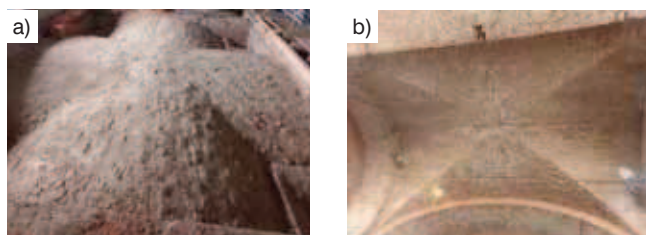


Nośność stref podporowych wybranych sklepień ceglanych

Dr inż. Rafał Nowak, prof. dr hab. inż. Romuald Orłowicz,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

1. Wprowadzenie

W wielu budynkach historycznych podstawowymi konstrukcjami stropów i przekryć są sklepienia ceglane, które ze względu na walory dekoracyjne stanowią jedno z ważniejszych osiągnięć architektury gotyckiej. Stosowane w architekturze romańskiej sklepienia kolebkowe o kształcie połowy walca zastąpiono lżejszym sklepieniem krzyżowym. Sklepienie krzyżowe w rzeczywistości składa się z dwóch sklepień kolebkowo-



Rys. 1. Widok ceglanych sklepień krzyżowych ze strony grzbietowej (a) i podniebienia (b)

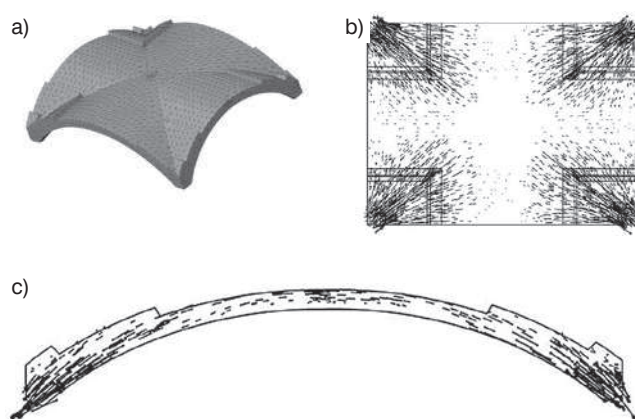


Rys. 2. Strefy oparcia sklepień krzyżowych w narożach ścian murowych: a) widok po rozbiórce sklepienia, b) degradacja muru, c) osłabienie otworami instalacyjnymi

wych, przecinających się pod kątem i założonych na planie kwadratu lub prostokąta. Sklepienie opiera się na umieszczonych w narożach podporach w postaci ścian lub kolumn. Natomiast połączenia między czołami wysklepek a konstrukcjami pionowymi nie występują (rys. 1). Na bazie tego podstawowego sklepienia rozwinęło się wiele innych odmian, np. sklepienia gwiaździste, kryształowe i in. [2, 3].

2. Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe sklepień

Po wieloletniej eksploatacji sklepienia te często budzą obawy odnośnie ich nośności i możliwości dalszego bezpiecznego użytkowania. Dotyczy to zwłaszcza sklepień w remontowanych zabytkowych obiektach lub poddanych modernizacji, ze względu na zmianę sposobu użytkowania. Przyczyną uszkodzeń może być również fakt, że wiele sklepień wybudowanych



Rys. 3. Stan naprężeń sklepienia krzyżowego: a) schemat obliczeniowy MES, b) trajektorie głównych naprężeń ściskających na powierzchni podniebienia, c) trajektorie głównych naprężeń ściskających w przekroju pionowym pokrywającym się z przekątną sklepienia

zostało w sposób nie w pełni racjonalny pod względem statycznym, jak również z powodu ich niewłaściwego obciążenia. Warto nadmienić, że sprawdzenie stanu technicznego przedmiotowych sklepień w wyniku ich obliczeń statyczno-wytrzymałościowych nie sprawia obecnie żadnych trudności. Na podstawie istniejących metod numerycznych łatwo określić zarówno stan naprężeń sklepień, jak i ich wyężenie, mechanizmy niszczenia w tym i propagację zarysowań i spękań [4]. Natomiast w literaturze technicznej brak danych co do nośności stref oparcia sklepień jako najbardziej wyężonych. Rozwiązania konstrukcyjne tych stref często są skomplikowane i w ogóle mało rozpoznane. Typowe strefy oparcia sklepień krzyżowych także po ich rozbiórce przytoczono na rysunku 2. Strefy oparcia sklepień po ich wieloletniej eksploatacji mogą być najbardziej uszkodzone. Jedną z przyczyn jest nadmierne nawilżanie wodą opadową, która ze względu na nieszczelności

połaci dachu może gromadzić się w narożnych pachwinach sklepienia (rys. 2b). Zdarzają się również przypadki osłabienia stref oporowych wykonywanymi obok nich otworami dla usytuowania przewodów instalacyjnych (rys. 2c).

Wybrane wyniki obliczeń numerycznych, wykonanych przez autorów, historycznego sklepienia krzyżowego jako układu przestrzennego (rys. 1) przytoczono na rysunku 3. Wymiary sklepienia w rzucie wynosiły 6×7 m, a jego wyniosłość 1,7 m. Grubość wysklepek wynosiła jedną cegłę, a w strefach oporowych była zwiększona do 1,5 i 2 cegły. Obliczenia wykonano od ciężaru własnego sklepienia.

Z rysunku 3b wynika, że strumień sił ściskających kumuluje się w obrębie przekątnych sklepienia i nasila się w strefie podporowej. Najbardziej wyężonymi w sklepieniach krzyżowych są strefy przenikania się kolebek (rys. 3c). W związku z tym strefy te często wzmacniano ceglanymi żebrami w postaci pionowych elementów o przekroju walca lub półwalca, które spełniały istotną funkcję konstrukcyjną. Wypadkowa N linii ciśnień od tych stref przekazuje się na wsporniki ceglane, które są przewiązane z pionowymi murowymi konstrukcjami nośnymi (rys. 4). Wsporniki przenoszą obciążenia pionowe P i siły rozporowe H . Nośność wsporników można określić z następujących warunków:

- nośności na ściskanie prostopadle do spoin wspornych od siły P działającej na powierzchni o wymiarach $a \times b$

$$P \leq f_c ab, \quad (1)$$

- nośności na ścinanie w płaszczyznach pionowych połączenia wsporników ze ścianami

$$P \leq f_v (a + b / 2) h \quad (2)$$

- nośności na rozciąganie równoległe do spoin wspornych w wyniku mimośrodowego obciążenia wspornika siłą P

$$P \leq f_t (W_a / e_a + W_b / e_b), \quad (3)$$

gdzie:

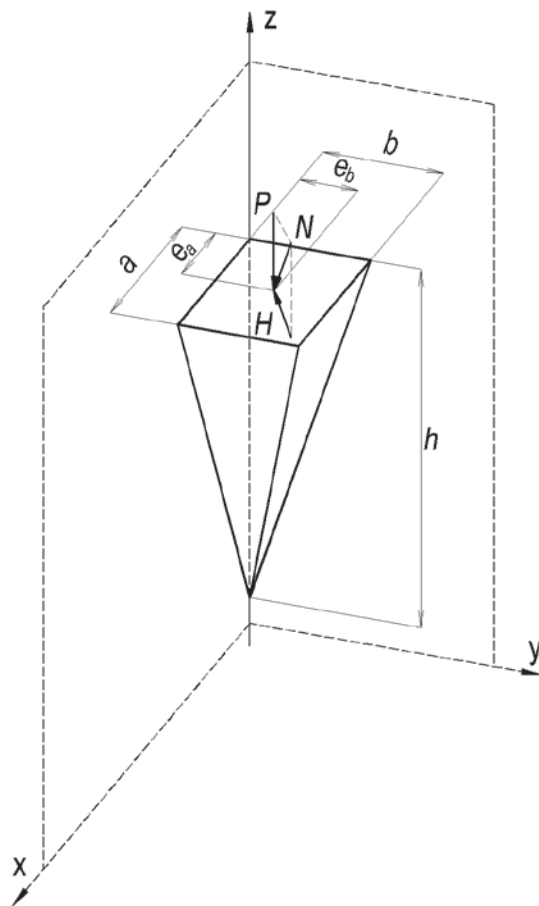
f_c – wytrzymałość muru na ściskanie prostopadle do spoin wspornych z uwzględnieniem efektu miejscowego docisku,
 f_v – wytrzymałość muru na ścinanie prostopadle do spoin wspornych,

f_t – wytrzymałość muru na rozciągania wzdłuż spoin wspornych,
 W_a i W_b – wskaźniki wytrzymałości pionowych stref połączenia wspornika ze ścianami o kształcie trójkątów (rys. 4),

e_a i e_b – mimośrodowość działania siły P względem stron a i b podstawy wspornika,

a, b, h – wymiary wspornika wg rysunku 4.

Warto nadmienić, że warunek (3) jest istotny dla sklepień o dużej wyniosłości, gdy wartość siły rozporowej H jest stosunkowo mała w porównaniu z siłą P . W przypadku niskiej wyniosłości rozpór H przeciwdziała powstawaniu naprężeń rozciągających σ_x i σ_y od mimośrodowego obciążenia wspornika siłą P . Wskazana uproszczona metoda obliczeń została zastosowana do sprawdzenia nośności stref podporowych sklepień



Rys. 4. Schemat obciążenia wsporników dźwigających sklepienie krzyżowe

historycznych – jak na rysunku 1. Na podstawie badań laboratoryjnych próbek cegły i zaprawy pobranych ze sklepień ustalono następujące obliczeniowe wartości wytrzymałości muru: na ściskanie $f_c = 1,35$ MPa, na ścinanie $f_v = 1,1$ MPa. Z obliczeń wg wzorów (1), (2), (3) wynika, że przy wymiarach $a \times b \times h = 20 \times 30 \times 80$ cm wsporników – jak na rysunku 4 – decydującym o ich nośności jest warunek (1). W tym przypadku nośność wspornika wynosi ok. $P = 100$ kN. Bardziej dokładne oszacowanie nośności stref oporowych sklepień może być dokonane na podstawie ich modelowania metodą elementów skończonych (MES) [5].



Rys. 5. Sposoby napraw stref podporowych sklepień: a) przemurowanie, b) iniekcja

3. Naprawa stref podporowych sklepień

Podane w literaturze technicznej sposoby napraw sklepień dotyczą głównie ich wysklepek [1, 2, 3]. Natomiast rzadziej można spotkać sposoby napraw stref podporowych. Warto nadmienić, że wybór sposobu napraw wiąże się z bezpieczeństwem ich wykonania, ponieważ strefy podporowe są najbardziej wyężone ze względu na przenoszenie całkowitego obciążenia od sklepień. W związku z tym podczas napraw tych stref niezbędnym jest podstemplowanie sklepienia na całym obszarze za pomocą krążyn. W przypadku degradacji muru stref podporowych jak na rysunku 2c uzasadnionym jest ich całkowite przemurowanie (rys. 5a). W przypadku poluzowania cegieł w murze ze względu na degradację zaprawy w spoinach może być stosowana iniekcja (rys. 5b). Zaczyn iniekcyjny powinien mieć cechy fizyko mechaniczne zbliżone do zaprawy murarskiej stosowanej podczas wznoszenia sklepień. Można również zwiększyć nośność stref podporowych poprzez ich wzmocnienie. Możliwe jest zastosowanie elementów wzmacniających stref podporowych od strony podniebienia sklepienia, jest jednakże niepożądane ze względów konserwatorskich. Mogą być również zastosowane elementy wzmacniające usytuowane w pachwinach naroży sklepień. Elementy te wykonuje się z betonu monolitycznego wypełniającego pachwiny sklepień. Przed wypełnieniem pachwin betonem w narożnych strefach sklepień oraz w dźwigających ich ścianach lub kolumnach murowych osadzają się kotwy stalowe, łączone między sobą prętami zbrojeniowymi. W wyniku

tego powstanie wieniec żelbetowy o kształcie kątownika zamocowany do nośnych konstrukcji pionowych, do którego za pomocą kotew podwieszona jest narożna strefa sklepienia.

4. Podsumowanie

Najbardziej wyężonymi strefami sklepień ceglanych są ich strefy podporowe, które pracują w złożonym stanie naprężeń. Uszkodzenie tych stref w postaci poluzowania muru lub osłabienia połączeń ze ścianami może doprowadzić do katastrofy budowlanej. Skutecznymi sposobami ich napraw mogą być przemurowania, iniekcja lub wzmocnienie za pomocą kotew stalowych osadzonych w ścianach i strefach podporowych sklepień i połączonych między sobą betonem monolitycznym.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Borusiewicz W., Konserwacja zabytków budownictwa murowego, Arkady, Warszawa, 1985
- [2] Janowski Z., Hojdis Ł., Krajewski P., Sklepienia zabytkowe – klasyfikacja, ocena stanu technicznego i nośności, naprawy i wzmocnienia, XXII Ogólnopolska Konferencja Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 2007
- [3] Jasieńko I., Łodygowski T., Rapp P., Naprawa, konserwacja i wzmacnianie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2006
- [4] Małyszko L., Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uwzględnieniem anizotropii, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn, 2005
- [5] Orłowicz R., Nowak R., Wpływ lunet na stan naprężeń sklepień kolebkowych historycznych budynków, Przegląd Budowlany 3/2018, str. 35-37

ZAMÓWIENIE PRENUMERATY Przeglądu Budowlanego na rok 2019

Wybieram: (proszę zakreślić)	ZWYKŁA	ULGOWA (dla indywidualnych członków PZITB, PIIB i studentów)
ROCZNA	<input type="checkbox"/> 252,00 zł*	<input type="checkbox"/> 126,00 zł*
ELEKTRONICZNA	<input type="checkbox"/> 85,00 zł*	

Zamówienia można składać **osobiście** lub **pocztą** – ul. Świętokrzyska 14 A, 00-050 Warszawa, **telefonicznie** 22 826-67-00 lub **e-mailem** reklama@przegladbudowlany.pl *

1. Imię i nazwisko/nazwa firmy

2. Nr telefonu kontaktowego

3. NIP (firmy)

4. Adres wysyłkowy

5. Okres prenumeraty

6. Opłata w kwocie (zł)

została przekazana w dniu

Prenumeratory otrzymają zamówione egzemplarze po dokonaniu wpłaty na konto:

**PZITB ZARZĄD GŁÓWNY WYDAWNICTWO
„PRZEGLĄD BUDOWLANY”
ul. Świętokrzyska 14 A, 00-050 Warszawa
Bank Millennium SA
90 1160 2202 0000 0000 5515 6488**

Upoważniamy Państwa do wystawienia faktury VAT bez podpisu odbiorcy.

Podpis

Członkowie PZITB i PIIB prenumeratę na rok 2019 mogą zamówić promocyjnie przez Okręgowe Izby Inżynierów Budownictwa.