

PhD. Eng. Wiesław Bereza¹⁾
ORCID: 0000-0003-2670-2599

Deformation of the wall of the apse of the church loaded by an unstable buttress

Odkształcenie ściany absydy kościoła obciążonej niestabilną przyporą

DOI: 10.15199/33.2025.01.03

Abstract. This article describes the effects that the unstable foundation of a secondary buttress has had on the historic church. The consideration particularly concerns the walls of the apse on which the analysed buttress „was suspended”. The numerical analysis of the work of the walls of the apse and the piercing vault proved to be identical to the inventory of these damages made in reality. This made it possible to propose and carry out further tests, on the basis of which it was possible to determine the working parameters of the object. As a consequence of the reconnaissance and computational analysis carried out, a repair programme was proposed. This programme was adapted to the historic nature of the building.

Keywords: buttress; historic objects; reinforcement; repairing a monument.

Streszczenie. W artykule opisano skutki, jakie w przypadku zabytkowego kościoła wywołało niestabilne posadowienie wtórnie dostawionej przypory. Rozważanie dotyczy przede wszystkim ścian absydy, na której analizowana przypora „została zawieszona”. Analiza numeryczna pracy ścian absydy i przekrywającego sklepienia okazała się tożsama z inwentaryzacją tych uszkodzeń sporządzonych w rzeczywistości. Pozwoliło to zaproponować i przeprowadzić dalsze badania, na podstawie których możliwe było określenie parametrów pracy obiektu. W konsekwencji przeprowadzonego rozpoznania i analizy obliczeniowej zaproponowano program naprawy dostosowany do zabytkowego charakteru obiektu.

Słowa kluczowe: przypora; obiekty zabytkowe; wzmocnienie; naprawa zabytku.

In the Church of the Assumption of the Blessed Virgin Mary in Szczyrzyc (Photo 1), a lot of many cracks and splits had been observed on the walls and vault for a number of years (Fig. 1). This was a cause for concern,

as the church is a listed building and there are rich polychromes in the area of the damaged walls and vaults (Photo 2). The described church is a building in the complex of monastery buildings in Szczyrzyc, built between 1620 and 1644, rebuilt in the 18th and 19th centuries, and later partly neglected [1, 2]. It is listed on the National Register of Historic Places.

The walls of the described church were built as massive masonry elements. In terms of the original foundation based on a single-nave layout with two chapels in the arms of

W kościele pw. Wniebowzięcia NMP w Szczyrzycu (fotografia 1) obserwowano od wielu lat liczne spękania i rozspojenia na ścianach i sklepieniu (rysunek 1). Budziło to zaniepokojenie, gdyż kościół jest obiektem

zabytkowym, a w obszarze uszkodzonych ścian i sklepień znajdują się bogate polichromie (fotografia 2). Opisany kościół to obiekt w zespole budynków klasztornych w Szczyrzycu, wybudowany w latach 1620 – 1644, przebudowany w XVIII i XIX wieku, później częściowo zaniedbany [1, 2]. Jest on wpisany do Krajowego Rejestru Zabytków.

Ściany kościoła zbudowano jako masywne elementy murowe. W przypadku pierwotnego założenia, opartego na układzie jednonawowym z dwoma kaplicami w ramionach transeptu i wydłużonym prezbiterium, posiadają one konstrukcję kamienną. Późniejsze zmiany zrealizowano w postaci konstrukcji z cegły pełnej, ale pozosta-



Photo 1. General view of the monastery in Szczyrzyc with the church in the foreground
Fot. 1. Widok ogólny założenia klasztornego w Szczyrzycu z kościołem na pierwszym planie

¹⁾ AGH University of Krakow Faculty of Civil Engineering and Resource Management; bereza@agh.edu.pl

the transept and an elongated chancel, they have a stone construction. Later alterations were already realised as a solid brick construction, however, leaving numerous stone relics built into this layout [2]. The pointed stone portals, for example, have survived to this day. The walls were plastered with lime plaster. The floors were made of stone.

The foundation of the church walls was made as a direct stone foundation with a lime-sand mortar, partly lime and clay. According to archaeological investigations, the foundation depth of the walls is at least 2.5 m ppt [3]. Behind the foundation of the church in former times there were breeding ponds, which were neglected and buried over time (most probably as a result of the dissolution of the monastery) [1].

Maintaining the proper technical condition of the church walls and vaults is particularly important because of the Baroque polychromes on them (Photo 2). Further damage to them would be a major conservation loss. The conservation team already wanted to carry out conservation work. However, it was realised that the cause of the damage had to be recognised and eliminated before the effects of the damage could be eliminated.



Photo 2. Interior of the church with polychromes
Fot. 2. Wnętrze kościoła z polichromiami

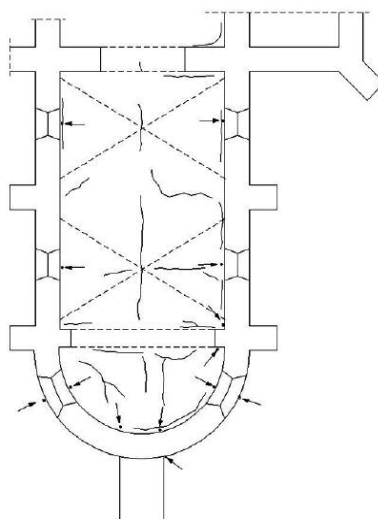


Fig. 1. Location of damage in the form of vertical and horizontal cracks

Rys. 1. Lokalizacja uszkodzeń w postaci spękań pionowych i poziomych

wiono liczne relikty kamienne wbudowane w ten układ [2]. Do dziś zachowały się np. ostrołukowe kamienne portale. Ściany otynkowano tynkiem wapiennym, a posadzki wykonano jako kamienne.

Posadowienie ścian kościoła zrealizowano jako bezpośrednie na podmurówce z kamienia łamanego na zaprawie wapienno-piaskowej, częściowo wapienno-glinianej. Z prowadzonych badań archeologicznych wynika, że głębokość posadowienia ścian wynosi co najmniej 2,5 m ppt [3]. W dawnych czasach za budynkiem kościoła znajdowały się stawy hodowlane, które z biegiem czasu (najprawdopodobniej w wyniku kasaty klasztoru) zostały zaniedbane i zasypane [1].

Zachowanie właściwego stanu technicznego ścian i sklepień kościoła jest szczególnie ważne ze względu na znajdujące się na nich barokowe polichromie (fotografia 2). Dalsze uszkodzenie ich byłoby dużą stratą. Zespół konserwatorów chciał już obecnie realizować prace konserwatorskie. Zrozumiano jednak, że przed zlikwidowaniem skutków uszkodzeń należy rozpoznać i wyeliminować ich przyczynę.

Description of the damages

In the Church of the Assumption of the Blessed Virgin Mary in Szczyrzyc, the walls and vaults in the area of the apse closing the presbytery were damaged. The layout of the cracks and fissures is presented in the form of an in situ inventory diagram (Fig. 1) [3, 4]. These are cracks and fissures of variable dilation – from about 1.0 mm to 12 mm, having a mainly longitudinal orientation towards the apse and its closure. The damage found (Photo 3) visible on the surface of the plaster within the apse and the part adjacent to it is damage that is not due to improperly executed plaster, but mainly to the work of the structure of the building. Moving further towards the centre of the nave, the width of the cracks decreases considerably and their layout becomes typical of a historic building. The layout of the inventoried damage is significantly disturbed by past attempts at repair work using various technologies.

Opis uszkodzeń

W kościele pw. Wniebowzięcia NMP w Szczyrzycu uszkodzeniu uległy ściany oraz sklepienia w rejonie absydy zamykającej prezbiterium. Układ spękań i zarysowań przedstawiono w postaci schematu inwentaryzacji in situ (rysunek 1) [3, 4]. Są to rysy i spękania o zmiennej rozwarości – od ok. 1,0 do 12 mm, ukierunkowane głównie podłużnie w stronę absydy i jej zamknięcia. Stwierdzone uszkodzenia (fotografia 3) widoczne na powierzchni tynku w obrębie absydy i części do niej przyległej nie wynikają z niewłaściwie wykonanych tynków, ale przede wszystkim z pracy konstrukcji obiektu. Idąc dalej w kierunku środka nawy głównej, szerokość rys znacznie się zmniejsza, a ich układ staje się typowy dla obiektu zabytkowego. Układ inwentaryzowanych uszkodzeń w znacznym stopniu jest zaburzony dokonywanymi w przeszłości próbami prac naprawczych z wykorzystaniem różnych technologii.

The visual inspection shows that the crack formation process is still active (the cracks are dynamically increasing in extent, although not in direction). It should be mentioned that no factors altering the working conditions have been observed in the vicinity of the church in recent years (planting or felling of trees, construction of infrastructure, attempts to regulate water relations).

Linear displacement sensors (scratchmeters) operating online were applied to some of the existing scratches [4]. These confirmed dynamic, albeit slow, damage changes. They varied by up to $\pm 14\%$. The sensors also made it possible to observe the state of preservation of the masonry, which was largely dependent on atmospheric factors, mainly temperature.



Photo 3. Example of damage to the part above the window

Fot. 3. Przykład uszkodzenia części nadprozowej

Przeprowadzone oględziny wskazują, iż proces powstawania rys jest cały czas aktywny (rysy w sposób dynamiczny powiększają swój zakres, natomiast nie kierunku). Należy wspomnieć, iż na przestrzeni ostatnich lat w sąsiedztwie kościoła nie zaobserwowano czynników zmieniających warunki pracy konstrukcji kościoła (nasadzenia lub wycinki drzew, budowa infrastruktury, próby regulacji stosunków wodnych).

Na część istniejących zarysowań nałożono czujniki przemieszczeń liniowych (rysomierze) pracujące w trybie online [4]. Potwierdzają one dynamiczne, choć powolne zmiany uszkodzeń, nawet o $\pm 14\%$. Czujniki pozwoliły również obserwować stan zachowania muru, który w dużej mierze był uzależniony od czynników atmosferycznych, w tym przede wszystkim od temperatury.

Analysis and investigation of the causes of damage

The identification of the causes of the damage that was inventoried in the interior of the church was made more difficult by the fact that the walls of the church façade had recently been painted, and possible traces of improper work had been partially ‘covered up’ (at least temporarily). An inventory of the course of cracks visible on the inner surface of the walls (Fig. 1), however, made it possible from the outset to put forward the assumption that the cause of this damage lies within the apse itself. GPR surveys and tachymetric measurements of the nave did not show any anomaly that could have influenced this behaviour of the building [3], mainly excessive or uneven subsidence.

Masonry structures, particularly in historic buildings, are only adapted to carry compressive stresses [5]. Their strength can be variable [6, 7] which is also shown in the results presented in Fig. 2. The masonry's lack of resistance to tensile stresses is mainly the result of the lime mortars used [6]. In addition, the thickness of the joints, up to 26 mm, contributes to this in the object described. The occurrence of tensile stresses due to bending or stretching of the masonry building elements therefore leads to cracks or scratches with a pattern dependent on the working pattern. As part of a further analysis of the cause of damage to the church, a computational model of the apse together with adjacent elements was built (Fig. 3). The calculations were restricted to this extent of the building, as the damage inventory clearly indicated that the cause of the damage must be in this area. There was also no excessive deformation or cracking of the stone floor, which ruled out unstable masonry foundations of the church

Analiza i badanie przyczyn uszkodzeń

Rozpoznanie przyczyn uszkodzeń, jakie zinwentaryzowano we wnętrzu kościoła, utrudniał fakt, że niedawno ściany elewacji pomalowano i ewentualne ślady po nieprawidłowej pracy zostały częściowo „zasłonięte” (przynajmniej tymczasowo). Inwentaryzacja przebiegu spękań widocznych na wewnętrznej powierzchni ścian (rysunek 1) dała podstawę do postawienia tezy, że przyczyna tych uszkodzeń leży w obrębie absydy. Badania georadarowe oraz pomiary tachymetryczne nawy głównej nie wykazywały żadnej anomalii, która mogłaby mieć wpływ na takie zachowanie obiektu [3], w tym głównie nadmierne lub nierównomierne osiadanie.

Konstrukcje murowe, szczególnie w obiektach zabytkowych, są dostosowane jedynie do przenoszenia naprężeń ściskających [5]. Ich wytrzymałość może być zmienna [6, 7], co przedstawiają również wyniki na rysunku 2. Brak wytrzymałości muru na naprężenia rozciągające, to przede wszystkim rezultat stosowanych zapraw wapiennych [6]. Dodatkowo w opisywanym

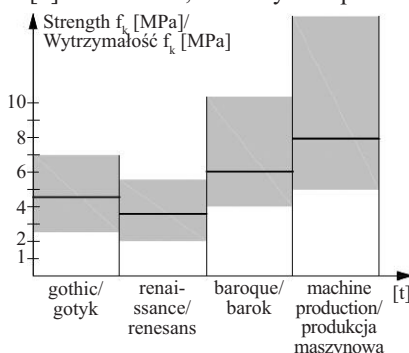


Fig. 2. The results of the compressive strength tests of historic bricks conducted at the Faculty of Architecture of the Cracow University of Technology

Rys. 2. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie cegły historycznej prowadzonych na Wydziale Architektury Politechniki Krakowskiej

obiekcie przyczynia się do tego grubość spoin, sięgająca nawet 26 mm. Pojawienie się naprężeń rozciągających, na skutek zginania lub rozciągania murowych elementów budynku, prowadzi zatem do powstania spękań lub zarysowań o układzie uzależnionym od schematu ich pracy. W ramach dalszej analizy przyczyn uszkodzeń kościoła zbudowano model obliczeniowy absydy wraz z elementami przylegającymi (rysunek 3). Obliczenia ograniczono do tego obszaru obiektu, gdyż inwentaryzacja uszkodzeń jednoznacznie wskazywała, że ich przyczyna musi się tam znajdować. Nie stwierdzono również nadmiernej deformacji lub spękania posadzki kamiennej, co wykluczyło niestabilną pracę fundamentów

structure [3]. The apse model was loaded with several loading schemes that could generate at least an approximation of damage of the structure due to tensile stresses (Fig. 3b, 3c, 3d). These schemes were modified for different degrees of strength and elasticity of the historic masonry. The parameters used here are those from the literature [6] and the results of long-term research into the compressive strength of historic bricks, as carried out at the Department of Building Structures of the Faculty of Architecture of the Cracow University of Technology (Fig. 2)

Solving the numerical problem in the assumed scheme is

not straightforward. The appearance of tensile stresses in the model of the masonry structure generates its cracking and thus discontinuity of substance. This should be taken into account by the finite element used for the FEM analysis or it should generate each time the model is changed. This is because the occurrence of cracking in the masonry structure due to cracking [8] changes its working pattern. This was the greatest difficulty in the analysis carried out.

The calculation examples presented allowed the cause of the failure to be identified as a force load or displacement forcing within the buttress. The geotechnical excavation carried out confirmed this assumption [3]. It was found that the buttress attached to the wall of the apse is founded relatively shallow – at a depth of about 1.5 m ppt, compared to the foundation of the apse itself, which is founded at a depth of at least 2.5 m ppt. In addition, the buttress itself (Photo 4) as a brick masonry structure is rigidly tied to the stone and ceramic wall of the apse. In the author's opinion, this resulted in the working pattern of the buttress as eccentrically suspended from the apse wall (Fig. 4).

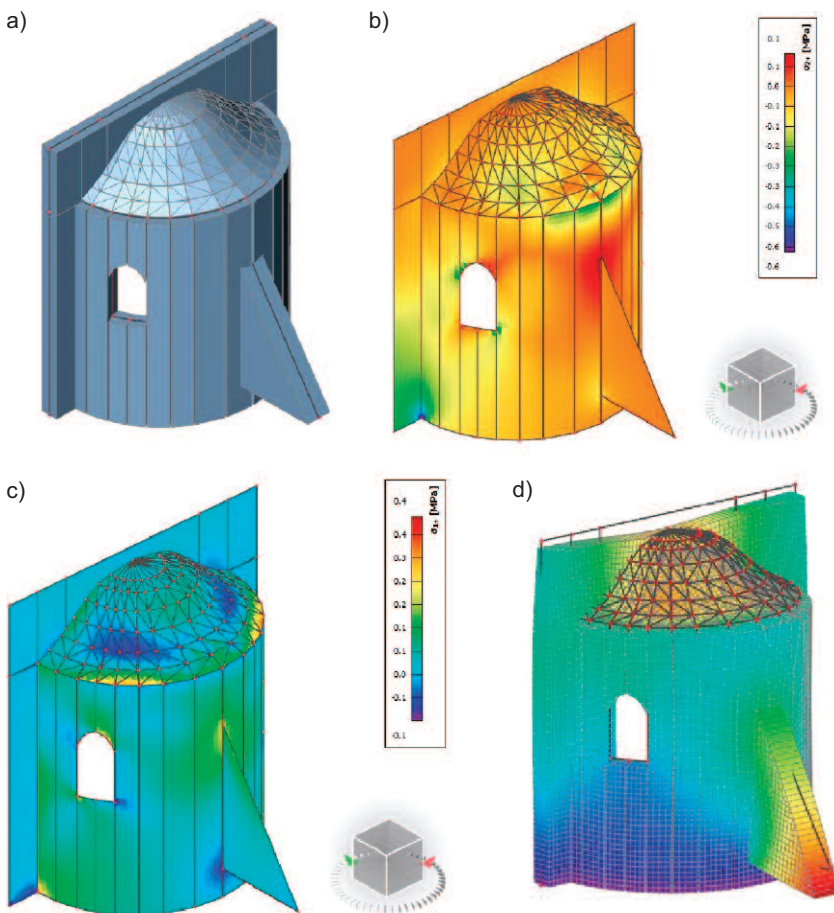


Fig. 3. Examples of analysis of work of apse, buttress and vault walls: a) model; b) tensile stresses; c) shear stresses; d) vertical displacements

Rys. 3. Przykłady analizy pracy ścian absydy, przypory i sklepienia: a) model; b) naprężenia rozciągające; c) naprężenia ścinające; d) przemieszczenia pionowe

Pojawienie się naprężeń rozciągających w modelu konstrukcji murowanej generuje jej spękanie, a tym samym brak ciągłości substancji. Powinien to uwzględnić zastosowany element skończony do analizy MES lub powinno to generować każdorazową zmianę modelu. Wystąpienie zarysowania konstrukcji murowej na skutek spękania [8] zmienia bowiem jej schemat pracy. Było to największe utrudnienie w przeprowadzonej analizie.

Przedstawione przykłady obliczeń pozwoliły na stwierdzenie, że przyczynami uszkodzeń było obciążenie w postaci siły lub wymuszenie przemieszczenia w obrębie przypory, co potwierdziła wykonana odkrywka geotechniczna [3]. Uznano, że przypora dostawiona do ściany absydy posadowiona jest dosyć płytko (na głębokości ok. 1,5 m ppt), w stosunku do samej absydy, która posadowiona jest na głębokości co najmniej 2,5 m ppt. Dodatkowo przypora (fotografia 4), jako konstrukcja murowa z cegły, jest sztywno przewiązana z kamienno-ceramiczną ścianą absydy. W mojej opinii spowodowało to powstanie schematu pracy przypory, jako zawieszonej mimośrodowo na ścianie absydy (rysunek 4).



Photo 4. View of the buttress closing the apse

Fot. 4. Widok przypory zamykającej absydę

kościół [3]. Model absydy obciążono kilkoma schematami obciążeń, które mogłyby generować, chociaż w przybliżonym stopniu, powstawanie uszkodzeń konstrukcji na skutek naprężeń rozciągających (rysunki 3b, c i d). Schematy te modyfikowano w przypadku różnych stopni wytrzymałości i sprężystości muru zabytkowego. Posłużono się parametrami z literatury [6] oraz wynikami wieloletnich badań wytrzymałości na ściskanie cegły historycznej, jakie prowadzono w Zakładzie Konstrukcji Budowlanych Wydziału Architektury Politechniki Krakowskiej (rysunek 2).

Rozwiązanie problemu numerycznego w założonym schemacie nie jest proste.

The buttress was founded on fill soils, which were in the vicinity of backfilled former farm ponds. The parameters of the weak subsoil [9] caused the buttress to systematically settle due to rising groundwater levels. This was caused not only by the top layer of uncontrolled secondary embankments consisting of dusty clayey sand, brick chunks, rubble, but also by the underlying soft-plastic lens containing silty clay. These conditions are in complete contrast to the stable, deeper foundation of the apse and the whole church realised on a layer of semi-consolidated siltstone. The foundation of the church is a foundation that meets all the conditions of ultimate and serviceability limit states, the foundation of the buttress does not. The high weight of the buttress (approximately 180 kN) eccentrically suspended from the apse wall led to bending of the apse wall, which transferred to stretching of the vault and the walls in the part of the arched lintels above the windows. As a further consequence, the flexed walls of the apse cracked, as did the stretched brick vault.

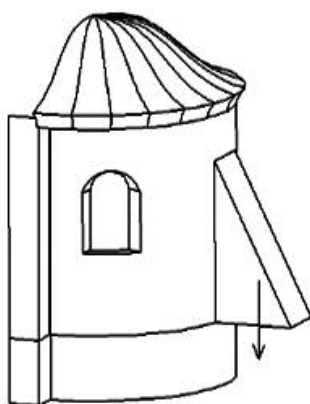


Fig. 4. Diagnosed working pattern
Rys. 4. Zdiagnozowany schemat pracy

Przypora posadowiona została na gruntach zasypowych, będących w sąsiedztwie zasypanych dawnych stawów hodowlanych. Parametry słabego podłoża gruntowego [9] spowodowały, że na skutek podniesienia poziomu wody gruntowej przypora systematycznie osiadała. Przyczyniała się do tego nie tylko wierzchnia warstwa niekontrolowanych wtórnych nasypów, złożonych z piasku gliniastego, pyłu, kawałków cegły i gruzu, ale również zalegająca poniżej soczewka miękkoplastyczna zawierająca glinę pylastą. Warunki te są całkowicie odmienne od stabilnego, głębokiego posadowienia absydy i całego kościoła zrealizowanego na warstwie półzwytych łożupków. Posadowienie kościoła spełnia wszelkie warunki stanów granicznych nośności i użyteczności, natomiast posadowienie przypory – nie. Duży ciężar przypory (ok. 180 kN), zawieszony mimośrodowo na ścianie absydy, doprowadzał do jej zginania, co przeniosło się na rozciąganie sklepienia oraz ścian w części nadproży łukowych nad oknami. W dalszej konsekwencji spękanu uległy zginane ściany absydy, jak również rozciągane sklepienie ceglane.

Summary

The re-installed buttress behind the apse in the Church of the Assumption of the Blessed Virgin Mary in Szczrzyce turned out to be an element that did not stabilise the structure, but actually threatened it. It was difficult to assume at the outset that an element associated with safety would cause a different effect. The reasons for this were as follows:

- the buttress was founded on weak soil that could not take its weight of approximately $P = 180$ kN, causing the buttress to settle;
- the buttress was tied to the stone wall of the apse, causing these elements to fuse together and ensure that they worked together; the stone wall of the apse thus began to work as a support for the suspended buttress;
- the weight of the eccentrically suspended buttress caused the surface of the apse wall to bend, deforming it and further transferring tensile stresses to the rest of the walls and the apse vault;
- the lack of flexural strength of the masonry structure [8] caused it to scratch.

In this situation, it was recommended to urgently relieve the pressure on the apse wall by supporting the buttress to the level of stable, load-bearing native soil. The proposed technical solution was chosen to be effective, but at the same time not to pose a threat to the historic character of the building and the adjacent archaeologically protected environment. It was recommended that the buttress foundation be stabilised and that the system be brought to a scheme in which the weight of the buttress is transferred directly to the ground substrate via micro piles (Fig. 5). The use of perforated steel pipes for the construction of the micro piles made it possible to ensure their continuity despite the relatively high water table and to

Wnioski

Dostawiona wtórnie przypora za absydą w kościele pw. Wniebowzięcia NMP w Szczrzycu okazała się elementem, który nie stabilizował konstrukcji, lecz wręcz jej zagrażał. Trudno było na początku przypuszczać, że element kojarzony z bezpieczeństwem będzie powodował odmienne działanie. Przyczyną tego były następujące:

- przypora została posadowiona na słabym gruncie, który nie był w stanie przejąć jej ciężaru wynoszącego ok. $P = 180$ kN, co powodowało osiadanie przypory;
- przypora została przewiązana z kamienną ścianą absydy, powodując zespolenie tych elementów i zapewniając ich wspólną pracę; ściana kamienna absydy zaczęła więc pracować jako podpora zawieszanej przypory;
- ciężar przypory zawieszony mimośrodowo spowodował zginanie powierzchni ściany absydy, jej odkształcenie i dalsze przeniesienie naprężeń rozciągających na pozostałą część ścian i sklepienie absydy;
- brak wytrzymałości na zginanie konstrukcji murej [8] spowodował jej zarysowanie.

W zaistniałej sytuacji zalecono pilne odciążenie muru absydy przez podparcie przypory do poziomu stabilnego, nośnego gruntu rodzimego. Zaproponowane rozwiązanie techniczne dobrano tak, aby było skuteczne, ale jednocześnie nie stwarzało zagrożenia dla zabytkowego charakteru budynku i przyległego otoczenia chronionego archeologicznie. Zalecono ustabilizowanie posadowienia przypory i doprowadzenie układu do schematu, w którym ciężar przypory jest przenoszony bezpośrednio na podłoże gruntowe za pośrednictwem mikropali (rysunek 5). Użycie stalowych rur perforowanych do wykonania mikropali pozwoliło na zapewnienie ich ciągłości pomimo występującego stosunkowo wysoko poziomu wody gruntowej oraz reali-

carry out extensive injection in the masonry zone of the buttress. The trestle arrangement of the micropiles, on the other hand, ensured the elimination of uneven stress distribution, e.g. generating bending. This made it possible to eliminate eccentric forces creating destruction of the above-ground part of the monument.

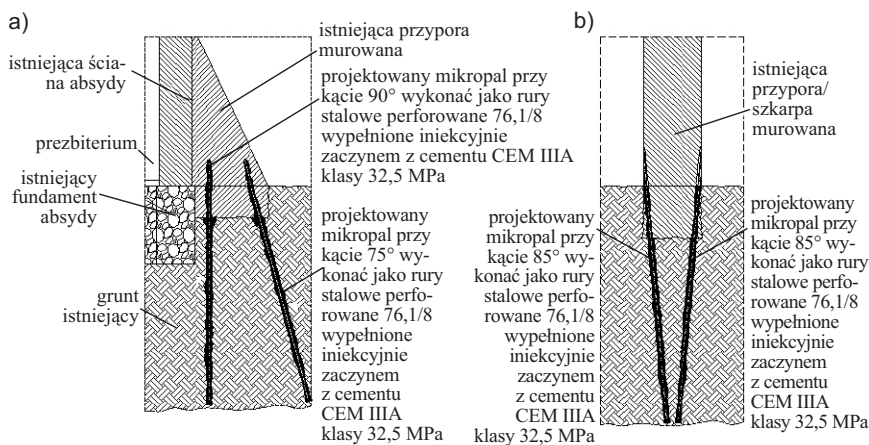


Fig. 5. Buttress foundation reinforcement: a) longitudinal section, b) cross-section

Rys. 5. Sposób wzmocnienia posadowienia przypory: a) przekrój podłużny; b) przekrój poprzeczny

The repair of the masonry of the apse and the vault and the execution of the conservation work programme for the old frescoes were only possible after the buttress was stabilised and the structure structurally pinned down, which was done with CFRP carbon fibre composite tapes. All cracks were filled with low-pressure injection using micro-cement modified grout. This avoided the insertion of spiral steel bars in many locations, which were only used locally in the trestle system on the external side.

Photo author

Received: 21.10.2024
Revised: 02.12.2024
Published: 24.01.2025 r.

Naprawa muru absydy i sklepienia oraz wykonanie programu prac konserwatorskich starych fresków były możliwe dopiero po ustabilizowaniu przypory i spięciu konstrukcyjnym obiektu, co wykonano za pomocą taśm kompozytowych z włókna węglowego CFRP. Wszystkie spękania wypełniono metodą iniekcji niskociśnieniowej z użyciem modyfikowanego zaczynu z mikrocementu. Pozwoliło to w wielu lokalizacjach uniknąć wklejania spiralnych prętów stalowych, które stosowano jedynie lokalnie w układzie kozłowym od strony zewnętrznej.

Fot. autor

Artykuł wpłynął do redakcji: 21.10.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.12.2024 r.
Opublikowano: 24.01.2025 r.

Literature

- [1] Marszałska JM. Opactwo cystersów w Szczyrzycu od XIII do końca XX wieku. Dzieje, gospodarka, kultura, Kraków, 2011.
- [2] Morajko K. Początki fundacji klasztoru Cystersów w Szczyrzycu, Kraków: Wydawnictwo Avalon T. Janowski, 2008.
- [3] Bereza B, Bielecki M. Ekspertyza stanu technicznego dla Remont kościoła p.w. NMP w opactwie o.o. Cystersów w Szczyrzycu polegający na zabezpieczeniu oraz naprawie ścian absydy kościoła w Szczyrzycu, materiały KB-Projekty Konstrukcyjne Sp. z o.o., Kraków, 2023.
- [4] Runkiewicz L. Diagnostyka obiektów budowlanych. Zasady wykonywania ekspertyz. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2022.

- [5] Borusiewicz W. Konserwacja zabytków budownictwa murowego, Arkady, Warszawa 1985.
- [6] Matysek P, Witkowski M. Badania wytrzymałości i odkształcalności XIX-wiecznych murów ceglanych. XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna – Awarie Budowlane 2013.
- [7] Matysek P. Identyfikacja wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2014.
- [8] PN-EN 1996-1-1:2009 Projektowanie konstrukcji murowych – Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.
- [9] Wiłun Z. Zarys geotechniki: podręcznik akademicki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2019.