

4. Wnioski dotyczące założeń i obliczeń sprawdzających konstrukcji monolitycznej

Koncepcja bardzo podatnego ustroju jednobelkowego przyjętego dla schodów podlegających obciążeniom tłumem ludzi przy ewakuacji widowni jest błędna i dowodzi braku wyobraźni projektantów. Do tego doszły błędy założeń do obliczeń.

Podsumowując analizę projektu monolitycznego można stwierdzić, że projekt został wykonany bez uwzględnienia oddziaływań termicznych i skurczowych oraz bez uwzględnienia wpływów dynamicznych. W otrzymanej do sprawdzenia dokumentacji nie znaleziono informacji o analizowaniu tych wpływów w trakcie opracowania projektu wykonawczego schodów.

Zaprojektowane zbrojenie przedstawione na rysunkach wykonawczych w projekcie schodów monolitycznych jest zdecydowanie niewystarczające, jeżeli w obliczeniach uwzględni się wpływy termiczne i skurczowe.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń sprawdzających – z pominięciem wpływu temperatury i skurczu, a także wpływów dynamicznych – stwierdzono praktycznie wystarczające ilości zbrojenia konstrukcji zarówno w ryglach, jak i w słupach. Natomiast w przypadku zaistnienia oddziaływań termicznych i skurczowych oraz dynamicznych nastąpiłyby lokalne uszkodzenia konstrukcji. Przekroczenia dotyczą zarówno stanu granicznego nośności, jak też stanu granicznego użyteczności (ugięcia, zarysowania).

W zakresie obliczeń dynamicznych stwierdzono, że konstrukcja schodów w wersji monolitycznej jest układem niskostrojonym, a zakres częstości wymuszającej obejmuje pierwszą postać drgań własnych (swobodnych) konstrukcji schodów. Analizując wyniki przyrostu sił wewnętrznych w charakterystycznych przekrojach stwierdzono, że nośność konstrukcji schodów przy częstości wymuszenia w zakresie rezonansowym, jest zdecydowanie niewystarczająca.

Część 2. artykułu będzie zawierać omówienie błędów projektu zamiennego (zrealizowanego), stanów awaryjnych i przedstawienie realizacji wzmocnienia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rysunki projektu wykonawczego schodów kaskadowych w wersji pierwotnej, monolitycznej, Wrocław, grudzień 2008
- [2] Fragmenty pierwotnych obliczeń statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji żelbetowej stadionu dotyczące schodów zewnętrznych w wersji monolitycznej (źródło: Mazowiecki Urząd Wojewódzki) 2008
- [3] „Sprawozdanie z wykonania badań: 1) pod obciążeniem od ciężaru własnego betonowej płyty spocznika, 2) pod obciążeniem próbnym płyty spocznika, ciągu schodowego w osi 410 Stadionu Narodowego w Warszawie” wykonane przez Instytut Budowy Dróg i Mostów w Warszawie, sierpień–wrzesień 2010
- [4] PN-EN 206-1: 2003/A2:2006; Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [5] P354: Design of Floors for Vibration: A New Approach (Revised Edition, February 2009)
- [6] ISO 10137: Bases for design of structures – Serviceability of buildings against vibration. International Organisation for Standardization (ISO), 2007

Wzmacnianie sklepień murowych materiałami kompozytowymi



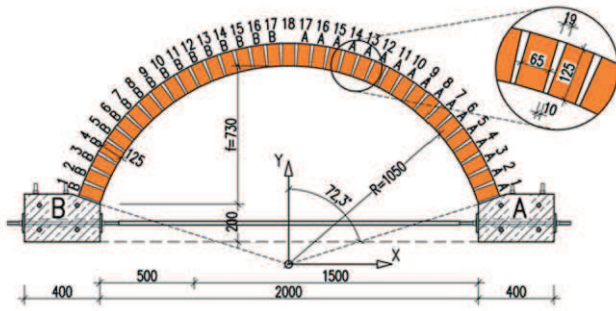
Dr inż. Łukasz Hojdis, dr hab. inż. Zbigniew Janowski, dr inż. Piotr Krajewski, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Użytkowane obecnie sklepienia, kopuły i łuki to głównie konstrukcje zabytkowe często narażone na bardziej niekorzystne oddziaływanie niż przewidziane przez ich budowniczych. Wiele sklepień zostało uszkodzonych w wyniku zmiany sposobu użytkowania obiektu lub na skutek dodatkowych oddziaływań. Konstrukcje te wymagają napraw, rekonstrukcji bądź wzmocnienia, aby mogły być nadal bezpiecznie eksploatowane. Naprawa lub wzmocnianie sklepień murowych jest zagadnie-

niem trudnym i wymagającym każdorazowo indywidualnego rozwiązania. Wynika to z trudności modelowania sklepionych konstrukcji murowych, ograniczonej wiedzy o właściwościach mechanicznych materiałów zastosowanych do ich wykonania, a także złożonej geometrii sklepień.

Współcześnie przy wzmocnianiu konstrukcji murowych coraz częściej stosowane są materiały z kompozytów zbrojonych włóknami. Materiały te zapewniają wykonanie wzmocnienia w sposób mało inwazyjny. Mogą być stosowane w wielu miejscach, gdzie dostęp



Rys. 1. Geometria badanych sklepień wraz z przyjętymi oznaczeniami warstw cegieł

jest utrudniony, a kształt konstrukcji zróżnicowany, np. przy wzmacnianiu sklepień murowych. Wzmocnienia powierzchniowe wykonane z kompozytów mogą być w przyszłości bez istotnej szkody dla oryginalnej konstrukcji zdemontowane, co jest szczególnie ważne w przypadku obiektów zabytkowych [1] [2] [3]. Dotychczasowe badania konstrukcji murowych wzmacnianych kompozytami koncentrowały się głównie na wykorzystaniu kompozytów FRP (Fiber Reinforced Polymer) [4] [5] [6] [7]. Obecnie obserwuje się wzrost zainteresowania kompozytami z matrycami mineralnymi [8] [9] [10]. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych na modelach sklepień walcowych wzmacnionych przy powierzchni grzbietowej kompozytami o matrycy mineralnej zbrojonymi włóknami szklanymi lub węglowymi [11]. Taka lokalizacja wzmocnienia (po stronie grzbietowej sklepień) ma podstawowe znaczenie w obiektach historycznych w sytuacjach, gdy podniebienie sklepienia zdobią cenne polichromie. Celem prezentowanych badań było określenie wpływu zastosowanej metody wzmocnienia na nośność i sposób zniszczenia sklepień oraz porównanie wyników badań przeprowadzonych na sklepieniach wzmacnionych i niewzmocnionych.

2. Opis elementów badawczych i metodyka badań

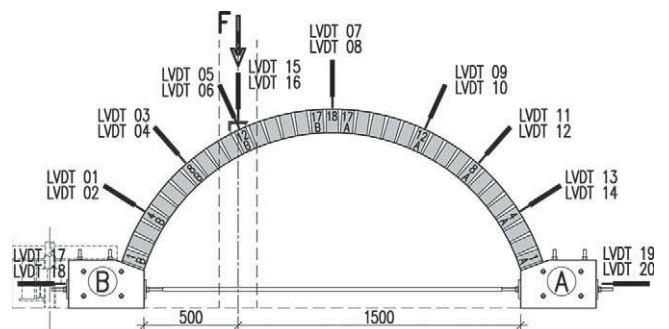
Badania prowadzono na pasmach sklepień walcowych o szerokości 1040 mm i grubości 125 mm. Rozpiętość

elementów w świetle podpór wynosiła 2000 mm, a strzałka 730 mm (rys. 1).

Elementy murowano z cegły ceramicznej pełnej na zaprawie wapiennej. Średnia wytrzymałość na ściskanie cegieł wynosiła $24,4 \text{ N/mm}^2$, a zaprawy $1,1 \text{ N/mm}^2$.

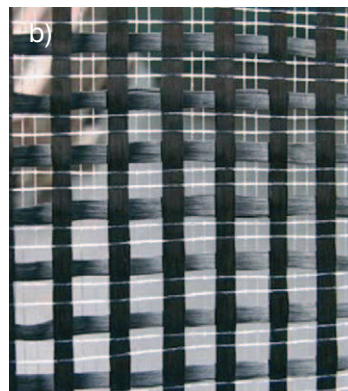
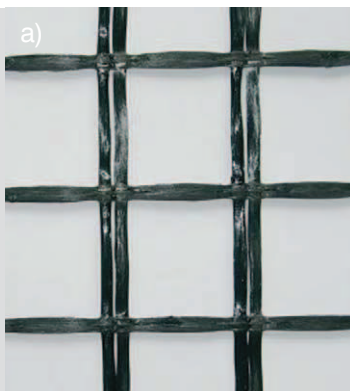
Do wzmacniania sklepień wykorzystano dostępne na rynku rozwiązania systemowe przeznaczone do wzmacniania konstrukcji murowych. Stosowano siatki wykonane z włókien szklanych (rys. 2a) lub z włókien węglowych (rys. 2b). W pierwszym wariancie zastosowano pasmo siatki z włókna szklanego odpornego na środowisko alkaliczne szerokości 0,9 m o wytrzymałości na rozciąganie ok. 45 kN/m . Zastosowane w drugim wariancie pasmo siatki z włókna węglowego szerokości 1,0 m charakteryzowało się wytrzymałością na rozciąganie ok. 225 kN/m . W obu przypadkach matrycą stanowiła zaprawa polimerowo-cementowa z dodatkiem rozproszonych włókien. Średnia wytrzymałość zaprawy na ściskanie wynosiła $31,8 \text{ N/mm}^2$, a na zginanie $12,5 \text{ N/mm}^2$. W badaniach przyczepności wzmocnienia do muru i do betonu obserwowano zniszczenie kohezyjne w materiale podłoża uzyskując wytrzymałość na odrywanie od muru $0,4 \text{ N/mm}^2$, od betonu $>2,4 \text{ N/mm}^2$ (rys. 2c).

Wszystkie sklepienia badano do zniszczenia pod obciążeniem pionowym przykładanym bezpośrednio do powierzchni grzbietowej w 1/4 rozpiętości. Prowadzono ciągły pomiar siły, przemieszczeń na kierunku radialnym w czternastu punktach pomiarowych oraz przemieszczeń pionowych w miejscu przyłożenia obciążenia



Rys. 3. Rozmieszczenie czujników pomiarowych

Rys. 2. a) Siatka z włókien szklanych – wiązki włókien ułożono w rozstawach co ok. 25 mm, b) siatka z włókien węglowych – wiązki ułożone co ok. 10 mm, c) pomiar przyczepności przez odrywanie



nia. Układ i rozmieszczenie czujników pomiarowych przedstawiono na rysunku 3.

3. Wyniki badań

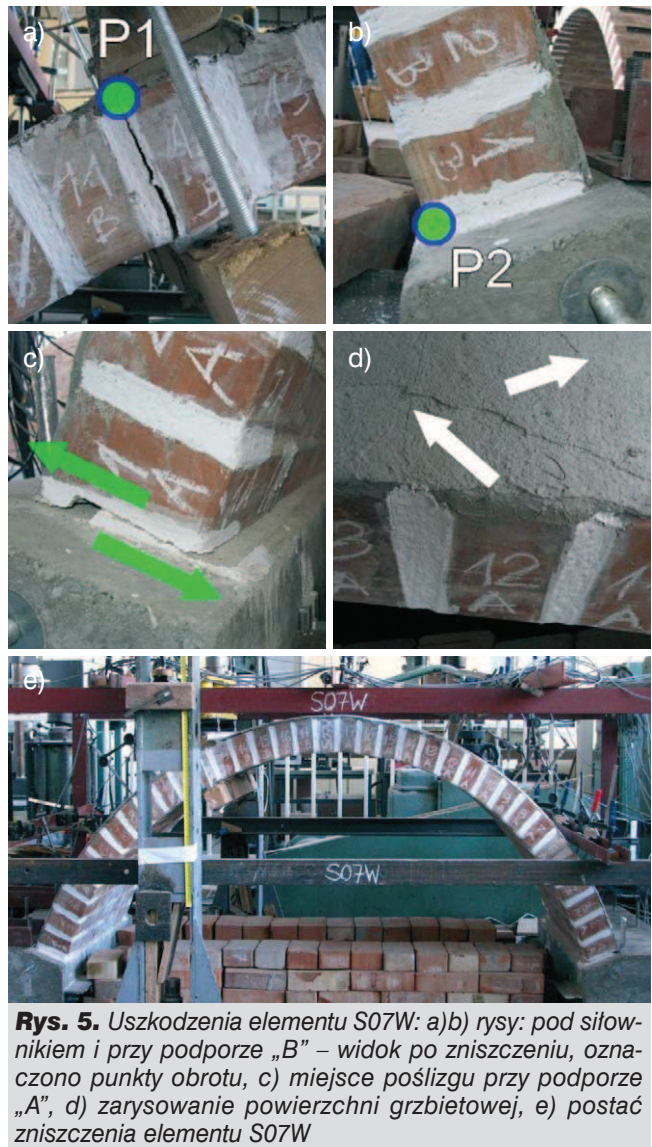
W artykule przedstawiono wyniki badań sklepień wzmocnionych siatką z włókien szklanych (sklepienia S02W, S03W, S09W) oraz sklepienia wzmocnionego siatką z włókien węglowych (element S07W). Wszystkie sklepienia z wyjątkiem sklepienia S09W uczestniczyły we wcześniejszych badaniach jako elementy niewzmocnione [11] [12]. Siatki zbrojeniowe wklejano na powierzchnię grzbietową sklepień po wcześniejszym uzupełnieniu ewentualnych rys i ubytków. Badania sklepień wzmocnionych prowadzono po 14 dobach od dnia wykonania wzmocnienia.

3.1. Elementy wzmocnione siatką z włókien szklanych

Badania sklepień wzmocnionych siatką z włókna szklanego przebiegały podobnie. Wraz ze wzrostem obciążenia obserwowano pojawienie się i rozwój pierwszej rysy



Rys. 4. Uszkodzenia elementu S09W: a) c) lokalizacja przegubów P1-P3, d) przekrój, w którym nastąpiło zerwanie włókien, e) postać zniszczenia elementu S09W



Rys. 5. Uszkodzenia elementu S07W: a) b) rysy: pod siłownikiem i przy podporze „B” – widok po zniszczeniu, oznaczono punkty obrotu, c) miejsce poślizgu przy podporze „A”, d) zarysowanie powierzchni grzbietowej, e) postać zniszczenia elementu S07W

– przy powierzchni podniebienia pod miejscem przyłożenia obciążenia (w przekroju sąsiadującym z warstwą cegieł 12B – rys. 4a). Pojawienie się pierwszej rysy następowało przy obciążeniu 7–9 kN. W początkowej fazie badań przemieszczenia narastały w przybliżeniu liniowo (rys. 7a). Wyraźna utrata sztywności elementów następowała po przekroczeniu obciążenia 22–23 kN w związku z pojawieniem się i rozwojem zarysowania od strony grzbietowej w obszarze pomiędzy warstwami cegieł 8A i 18. Rysy powstałe od strony grzbietowej przebiegały przez matrycę wzmocnienia i rozwijały się na wysokości spoin wspornych na całej szerokości badanych elementów. Pojawienie się kolejnych pęknięć skutkowało wyraźnym przyrostem przemieszczeń przy niewielkim przyroście obciążenia, co jest wyraźnie widoczne na rysunku 7a. W końcowym etapie eksperymentów obserwowano powstanie rysy przy wezłowiach.

Po osiągnięciu obciążenia 31,0 kN dla elementu S02W, 28,2 kN dla elementu S03W i 34,0 kN dla elementu

S09W, sklepienia uległy zniszczeniu. Po zerwaniu włókien szklanych w przekroju przy warstwie cegieł 12A łuki przekształcały się w mechanizm (rys. 6a). Widok ukształtowanych przegubów oraz ich lokalizację dla sklepienia S09W przedstawiono na rysunku 4.

3.2. Element wzmocniony siatką z włókien węglowych

Początkowo badanie sklepienia wzmocnionego siatką z włókien węglowych miało podobny przebieg jak badania sklepien wzmocnionych siatką z włókien szklanych. Pierwsza rysa pojawiła się w miejscu obciążenia od strony podniebienia (ok. 9 kN). Dalszy wzrost obciążenia skutkował pojawieniem się zarysowania w przekrojach przypodporowych. Dla obciążenia bliskiego wartości maksymalnej obserwowano pojawienie się rysy przy powierzchni grzbietowej, w matrycy wzmocnienia, w obszarze pomiędzy warstwami cegieł 7A i 16A.

Przy obciążeniu 39,2 kN nastąpił poślizg pierwszej warstwy cegieł (1A) po powierzchni wezgiłowia „A” – rys. 5c. Nastąpiło zniszczenie elementu. W momencie zniszczenia konstrukcja podzieliła się na dwa segmenty. Pierwszy segment wydzielił się pomiędzy zarysowanym przekrojem podporowym przy podporze „B” a zarysowanym przekrojem 11B/12B. Drugi segment obejmował pozostałą część sklepienia. W chwili zniszczenia segmenty obróciły się wokół wykształconych przegubów P1 i P2 (rys. 5a–b). Równocześnie nastąpił poślizg segmentu drugiego w przekroju podporowym. Schemat zniszczenia elementu S07W przedstawiono na rysunku 6b.

4. Podsumowanie wyników badań

Wyniki badań wskazują, że schemat zniszczenia sklepien wzmocnianych przy powierzchni grzbietowej zale-

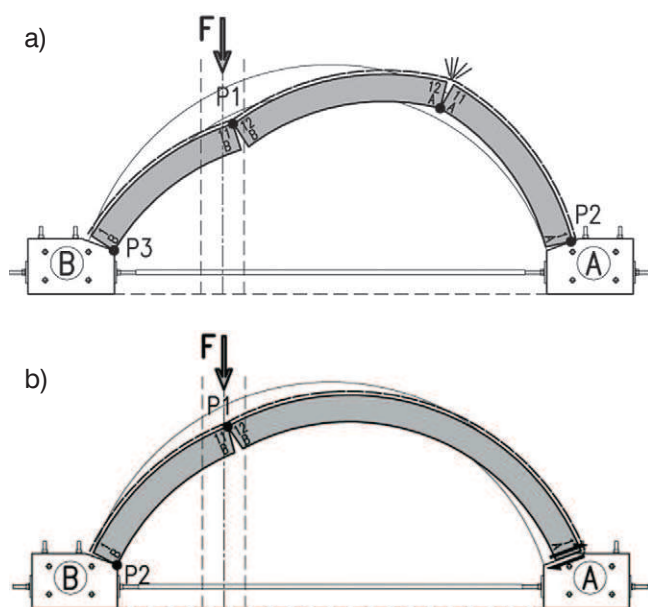
ży od stopnia zbrojenia wzmocnienia. Zniszczenie sklepien wzmocnionych siatką z włókien szklanych nastąpiło na skutek przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie we włóknach wzmocnienia. Zastosowanie mocniejszych i bardziej sztywnych siatek z włókien węglowych nie spowodowało proporcjonalnego wzrostu obciążenia niszczącego, natomiast wpłynęło na zupełną jakościową zmianę sposobu zniszczenia łuków obciążonych niesymetrycznie. Przy większym stopniu zbrojenia łuku S07W nastąpiło ścięcie/poślizg w spoinie wspornej w przypodporowym niewzmocnionym przekroju po powierzchni wezgiłowia.

Porównując wyniki badań sklepien wzmocnionych z wynikami badań przeprowadzonych na sklepieniach niewzmocnionych, dyskutowanych m.in. w [10] [11] [12], należy stwierdzić, że obecność powierzchniowego kompozytowego wzmocnienia od strony grzbietowej wyraźnie zwiększa nośność sklepien ([10] [13]). Obserwowany jest kilkukrotny przyrost nośności sklepien wzmocnionych w stosunku do nośności sklepien niewzmocnionych. Wyniki badań sklepien wzmocnionych i niewzmocnionych (S02, S04) zestawiono na rysunku 7a. Sklepienia bez wzmocnienia (S02, S04) niszczyły się w sposób gwałtowny bez wyraźnych oznak przeciążenia, na skutek przekształcenia konstrukcji w cztero-przegubowy mechanizm [10] [13]. Wzmocnienie zlokalizowane przy powierzchni grzbietowej sklepien (S02W, S03W, S09W, S07W) skutecznie zapobiegało powstawaniu przegubów przy powierzchni podniebienia na odcinku pomiędzy przekrojami przypodporowymi. Pomimo, iż zniszczenie sklepien wzmocnionych było nagłe (kruche zerwanie włókien lub ścięcie w przekroju przypodporowym), to moment zniszczenia był sygnalizowany. Poprzedzało go pojawienie się wielu rys w matrycy kompozytu.

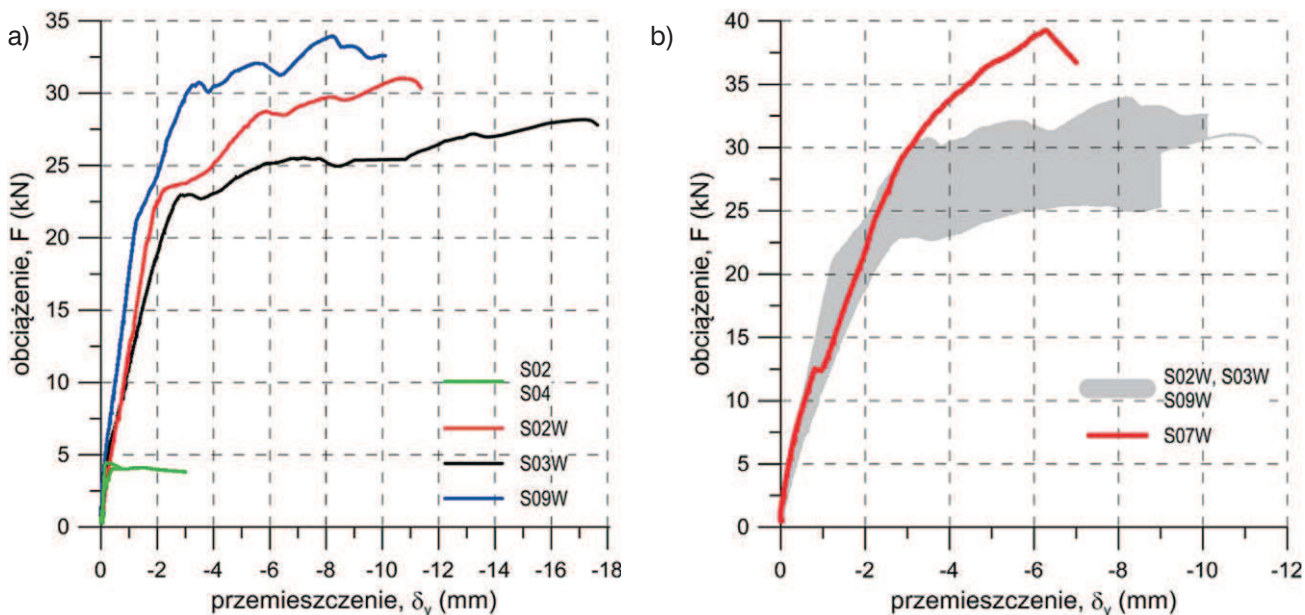
5. Podsumowanie

Wzmocnienie elementów sklepionych realizowane powierzchniowo przy zastosowaniu materiałów kompozytowych zwiększa ich nośność głównie na skutek zwiększenia nośności przekrojów poddanych działaniu sił ściskających na znacznych mimośrodach. Ograniczone zostaje rozwieranie się rys i pęknięć, nie kształtują się przeguby, co zapobiega przekształcaniu się konstrukcji w mechanizm. Poza obserwowanym w badaniach zniszczeniem na skutek przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie kompozytu lub na skutek ścięcia/poślizgu po powierzchni wezgiłowia, w literaturze opisane są inne schematy zniszczenia sklepien wzmocnionych kompozytami [4] [5] [6] [7] [11]. Postać zniszczenia sklepien wzmocnionych zależy w dużej mierze od ich geometrii oraz cech wytrzymałościowych poszczególnych materiałów.

Powierzchnia przekroju zbrojenia wzmocnienia ma istotny wpływ na postać zniszczenia sklepien. Przy wzmocnieniu zrealizowanym od strony grzbietowej i obciążeniu



Rys. 6. Schematy zniszczenia elementów: a) S03W, b) S07W; – szkice



Rys. 7. Średnie przemieszczenie pionowe mierzone w miejscu przyłożenia obciążenia (punkty pomiarowe 15 i 16): a) sklepienia wzmocnione przy powierzchni grzbietowej siatką z włókien szklanych S02W, S03W i S09W w porównaniu z elementami niewzmocnionymi S02 i S04, b) sklepienie wzmocnione przy powierzchni grzbietowej siatką z włókien węglowych S07W, w tle sklepienia wzmocnione siatką z włókien szklanych

pionowym przykładanym niesymetrycznie, zwiększanie powierzchni zbrojenia zwiększa nośność sklepień w sposób nieproporcjonalny do zmian powierzchni zbrojenia. Duży stopień zbrojenia powoduje zupełną, jakościową zmianę sposobu zniszczenia łuków obciążonych niesymetrycznie. Klasyczny schemat zniszczenia – zmiana konstrukcji w czteroprzegubowy mechanizm po zerwaniu włókien wzmocnienia – przekształca się, w wyniku braku możliwości powstania przegubu, w mechanizm poślizgowy fragmentów sklepienia w obszarze węzłowi. Podobny mechanizm może wykształcić się także pod siłą skupioną w przypadku sklepień wzmocnionych z zasypką [13]. Wyniki badań wskazują, że oprócz powierzchniowego wzmocnienia konstrukcji łuku należy rozważyć wzmocnienie stref, gdzie przewidywane jest zredukowanie przekroju przenoszącego naprężenia styczne.

Stosowane w badaniach systemy naprawcze, wykorzystujące materiały kompozytowe o matrycach mineralnych, mogą znaleźć zastosowanie przy powierzchniowym wzmocnianiu konstrukcji murowych sklepień i łuków w istniejących obiektach. Z uwagi na wykazaną w badaniach doświadczalnych skuteczność tych materiałów do wzmocniania sklepień, stanowią one alternatywę dla technik i materiałów stosowanych tradycyjnie. Przedstawione w artykule rozwiązania nie wykluczają stosowania innych metod wzmocnienia sklepień, takich jak np. ściągą, doklepanie prętów stalowych, drewniane konstrukcje podwieszające i iniekcje.

Autorzy dziękują MAPEI Polska oraz VISBUD-Projekt za bezpłatne udostępnienie materiałów do badań.

BIBLIOGRAFIA

[1] ICOMOS. Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage.” International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage, 2003
 [2] Janowski Z., Zasady diagnostyki konstrukcji murowanych w pracy rzeczoznawcy budowlanego, II Konferencja Naukowo-Techniczna Warsztat pracy rzeczoznawcy budowlanego, s. 143–160, 1996
 [3] Janowski Z., Wpływ założeń na wzmocnianie konstrukcji obiektów zabytkowych, IV Konferencja Naukowo-Techniczna Warsztat pracy rzeczoznawcy budowlanego, 1998
 [4] Valluzzi M.R., Valdemarca M., Modena C., Behavior of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates, Journal of Composites for Construction, vol. 5, nr 3, s. 163–169, 2001
 [5] Foraboschi P., Strengthening of masonry arches with Fiber-Reinforced Polymer strips, Journal of Composites for Construction, vol. 8, nr 3, s. 191–202, 2004
 [6] Briccoli Bati S., Rovero S., Tonietti U., Experimental analysis on scale models of CFRP reinforced arches, 3rd National Congress Mechanics of Masonry Structures Strengthened with Composite Materials (MuRiCo 3), s. 140–145, 2009
 [7] Oliveira D., Basilio I., Lourenco P., Experimental behavior of FRP strengthened masonry arches, Journal of Composites for Construction, vol. 14, nr 3, s. 312–322, 2010
 [8] Castori G., Borri A., Ebaugh S., Casadei P., Strengthening masonry arches with composites, Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006), 2006
 [9] Bednarz Ł., Górski A., Jasięko J., Rusiński E., Simulations and analyses of arched brick structures, Automation in Construction, vol. 20, s. 741–754, 2011
 [10] Hojdis Ł., Janowski Z., Wzmocnianie sklepień murowych siatkami z włókien szklanych, Czasopismo Techniczne, vol. 3-B, s. 71–91, 2011
 [11] Hojdis Ł., Wpływ wzmocnienia materiałami kompozytowymi sklepień murowych na ich nośność, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2010
 [12] Krajewski P., Analiza wpływu materiału zasypowego na nośność sklepień murowych, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2010
 [13] Hojdis Ł., Krajewski P., Experimental tests on strengthened and unstrengthened masonry vault with backfill, 8th Int. Conf. on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC), 2012