

mgr inż. Rafał Nowak*
prof. dr hab. inż. Romuald Orłowicz*

Metodyka i wyniki badań doświadczalnych ceglanych nadproży łukowych

Procedures and results of fundamental research brick arched lintels

W istniejących budynkach murowych dość często występują uszkodzenia ceglanych nadproży łukowych w postaci spękań lub wypadania cegieł. Spękania są skutkiem przeciążenia, nierównomiernego osiadania podłoża, oddziaływań dynamicznych itp. Wypadanie cegieł z łuków może być skutkiem powstania nadmiernych naprężeń rozciągających, zwiertzenia zaprawy lub oddziaływań dynamicznych, np. ruchu pojazdów. W efekcie, łuk ceglany praktycznie jest wyłączony z pracy, a rolę nadproża spełnia mur nad łukiem (fotografia 1). Mechanizmy uszkodzeń, zwłaszcza morfo-

logia spękań nadproży łukowych, zostały szczegółowo omówione w pracach [1, 2, 3].

Badania

W celu rozpoznania mechanizmu zniszczenia nadproży łukowych przeprowadzono badania na modelach wykonanych z cegły pełnej ceramicznej o średniej wytrzymałości na ściskanie 107,6 MPa na zaprawie o średniej wytrzymałości na ściskanie 8,0 MPa (rysunek 1). Wytrzymałość muru na ściskanie określona na standardowych próbkach o wymiarach 50 x 50 x 12 cm wynosiła 26,8 MPa.

Nadproża łukowe obciążono siłą skupioną jak na rysunku 1. Siła P symulowała reakcje belek stropowych, które w rzeczywistości mogą być oparte w środku rozpiętości łuku albo w dowolnej części jego przęsła L . Usytuowanie siły bezpośrednio na łuku (rysunek 1 c, d) wynikało z przyjętego w praktyce schematu obliczeniowego nadproży łukowych, natomiast w rzeczywistości belki stropowe są oparte na nadmurowanych nad nim 4-5 warstwach cegieł (rysunek 1 a, b). Powstający w łuku rozpór był przekazywany na ścigi zamocowane na bocznych czołach modeli. Badania wykonano na specjalnym stanowisku za pomocą

siłowników hydraulicznych firmy Zwick o udźwigu do 1200 kN sterowanych automatycznie systemem Cubus. Podczas badań kontrolowano wartość siły P , rozpór H oraz ugięcie pionowych łuku. W celu określenia linii ciśnień oraz stanu wyężenia mierzono odkształcenia w charakterystycznych przekrojach łuku: w miejscach usytuowania siły i strefach przypodporowych. Pomiar wykonano za pomocą mostka tensometrycznego HBM Hottinger MGCplus. Ponadto w ciągu całego procesu obciążania, aż do zniszczenia, rejestrowano powstawanie oraz rozwój spękań i uszkodzeń muru i łuków za pomocą kamery cyfrowej Sony HDR-CX115 o rozdzielczości 1920 x 1080i 24 Mb/s.

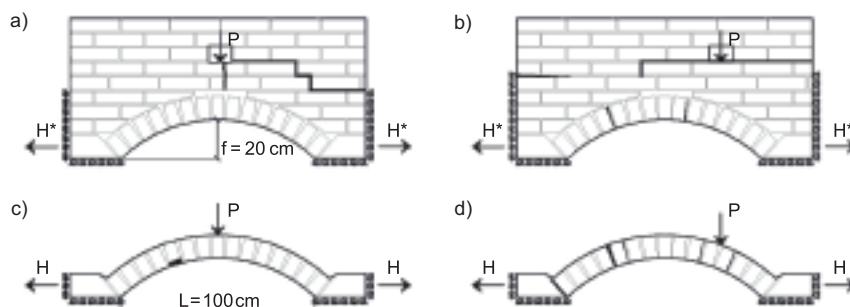
Wyniki badań na rysunku 2 podano w postaci zależności rozpór H i ugięcie u od wartości siły P . Z analizy rysunków wynika, że nośność badanych nadproży łukowych znacznie przekracza nośność pojedynczych łuków: przy symetrycznym obciążeniu o ok. 1,8 razy, a przy niesymetrycznym o ok. 7 razy. Istotne jest to, że rozpór H uzyskany podczas badań wyodrębnionych łuków był znacznie większy od rozpór H^* mierzonego na tym samym poziomie od podstawy: przy obciążeniu symetrycznym o ok. 1,5 raza, natomiast przy niesymetrycznym o ok. 6,1 raza.



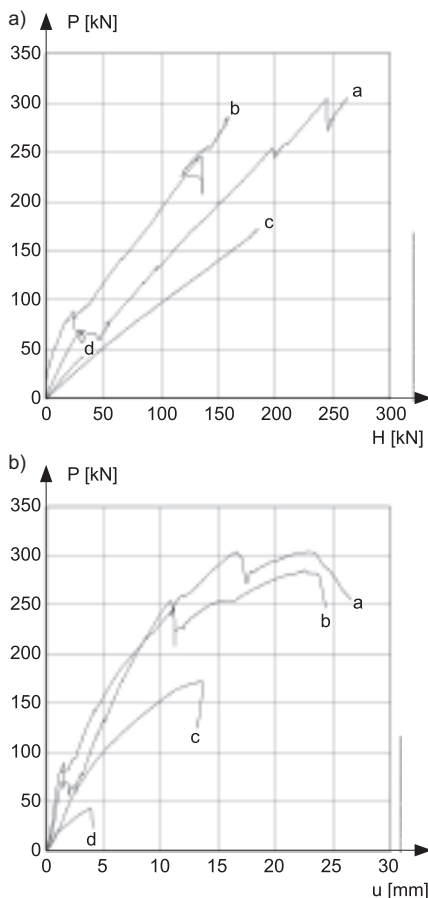
Fot. 1. Uszkodzenie nadproży łukowych w postaci spękań (a) i wypadania cegieł (b)

Fot. Autorzy

* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie



Rys. 1. Schematy obciążenia (spękań modeli doświadczalnych): a, b – fragmentów nadproży łukowych; c, d – łuków ceglanych



Rys. 2. Rejestracja sił rozporu H (a) i ugięć u (b) przy narastającym obciążeniu P dla schematów a, b, c, d wg rysunku 1

Wynika to z faktu współpracy z łukiem wyżej usytuowanych warstw cegieł. Skutkiem tej współpracy jest powstanie łuku wtórnego, który wyodrębnia się od miejsca przyłożenia sił skupionych do podpór poziomych (rysunek 2 a, b). Powstanie łuku wtórnego zapoczątkowało spękanie poziome muru w miejscu przyłożenia sił skupionych. Moment powstania tych spękań wyraźnie widać z wykresów a i b na rysunku 2 przy wartościach sił $P_a = 77,1$ kN oraz $P_b = 83,2$ kN. W momencie tym nastąpiła redystrybucja naprężeń i propagacja rys aż do całkowitego zniszczenia modeli, któremu towarzyszyło powstanie pęknięcia pionowego w przekrojach usytuowanych w pobliżu płaszczyzny działania siły P .

Analiza numeryczna

Poza badaniami podjęto próbę teoretycznego oszacowania nośności rozpatrywanych modeli za pomocą programu Abaqus. Bez opisu materiału wspartego doświadczeniem nie moż-

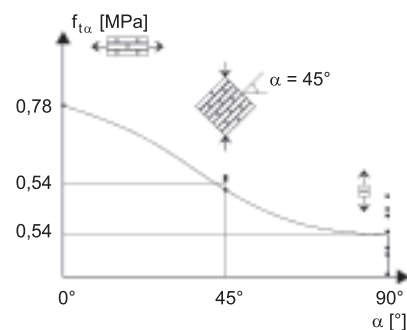
na stworzyć modeli konstytutywnych, ani później ich zweryfikować [4]. Mur modelowano jako materiał izotropowy posiadający następujące cechy sprężystości uzyskane podczas badań standardowych próbek murowych: współczynnik Poissona $\nu = 0,08$ oraz moduł sprężystości $E = 25,2$ GPa. Warunki brzegowe odpowiadały warunkom obciążenia i oparcia próbek doświadczalnych. Z analizy otrzymanych wyników wynika, że najbardziej wyężone strefy muru znajdują się w okolicy przyłożenia sił skupionych.

Oszacowanie nośności na podstawie uzyskanych naprężeń wymagało zastosowania właściwego kryterium wytrzymałości uwzględniającego anizotropowe właściwości muru. W związku z tym podjęto próbę zastosowania kryterium głównych naprężeń rozciągających. W tym celu przeprowadzono badanie doświadczalne na próbkach standardowych dla uzyskania wytrzymałości badanego muru na rozciąganie wzdłuż spoin wspornych f_{t0} , w poprzek spoin f_{t90} i pod kątem $\alpha = 45^\circ$. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 3. Do aproksymacji zastosowano standardowy wzór zgodnie z [4, 5]:

$$1/f_{t\alpha} = \cos^2(\alpha)/f_{t0} + \sin^2(\alpha)/f_{t90} \quad (1)$$

gdzie:

$f_{t\alpha}$ – wytrzymałość muru na rozciąganie pod kątem α do spoin wspornych.



Rys. 3. Określenie kryterium wytrzymałości muru wg głównych naprężeń rozciągających

Porównanie wyników badań z analizą numeryczną

Otrzymane wyniki teoretyczne odniesiono do opracowanego kryterium wytrzymałości muru w modelach doświadczalnych. Miejsca początków niszczenia (rysunek 1a, b) pokrywały się ze sobą i znajdowały się w strefie obciążenia si-

łą skupioną. Uzyskano również wysoką zbieżność wartości sił inicjujących zniszczenie próbek (do 90%). Jednocześnie naprężenia rozciągające w poprzek spoin wspornych w najbardziej wyężonych przekrojach łuków były o 41% mniejsze od wytrzymałości muru na rozciąganie w tym kierunku. Całkowite zniszczenie modeli nastąpiło na skutek ich spękania wzdłuż spoin wspornych. W przypadku stanu propagacji spękań aż do wyodrębnienia wtórnego łuku zastosowanie kryterium wytrzymałości ($1/f_{t\alpha}$) jest możliwe, jednakże pod warunkiem zastosowania modelu rysy dyskretnej, przez automatyczną zmianę siatki elementów skończonych. W pełni nieliniowa analiza metodą elementów skończonych jest możliwa do przeprowadzenia za pomocą specjalnych elementów interface'owych. Jest to zagadnienie mechaniki spękań, które wymaga innych fizycznych kryteriów, np. energii pęknięcia, których uzyskanie wymaga bardzo skomplikowanych badań murów [4].

Abstract

Two models of brick arched lintels and two arch models were put to the test of single concentrated force in the middle of the span and in the most sensitive spot. Value of the concentrated force and the displacement were registered. The dependence of the construction strength (in comparison with the strength of the arched lintel to the strength of the arch) were compared to the placement of concentrated force. Analytical numerical research where carried out with help of limit tension stress criterion, then results were compared to the results of fundamental research.

Literatura

- [1] Nowak R.: Badania dotyczące mechanizmu zniszczenia ceglanych nadproży łukowych. XII Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa. Szczyrk 2012.
- [2] Nowak R., Orłowicz R.: Mechanizmy uszkodzeń ceglanych nadproży łukowych. XIII Konferencja Naukowo-Techniczna REMO. Wrocław 2009.
- [3] Orłowicz R., Nowak R.: Uszkodzenia i naprawy ceglanych nadproży łukowych. Przegląd Budowlany nr 4/2012.
- [4] Małyżko L.: Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uwzględnieniem anizotropii. Monografia. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2005.
- [5] Kubica J.: Mechanika muru obciążonego w swej płaszczyźnie. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.