

dr inż. Rafał Nowak^{1)*}

prof. dr hab. inż. Romuald Orłowicz¹⁾

ORCID: 0000-0001-6867-4050

Wpływ stanu technicznego muru na nośność zabytkowego łuku w Sankt Petersburgu

Influence of masonry technical state on arched structures in Sankt Petersburg

DOI: 10.15199/33.2019.05.05

Streszczenie. Przeanalizowano współpracę murowych łuków i ścian, które mają wpływ na odciążenia łuków. Uzyskano zależności maksymalnych naprężeń w łuku od modułu sprężystości usytuowanego nad łukiem muru, za pomocą którego modelowano utratę jego sztywności z uwagi na zużycie techniczne. Ustalono, że przy zmniejszeniu modułu sprężystości do 5 – 10% jego początkowej wartości występuje znaczna zmiana stanu naprężeń i odkształceń łuku.

Słowa kluczowe: łuki murowe; ściany murowe; modele obliczeniowe.

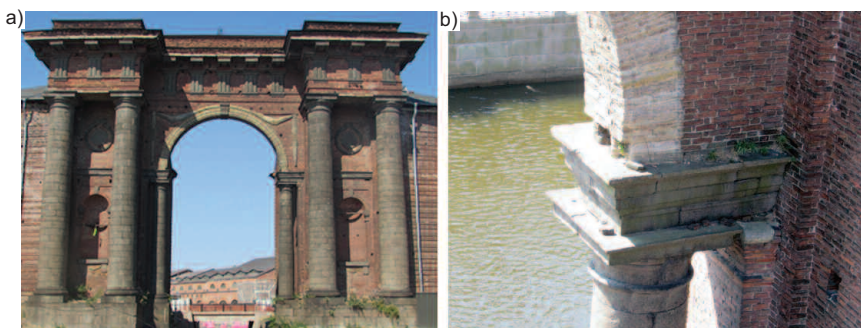
Abstract. The paper analyzes the combined action of stone arches and walls, which exert a unloading effect on the arches. The dependences of the maximum acting stresses in the arch on the modulus of elasticity of the overlying masonry were constructed, reflecting the behavior of the damaged masonry, which lost rigidity properties. It was proven that when the modulus of elasticity decreases to 5 – 10% of the initial one, significant changes occurred in the stress-strain state of the entire structure.

Keywords: masonry arches; masonry walls; calculation models.

Łukowe konstrukcje murowe znane są z czasów starożytnych jako konstrukcje nośne mostów, wiaduktów, bram wjazdowych, portali. W budownictwie mieszkaniowym i użyteczności publicznej najczęściej wykorzystywane były jako nadproża otworów okiennych i drzwiowych, dźwigające usytuowane nad nimi partie muru i stropy [1, 3]. Po wieloletniej eksploatacji niektóre z wymienionych konstrukcji uległy degradacji, uszkodzeniu lub zniszczeniu, co budzi wątpliwości dotyczące ich dalszej bezpiecznej eksploatacji. Jak wynika z doświadczenia, najczęściej występującymi objawami uszkodzeń konstrukcji łukowych są: destrukcja zaprawy murarskiej w spoinach; zniszczenie i wypadanie cegieł; zarysowania i spękania. Istotne jest to, że często wraz z łukami uszkodzeniu ulegają usytuowane nad nimi partie muru, co świadczy o ich współpracy. Fakt ten został udowodniony w badaniach przeprowadzonych na przykładzie nadproży ceglanych [4]. Ustalono, że nośność nadproży zależy od ich kształtu określającego położenie linii ciśnień w rdzeniu przekrojów. Po zniszczeniu nadproży ich pracę prze-

muje powstający wtórny łuk w warstwach muru powyżej nadproża. Wpływ wtórnego łuku zwiększa się wraz ze zwiększeniem wysokości usytuowania obciążenia nad nadprożem łukowym, np. od oddziaływania stropu. Współpraca łuku wtórnego z nadprożem łukowym powoduje wielokrotne zwiększenie jego nośności. Przykładem tego może być kamienny łuk portalu nad jednym z kanałów wodnych w Sankt Petersburgu, który został wzniesiony w 1770 r. wg projektu francuskiego architekta Wallen-Delamota. Łuk ten o kształcie półkolistym o rozpiętości ok. 8 m wykonano z piaskowca o żółtobiałej barwie (fotografia a). Powyżej łuku wymurowano ścianę z cegły ceramicznej na zaprawie wapiennej o grubości 2,5 cegły, która została następnie

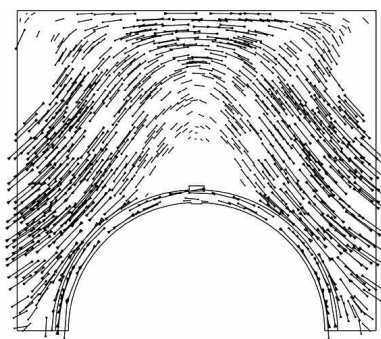
ozdobiona gzymsem i elementami architektonicznymi. Ściana ta do poziomu gzymsu połączona jest na strzepia ze ścianami szczytowymi dwóch budynków murowych usytuowanych po obu stronach kanału. W dolnej części łuku oparto na kolumnach z granitu. Badania materiałowe wykazały, że minimalna wytrzymałość na ścislenie zaprawy i cegły ściany wynosiła odpowiednio 1,0 MPa i 0,7 MPa, natomiast zaprawy i kamieni łuku odpowiednio 0,8 i 0,5 MPa. Uszkodzeń łuku nie stwierdzono w tym wypadku poza lokalnym wykruszeniem piaskowca w jego strefach oparcia (fotografia b). Natomiast mur ściany po jego 250-letniej eksploatacji wykazywał destrukcję zaprawy i cegieł w warstwach licowych przy jednoczesnym braku zarysowań i spękań. Obli-



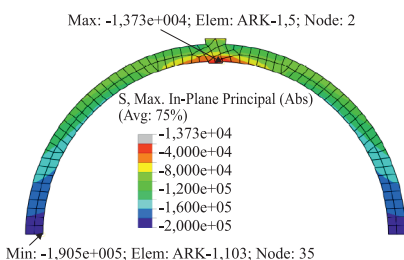
Portal z murową konstrukcją łukową (a) oraz strefa oparcia łuku (b)
Main view of portal gate containing masonry arch (a) and arch support zone (b)

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; Wydział Budownictwa i Architektury
*) Adres do korespondencji: rnowak@zut.edu.pl

czenia wytrzymałości łuku jako pręta krzywoliniowego obciążonego ciężarem znajdującego się nad nim muru wykazały niedopuszczalne przekroczenie stanu granicznego nośności łuku. Jego wzmocnienie znanymi do tej pory sposobami [4] nie wchodziło w grę, ponieważ podstawowym wymaganiem konserwatora zabytków był brak ingerencji w strukturę łuku oraz usytuowanego nad nim muru. W związku z tym przeprowadzono badania numeryczne wpływu na nośność łuku usytuowanego nad nim muru. Obliczenia wykonano metodą MES z wykorzystaniem programu ABAQUS. Obciążenie łuku stanowił jego ciężar własny oraz ciężar usytuowanego nad nim muru ściany. Czynnikiem zmiennym był moduł sprężystości E i współczynnik postaciowy $G = 0,4E$ muru usytuowanego nad łukiem. Założeniem zmienności cech sprężystości było zużycie techniczne muru po jego wieloletniej eksploatacji z uwagi na zwietrzenie spoin murarskich, destrukcja cegły pod wpływem oddziaływania warunków atmosferycznych, w tym zanieczyszczeń środowiska itd. [2]. Początkowy moduł sprężystości muru $E_p = 1600$ MPa określono na podstawie badań *in situ* metodą obciążenia próbnego trzech słupów murowych usytuowanych wewnątrz ogrzewanych budynków sąsiadujących z portalem. Słupy te oraz portal wykonano z tego samego materiału i znajdowały się w bardzo dobrym stanie technicznym. Na rysunku 1 wskazano mapę trajektorii głównych naprężeń w łuku i usytuowanym nad nim murze przy jego początkowych wartościach modułu sprężystości E_p . Natomiast na rysunku 2 przedstawiono mapę



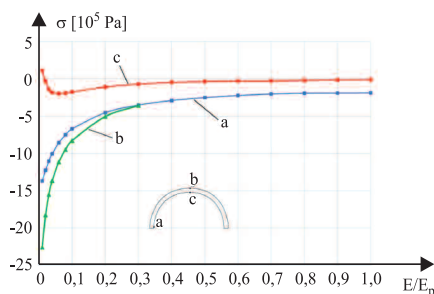
Rys. 1. Trajektoria naprężeń głównych w łuku i w usytuowanej nad nim ścianie murowej
Fig. 1. Principal stresses trajectories inside masonry arch and wall over it



Rys. 2. Mapa naprężeń głównych w łuku
Fig. 2. Principal stresses map inside arch

naprężeń głównych w łuku. Wynika z tego, że w murze nad łukiem powstaje wtórny łuk, którego kształt wynika z trajektorii głównych naprężeń ściskających. W strefie podporowej łuku i na pozostałym obszarze działają tylko naprężenia ściskające o wielkości mniejszej o ok. 50% od wytrzymałości muru nad łukiem.

Warto nadmienić, że zbyt małe wyężenie strefy podporowej łuku związane było z przekazywaniem ciężaru ściany usytuowanej nad nim bezpośrednio na kapitel słupa i na ściany szczytowe sąsiadujących budynków przez połączenie na strzępia (fotografia b). Na rysunku 3 pokazano zależności występujące między maksymalnymi naprężeniami w łuku a modułami sprężystości zmiennym E i początkowym E_p . Zmniejszeniu E/E_p towarzyszy redystrybucja naprężeń w przekrojach łuku.



Rys. 3. Wpływ wielkości modułu E muru na wartość maksymalnych naprężeń w przekroju: a) podporowym; b), c) zwornikowym łuku

Fig. 3. Impact of E modulus of masonry on the maximal stresses in support area (a) and key-stone area (b, c) of arch

Przy wartości $E/E_p < 0,1$ w dolnej części zwornika naprężenia ściskające malały i zmieniały się na rozciągające (krzywa „c” na rysunku 3). Jednocześnie w górnej strefie zwornika następował gwałtowny wzrost naprężeń ściskających (krzywa „b” na rysunku 3). Było to związane ze zwiększeniem swobody poziomych i pionowych przemiesz-

czeń poszczególnych przekrojów łuku przy zmniejszeniu sztywności usytuowanego nad nim muru. W przypadku, gdy jego sztywność, charakteryzująca się wielkością modułów E i G , osiąga zerową wartość, to wówczas łuk pracuje jako konstrukcja samodzielna pod ciężarem usytuowanego nad nim muru. W tym wypadku w strefie podporowej łuku powstają największe naprężenia ściskające (krzywa „a” na rysunku 3), których wypadkowa równa jest wielkości ciężaru usytuowanego nad łukiem muru. Warto nadmienić, że wielkość tych naprężeń jest o ok. 14 razy większa w porównaniu z ich wielkością przy $E = E_p$ (gdy łuk współpracuje z usytuowanym nad nim murem). Jeszcze większą różnicę wielkości naprężeń ściskających zaobserwowano w zworniku łuku. W strefie tej naprężenia ściskające wywołane momentem zginającym i siłą rozporową były minimalne (przy uwzględnieniu współpracy łuku z usytuowanym nad nim murem, gdy $E = E_p$). Przeprowadzono również badania numeryczne stanu naprężeń muru usytuowanego nad łukiem przy założeniu, że łuk uległ całkowitemu zniszczeniu. W tym wypadku ustalono, że rozkład naprężeń w murze prawie nie uległ zmianie. Natomiast naprężenia ściskające w strefie podporowej zwiększyły się o ok. 20%, a ich wielkość nie przekroczyła wytrzymałości muru na ściskanie w poprzek spoin wspornych. Można z tego wywnioskować, że główną funkcję łuku w przedmiotowej ścianie pełniło architektoniczne obramowanie jej przesklepienia.

Literatura

- [1] Ahnert Rudolf, Karl Heinz Krause. 2009. „Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1969 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz”. Band 1, 2.
- [2] Janowski Zbigniew, Łukasz Hojdys, Piotr Krajewski. 2007. Sklepienia zabytkowe – klasyfikacja, ocena stanu technicznego i nośności, naprawy i wzmocnienia. Warsztat pracy projektanta konstrukcji. XXII Ogólnopolska Konferencja.
- [3] Koch Wilfried. 1996. Style w architekturze arcydzieła budownictwa europejskiego od antyku po czasy współczesne. Świat Książki.
- [4] Nowak Rafał. 2014. Analiza nośności i mechanizmów uszkodzeń odcinkowych ceglanych nadproży łukowych. Rozprawa doktorska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

Przyjęto do druku: 28.02.2019 r.