buildings, such as vaulted structures, where the ceiling is often a masonry vault with a large span. During the operation of vaults and arches, compressive forces occur, but it is crucial that the tensile strength of the masonry elements is not exceeded. Masonry structures are particularly susceptible to damage caused by tensile forces, to which masonry is least resistant. The appearance of cracks may indicate the exceeding of the masonry's tensile strength and requires immediate repair. The action of horizontal compressive forces on the vaults can also cause significant damage. The combination of these two forces is especially dangerous [7], particularly in the case of heritage structures under conservation protection. The preservation of buildings in mountainous areas has been discussed in publication [8], which addresses the issue of upper-ground deformations in the context of effective modeling problems and predicting the consequences of deformations.

Reinforcement Methods

There are various methods of strengthening and repairing structures. Among the most modern are composite tapes and meshes. While tapes are more commonly used for reinforcing reinforced concrete structures, primarily due to the necessity of applying them to smooth surfaces, meshes are widely used as surface reinforcements for masonry constructions. The reinforcement can be made using fibers such as carbon (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), glass (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*), or aramid (AFRP – *Aramid Fiber Reinforced Polymer*) [9]. Among the most advanced materials are meshes made from PBO fibers (photo 1) [10], which are the subject of the studies described in the context of the FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*) technology, as well as basalt fibers (BFRP – *Basalt Fiber Reinforced Polymer*), the research on which [11] is being conducted by the University of Kaiserslautern (Germany).

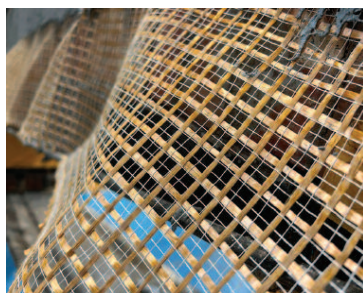


Photo 1. Composite mesh PBO used in the studies

Fot. 1. Siatka kompozytowa PBO zastosowana w badaniach

szczególnie budynkom np. sakralnym, w których strop często stanowi sklepienie murowane o dużej rozpiętości. Podczas pracy sklepień i łuków występują w nich siły ściskające, ale istotne jest, aby wytrzymałość elementów murowanych na ściskanie nie została przekroczona. Konstrukcje murowe są szczególnie podatne na zniszczenie spowodowane siłami rozciągającymi, na które mur jest najmniej odporny. Pojawienie się rys może wskazywać na przekroczenie wytrzymałości muru na rozciąganie i wymaga natychmiastowej naprawy. Działanie poziomej siły ściskającej na sklepienie również może wywołać duże szkody. Kombinacja tych dwóch sił bywa szczególnie niebezpieczna [7] w przypadku obiektów objętych ochroną konserwatorską. Zachowanie budowli na terenach górniczych zostało omówione w publikacji [8], która dotyczy deformacji górniczych w kontekście problemów skutecznego modelowania i przewidywania skutków deformacji.

Metody wzmacniania

Istnieje wiele metod wzmacniania i naprawy konstrukcji. Do najnowocześniejszych należą taśmy i siatki kompozytowe.

O ile taśmy częściej stosowane są do wzmacniania konstrukcji żelbetowych, głównie ze względu na konieczność ich aplikacji na równej powierzchni, to siatki znajdują szerokie zastosowanie jako wzmocnienie powierzchniowe konstrukcji murowanych. Wzmocnienie można wykonać z zastosowaniem włókien: węglowych (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), szklanych (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*) lub aramidowych (AFRP – *Aramid Fiber Reinforced Polymer*) [9]. Do najnowocześniejszych materiałów zalicza się siatki z włókien PBO (fotografia 1) [10], będące przedmiotem opisywanych badań jako składnik technologii FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*) oraz włókna bazaltowe (BFRP – *Basalt Fiber Reinforced Polymer*), których badania [11] prowadzi uniwersytet w Kaiserslautern (Niemcy).

Modele badawcze

W ramach przeprowadzonych badań wykonano dwanaście modeli fragmentów żebrowanych. Sześć z nich poddano działaniu siły ściskającej, a pozostałe zniszczono przez przyłożenie siły rozciągającej. W każdym przypadku siła została przyłożona poziomo. W artykule opisano wyniki pierwszej części badań, polegających na analizie ściskania łuków. Wszystkie modele wykonano z identycznych materiałów. Użyto cegieł ceramicznych klasy 20 oraz zaprawy klasy M5. Na odcinkach przypadkowych umieszczono zbrojenie długości 350 mm i średnicy 8 mm. Schemat zaprojektowano jako wolnopodparty. Konstrukcję murową oparto w stalowych okuciach, przez które przeprowadzono zbrojenie. W ramach pierwszego cyklu badań zbadano sześć łuków. Dwa z nich stanowiły modele referencyjne, dwa wzmocniono w technologii FRCM, a dwa wykonując dodatkowe, częściowo prefabryko-

Research Models

In the course of the conducted studies, two models of masonry arch fragments were created. Six of them were subjected to compressive forces, while the remaining ones were damaged by the application of tensile forces. In each case, the force was applied horizontally. The article presents the results of the first part of the study, which focused on the analysis of arch compression. All models were made from identical materials: ceramic bricks of class 20 and mortar of class M5 were used. Reinforcement with a length of 350 mm and a diameter of 8 mm was placed at the support sections. The design was set as a simply supported beam. The masonry

structure was supported in steel brackets, through which the reinforcement was passed. In the first cycle of tests, six arches were examined. Two of them served as reference models, two were reinforced using FRCM technology, and two were additionally fabricated using partially prefabricated reinforced concrete ribs. Both the first type of reinforcement and the second were combined with the arch.

In the FRCM technology, the first layer of cementitious matrix was applied, the mesh was embedded, and a second

layer of matrix was pulled over it. The entire process was carried out according to the manufacturer's guidelines for the technology. To test the adhesion of the composite meshes to the masonry structure, a pull-off test was performed. The second type of reinforcement involved placing prefabricated concrete blocks on the masonry arch and introducing reinforcement into them, securing the space between the blocks. The use of prefabricated elements improves the reinforcement installation process. This method allows for the acceleration of work, due to the partial prefabrication of reinforcement segments and the easier formwork of fragments to be cast with concrete mix. Additionally, openings in the prefabricated elements facilitate the passage of reinforcement without the need to form spacers or ties, ensuring the proper cover for the reinforcement. The bonding of the reinforced concrete arch with the masonry arch was performed using chemical anchors, i.e., rods glued with epoxy resin to a depth of 150 mm, according to the manufacturer's instructions. Figure 1 shows the design of the test setup with the reference model. Figure 2 presents the arch reinforcement design by bonding with the reinforced concrete, partially prefabricated rib, and Figure 3 illustrates reinforcement using FRCM technology.

wane, żebro żelbetowe. Zarówno pierwszy rodzaj wzmocnienia, jak i drugi zespolono z łukiem. W technologii FRCM nałożono pierwszą warstwę matrycy cementowej, wtopiono siatkę i naciągnięto drugą warstwę matrycy. Cały proces został wykonany zgodnie z wytycznymi producenta technologii. Celem sprawdzenia przyczepności siatek kompozytowych do konstrukcji murowanej wykonano badanie pull off.

Drugi typ wzmocnienia polegał na ustawieniu prefabrykowanych betonowych kostek na murowanym łuku oraz wprowadzeniu do nich zbrojenia

i zabetonowaniu przestrzeni między kostkami. Zastosowanie elementów prefabrykowanych usprawnia proces montażu wzmocnienia. Dzięki tej metodzie możliwe jest przyspieszenie prac ze względu na częściowe wykonanie fragmentów wzmocnienia czy łatwiejsze szalowanie fragmentów do wbudowania mieszanki betonowej. Dodatkowo otwory w elementach prefabrykowanych ułatwiają przeprowadzenie zbrojenia bez konieczności formowania dystansów czy kobyłek celem wykonania prawidłowej otuliny zbrojenia. Zespolenie łuku żelbetowego z łukiem murowanym wykonano za pomocą kotew chemicznych, czyli prętów wklejanych z użyciem żywicy epoksydowej na głębokość 150 mm, zgodnie z instrukcją producenta. Na rysunku 1 pokazano projekt stanowiska badawczego z modelem referencyjnym, na rysunku 2 projekt wzmocnienia łuku przez zespolenie z żelbetowym, częściowo prefabrykowanym żebrum, a na rysunku 3 wzmocnienie w technologii FRCM.

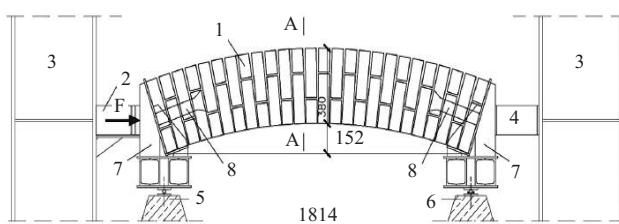


Fig. 1. Diagram of the testing setup without reinforcement (LNS): 1 – research model; 2 – hydraulic actuator; 3 – steel frame; 4 – square tube; 5 – movable hinged support; 6 – non-movable hinged support; 7 – steel fitting; 8 – support reinforcement

Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego bez wzmocnienia (LNS): 1 – model badawczy; 2 – siłownik hydrauliczny; 3 – rama stalowa; 4 – rura o przekroju kwadratowym; 5 – podpora przegubowo przesuwana; 6 – podpora przegubowo nieprzesuwana; 7 – okucie stalowe; 8 – zbrojenie przypodporowe

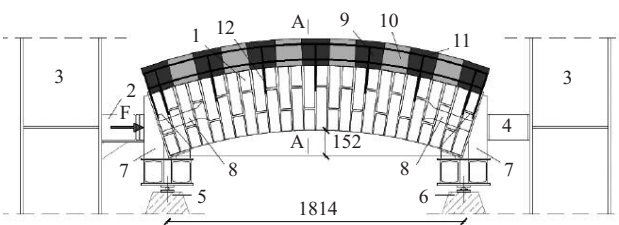


Fig. 2. Diagram of the testing setup with a reinforced arch (LWS) using a reinforced concrete rib: 1 ÷ 8 according to fig. 1; 9 – monolithic reinforcement segment; 10 – prefabricated reinforcement segment; 11 – reinforcement; 12 – chemical anchor

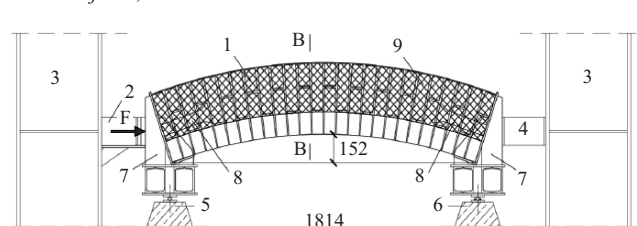


Fig. 3. Diagram of the testing setup with a reinforced arch (LWS) using FRCM: 1 ÷ 8 according to fig. 1; 9 – FRCM reinforcement

Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego z łukiem (LWS) wzmocnionym za pomocą FRCM: 1 ÷ 8 wg rysunku 1; 9 – wzmocnienie FRCM

Testing

The tests were conducted in the Laboratory of the Department of Civil Engineering at the Silesian University of Technology. All models were loaded using a hydraulic actuator

Badania

Badania zostały przeprowadzone w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Wszystkie modele obciążano za pomocą siłownika hydraulicznego o zakresie 900 kN, zamocowanego do stalowej ramy przykręconej do płyty wielkich sił. Badane łuki zostały zablokowane pomiędzy stalowy-

with a range of 900 kN, mounted to a steel frame bolted to a large force plate. The tested arches were locked between steel columns of the frame using the hydraulic actuator and a steel pipe with a square cross-section. The test setup diagram is shown in Figure 2. Both the actuator and the pipe were positioned along the axis of the steel brackets of the arch. The load was applied simultaneously. During the tests, the displacement of the arch at measurement points and the force values were recorded. To monitor displacements, Linear Variable Differential Transformer (LVDT) displacement sensors and a digital image correlation system were used. The tests began with reference models, labeled as Unreinforced Compressed Arch (LNS), followed by Reinforced Compressed Arches (LWS). Photos 2 ÷ 4 illustrate the failure modes of the individual models under laboratory conditions. Photo 2 shows the moment of failure of one of the reference arches. The failure of the lower fragment of the masonry cross-section occurred due to the exceeding of the brick's compressive strength, resulting in the crushing of the masonry element. Photo 3 shows the failure mode of a masonry structure reinforced with an additional reinforced concrete rib due to the loss of adhesion between the reinforcement (rod) and the resin used for bonding the rod. After the loss of adhesion, the masonry element underwent rapid crushing in the compressed zone of the cross-section. The failure of the test specimen reinforced using FRCM technology occurred in a similar manner (Figure 4). The PBO composite fibers took on the tensile force in the upper part of the cross-section. After their rupture, caused by exceeding the strength, rapid failure of the brick occurred in the compressed zone. In all cases, early occurrence of cracks and fractures was observed. Longitudinal cracks appeared in the lower fragment of the arch, while transverse cracks appeared in the tensile zone of the model. Due to the increase in the cross-sectional area in tests LWS-1 and LWS-2, the position of the load axis changed. As a result, longitudinal cracks were observed at a higher level than in the reference test or LWS-3 and LWS-4.

mi słupami rami za pomocą siłownika hydraulicznego oraz stalowej rury o przekroju kwadratowym. Schemat montażu stanowiska przedstawiono na rysunku 2. Zarówno siłownik, jak i rura zostały umiejscowione w osi stalowych okuć łuku. Obciążenie przykładano jednostajnie. Podczas badań rejestrowano przemieszczenia łuku w punktach pomiarowych oraz wartość siły. Do monitoringu przemieszczeń zastosowano czujniki przemieszczeniowe LVDT (ang. *Linear Variable Differential Transformer*) oraz cyfrowy system korelacji obrazów. Badania rozpoczęto od modeli referencyjnych, oznaczonych jako Łuk Niewzmocniony Ściskany (LNS), a następnie Łuków Wzmocnionych Ściskanych (LWS). Na fotografiach 2 ÷ 4 przedstawiono sposób zniszczenia poszczególnych modeli w warunkach laboratoryjnych. Fotografia 2 pokazuje moment zniszczenia jednego z łuków referencyjnych. Zniszczenie dolnego fragmentu przekroju murowanego nastąpiło w wyniku przekroczenia wytrzymałości cegły na ściskanie, a w efekcie zmiążdżenia elementu murowego. Fotografia 3 przedstawia sposób zniszczenia fragmentu konstrukcji murowej wzmocnionej dodatkowym żebrzem żelbetowym na skutek utraty przyczepności pomiędzy zespoleniem (prętem) a żywicą, za pomocą której został wklejony pręt. Po utracie przyczepności nastąpiło gwałtowne zmiążdżenie elementu murowego w strefie ściskanej przekroju. Zniszczenie elementu badawczego wzmocnionego w technologii FRCM przebiegło w podobny sposób (fotografia 4). Włókna kompozytowe PBO przejęły siłę rozciągającą występującą w górnej części przekroju. Po ich zerwaniu na skutek przekroczenia wytrzymałości nastąpiło gwałtowne zniszczenie cegły w strefie ściskanej. W każdym przypadku można było zauważyć wcześniejsze wystąpienie rys oraz pęknięć. Zaobserwowano spękania o charakterze podłużnym w dolnym fragmencie łuku i rysy poprzeczne w strefie rozciąganej modelu. Ze względu na zwiększenie powierzchni przekroju w badaniu LWS-1 i LWS-2 położenie osi obojętnej uległo zmianie. W związku z tym zaobserwowano występowanie pęknięć podłużnych na większej wysokości niż w badaniu referencyjnym czy LWS-3 i LWS-4.



Photo 2. Moment of failure of the unreinforced arch (LNS)

Fot. 2. Moment zniszczenia łuku bez wzmocnienia (LNS)

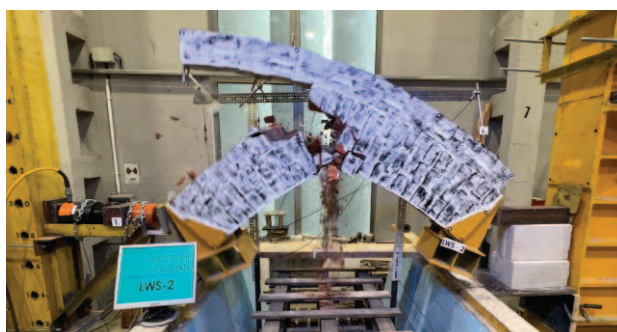


Photo 3. Moment of failure of the arch reinforced with a reinforced concrete rib (LWS)

Fot. 3. Moment zniszczenia łuku wzmocnionego żebrzem żelbetowym (LWS)



Photo 4. Moment of failure of the arch reinforced with FRCM technology (LWS)

Fot. 4. Moment zniszczenia łuku wzmocnionego w technologii FRCM (LWS)

Analysis of Test Results

The results obtained in the tests were used to determine the values of the tensile and crushing forces. In the last column, the maximum values of the crushing forces were averaged. Figures 4 ÷ 9 show the individual arches before failure, along with measurements of the opening of observed cracks. During the first test of the Unreinforced Compressed Arch (LNS-1), the first crack of 0.50 mm in width was observed at the test specimen at a horizontal force of 45.72 kN. The tests continued until the ultimate load-bearing capacity (ULS) was reached. The maximum force was 98.05 kN. The arch could be considered destroyed at the moment of exceeding the

Analiza wyników badań

W tabeli zestawiono uzyskane w badaniach wartości siły rysującej oraz niszczącej. W ostatniej kolumnie uśredniono wartości maksymalne siły niszczącej. Na rysunkach 4 ÷ 9 pokazano poszczególne łuki bezpośrednio przed zniszczeniem wraz z pomiarami rozwarcia zaobserwowanych rys. Podczas pierwszego badania Łuku Niewzmocnionego Ściskanego (LNS-1) pierwszą rysę szerokości 0,50 mm zaobserwowano w zworniku przy sile poziomej o wartości 45,72 kN. Badania prowadzono do momentu utraty stanu granicznego nośności (SGN). Maksymalna siła wyniosła 98,05 kN. Łuk można było uznać za zniszczony w momencie przekroczenia stanu gra-

The results of the study on arches under horizontal compressive force

Wyniki badań łuków przy obciążeniu poziomą siłą ściskającą

Nazwa badania		Siła przy		Średnia wartość siły przy zniszczeniu [kN]
		zarysowaniu [kN]	zniszczeniu [kN]	
Łuk Niewzmocniony Ściskany	LNS-1	45,72	98,05	106,28
	LNS-2	32,82	114,50	
Łuk Wzmocniony Ściskany (żebro żelbetowe)	LWS-1	205,45	227,17	229,04
	LWS-2	199,72	230,91	
Łuk Wzmocniony Ściskany (FRCM)	LWS-3	114,96	140,38	178,46
	LWS-4	167,96	216,53	

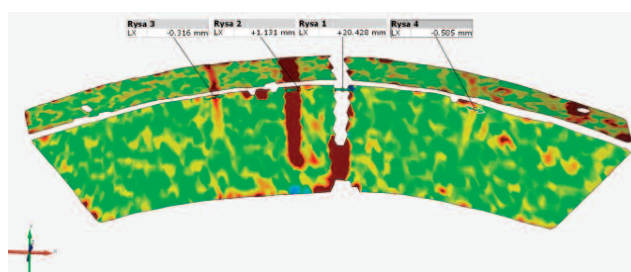


Fig. 4. State of arch LNS-1 just before failure
Rys. 4. Stan łuku LNS-1 bezpośrednio przed zniszczeniem

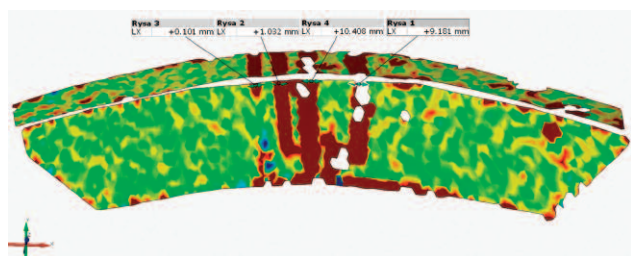


Fig. 5. State of arch LNS-2 just before failure
Rys. 5. Stan łuku LNS-2 bezpośrednio przed zniszczeniem

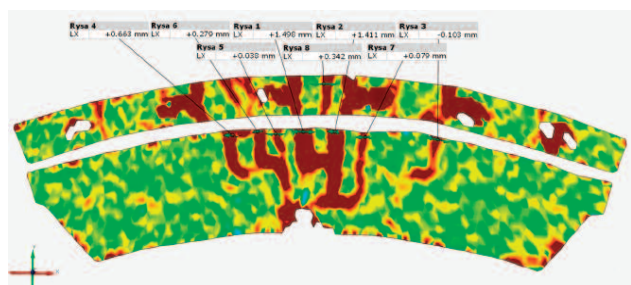


Fig. 6. State of arch LWS-1 just before failure
Rys. 6. Stan łuku LWS-1 bezpośrednio przed zniszczeniem

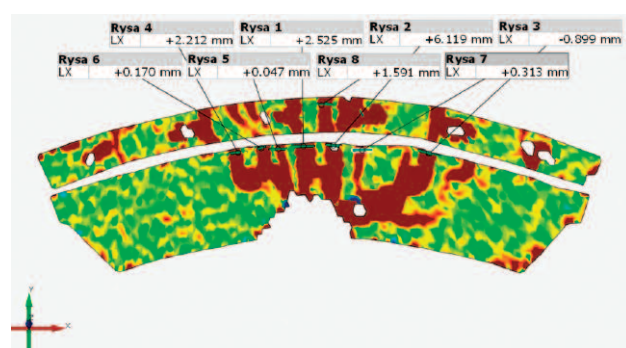


Fig. 7. State of arch LWS-2 just before failure
Rys. 7. Stan łuku LWS-2 bezpośrednio przed zniszczeniem

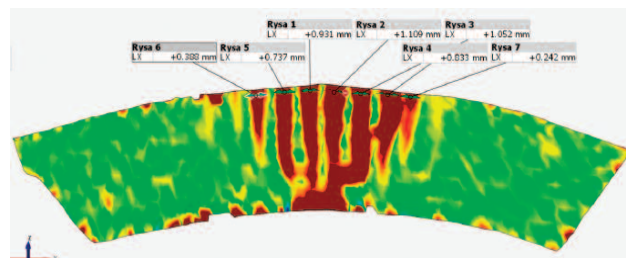


Fig. 8. State of arch LWS-3 just before failure
Rys. 8. Stan łuku LWS-3 bezpośrednio przed zniszczeniem

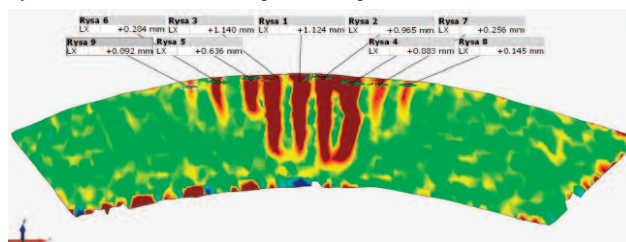


Fig. 9. State of arch LWS-4 just before failure
Rys. 9. Stan łuku LWS-4 bezpośrednio przed zniszczeniem

serviceability limit state (SLS) when the crack opening was excessive. The genesis of cracks and fractures in masonry structures, as well as repair methods, are discussed in publications [12 ÷ 15]. The tests of the LNS-2 arch proceeded similarly, but the tensile force was lower, despite achieving a greater value of the crushing force. The average value of the crushing force from both tests was 106.28 kN. In the tests of the arch reinforced with a reinforced concrete rib (LWS-1 and LWS-2), both the tensile force and the crushing force were similar. The average value of the crushing force was 229.04 kN. In the tests of arches reinforced with composites, the differences in the results obtained were too large.

Conclusions

Based on the tests of reinforced masonry rib fragments, it can be concluded that:

- Reinforcements in the form of a reinforced concrete rib and composite reinforcement using FRCM technology significantly increase the load-bearing capacity of the masonry rib fragment under horizontal compressive forces.
- The increase in the cross-section of the arch due to the addition of the reinforced concrete rib delays the formation of cracks and results in more than a twofold increase in load-bearing capacity.
- The composite reinforcement also indicates an increase in load-bearing capacity, both in the LWS-3 and LWS-4 tests, despite the smaller differences between the test results.
- The tested reinforcement methods effectively strengthen masonry ribs subjected to horizontal compressive forces.

Received: 30.09.2024

Revised: 30.10.2024

Published: 25.11.2024

nicznego użytkowności (SGU), gdy rozwarcie rysy było nadmierne. Aspekt genezy rys i pęknięć w konstrukcji murowej oraz sposoby naprawy opisują publikacje [12 ÷ 15]. Badanie łuku LNS-2 przebiegło podobnie, ale siła rysująca była mniejsza pomimo uzyskania większej wartości siły niszczącej. Średnia wartość siły niszczącej z obu badań wynosi 106,28 kN. W badaniach łuku wzmocnionego za pomocą żebra żelbetowego (LWS-1 i LWS-2) zarówno wartość siły do pierwszego zarysowania, jak i siły niszczącej były zbliżone. Wartość siły niszczącej uśredniono, uzyskując 229,04 kN. W badaniu łuków wzmocnionych kompozytem różnice otrzymanych wyników były zbyt duże.

Wnioski

Na podstawie badań wzmocnionych fragmentów murowanych żeber można uznać, że:

- wzmocnienia w postaci żelbetowego łuku i wzmocnienie kompozytowe w technologii FRCM znacznie zwiększają nośność fragmentu żebra murowanego przy działaniu poziomej siły ściskającej;
- zwiększenie przekroju łuku przez dodanie żebra żelbetowego opóźnia powstanie rysy i powoduje ponaddwukrotny wzrost nośności;
- wzmocnienie kompozytowe również wskazuje na zwiększenie nośności zarówno w badaniu LWS-3, jak i LWS-4 pomimo dużej różnicy w badaniach;
- przebadane sposoby wzmocnień skutecznie wzmacniają żebra murowane poddane działaniu poziomej siły ściskającej.

Podziękowanie

Autorzy dziękują firmie Visbud-Projekt Sp. z o.o. za przekazanie materiałów do badań.

Artykuł wpłynął do redakcji: 30.09.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 30.10.2024 r.

Opublikowano: 25.11.2024 r.

Literature

- [1] Nowak R, Orłowicz R, Bezapalov W. Badanie ceglanych sklepień koszowych. *Przegląd Budowlany*. 2019; 3: 19 – 21.
- [2] Bednarz Ł. Metody Wzmacniania Zabytkowych, Zakrzywionych Konstrukcji Ceglanych. *Wiadomości Konserwatorskie*. 2003; 14: 34 – 42.
- [3] Bednarz Ł. Praca Statyczna Zabytkowych, Zakrzywionych Konstrukcji Ceglanych, Poddanych Zabiegom Naprawy i Wzmacniania. Praca Doktorska. Politechnika Wroclawska. 2008.
- [4] Bednarz Ł, Górski A, Jasieńko J, Rusiński E. Simulations and Analyses of Arched Brick Structures. *Automation in Construction*. 2011; 20 (7): 741 – 754.
- [5] Gołębiewski M. Badania eksperymentalne i analiza numeryczna sklepień ceglanych. Wzmocnienia sklepień z wykorzystaniem struktury tensegrity. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska. 2022; 54 – 57.
- [6] Milani G, Bucchi, A. Kinematic FE Homogenized Limit Analysis Model for Masonry Curved Structures Strengthened by near Surface Mounted FRP Bars. *Composite Structures*. 2010; 93 (1): 239 – 258.
- [7] Drobiec Ł. Przyczyny awarii i katastrof obiektów zabytkowych. XXX Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane. 2022; 33 – 52.
- [8] Cińcio A, Fedorowicz L, Fedorowicz J, Mrozek D. Zasady budowy modeli numerycznych w obliczeniach wpływu eksploatacji górniczej na bu-

dowle. III Konferencja Obiekty Budowlane na Terenach Górniczych. 2018; 1 – 24.

[9] Biernacki J, Drobiec Ł. Metodyka wzmacniania murowanych sklepień. *Izolacje*. 2022; 3: 36 – 42.

[10] Biernacki J, Drobiec Ł. Wzmacnianie konstrukcji murowych przy pomocy siatek kompozytowych PBO. *Izolacje*. 2023; 5: 2 – 6.

[11] Grzesiak S, Schultz-Cornelius M, Pahn M. Experimental and analytical evaluation of externally bonded BFRP and CFRP strips on the load-bearing behaviour of reinforced concrete structures using distributed fibre optic sensing. *Construction and Building Materials*. 2023; Article 132452, 1-14.

[12] Ciesielski R. O pomiarze, opisie i interpretacji rys w konstrukcjach murowych – wskazówki instrukcyjne. *Przegląd Budowlany*. 1987; 11: 481 – 485.

[13] Orłowicz R, Małyszko L. Wady i usterki ścian ceramicznych. *Przegląd Budowlany*. 2002; 2: 30 – 33.

[14] Bednarz Ł. Metody wzmacniania zabytkowych, zakrzywionych konstrukcji ceglanych. *Wiadomości Konserwatorskie*. 2003; 14: 34 – 42.

[15] Grzymski F, Musiał M, Ombres L, Marcinczak D, Trapko T, Pazdan M. Potencjał wzmocnień kompozytowych PBO-FRCM w zabytkowych konstrukcjach z betonu. *Wiadomości Konserwatorskie*. 2022; 71: 137 – 150.