Łukasz Bednarz

Metody wzmacniania zabytkowych, zakrzywionych konstrukcji ceglanych

Historyczne obiekty murowanie z cegły, pod wpływem działania różnego rodzaju czynników (dodatkowe obciążenia, destrukcja konstrukcji, osiadanie podłoża, zmiana eksploatacji, zmiana stosunków wodno-gruntowych, zjawiska opóźnione) często przestają spełniać role nadane im przez konstruktorów. Bywa, że dawne rozwiązania i założenia tracą aktualność, a konstrukcje przyjmują nowe schematy statyczne. Aby zapobiec niszczeniu obiektów zabytkowych, należy stosować środki zapobiegawcze poprawiające statykę i wzmacniające budowle.

Uszkodzone i spękane łuki oraz sklepienia kościołów, pałaców, budynków bramnych, mostów i budynków mieszkalnych można ratować na wiele sposobów. Poniżej zestawiono metody wzmacniania zakrzywionych konstrukcji ceglanych. Do najczęściej spotykanych i stosowanych należą:

- zastosowanie ściągów stalowych do usztywnienia układów ścian nośnych (w tym ściągów wklejanych),
- powłoki żelbetowe,
- blachy i pręty stalowe doklejane,
- maty i taśmy CFRP,
- drewniane i stalowe konstrukcje umożliwiające podwieszenie żeber i powłok pierwotnych,
- iniekcje i impregnacje.

Praca statyczna konstrukcji zabytkowych po wzmocnieniu jest uzależniona od wielopłaszczyznowego procesu zjawisk występujących w konstrukcji wzmocnionej. Z tego względu, w odróżnieniu od konstrukcji nowo wznoszonych, analiza pracy statycznej związana jest ze sprawdzeniem trzech stanów granicznych:

- stanu granicznego nośności konstrukcji po wzmocnieniu,
- stanu granicznego użytkowania konstrukcji po wzmocnieniu,
- stanu granicznego nośności połączenia elementu wzmacnianego z elementem wzmacnianym.

1. Ściągi stalowe

W zakrzywionych konstrukcjach ceglanych najprostszym sposobem wzmocnienia jest zastosowanie dodatkowych elementów usztywniających układ murów. Wpływają one na zmniejszenie przemieszczeń murów, ograniczenie rozwoju zarysowania w powłokach i żebrach, mogą przyczynić się do przenoszenia dodatkowych sił rozciągających pojawiających się przy uszkodzeniu [1].

Stalowe stężenie ściągowe jest najczęściej spotykanym i stosowanym od dawna sposobem naprawy rozporowych konstrukcji ceglanych, jakimi są łuki i sklepienia.

Poprawne działanie stężenia stalowego w konstrukcjach zabytkowych uzależnione jest od wprowadzenia i utrzymania odpowiedniej siły w ściągu. Likwidacja pęknięć i rys osłabionych murów oraz stabilizacja i wzmocnienie konstrukcji wymaga wstępnego naprężenia. Napięcie prętów stalowych możliwe jest do siły odpowiadającej możliwościom wytrzymałościowym muru na ściskanie. Wprowadzenie odpowiedniej siły naprężającej powinno wywołać w murze taki stan naprężeń wewnętrznych, który skutecznie przeciwstawi się wpływowi działania sił zewnętrznych i zwiększy nośność oraz ogólną sztywność konstrukcji [2]. Niewłaściwe przekazanie siły ze ściągu może powodować powstawanie nowych rys. Wpływ na prawidłową pracę stalowych ściągów mają: sposób zakotwienia, odkształcenia termiczne ściągu i muru oraz pełzanie muru i relaksacja stali [3].

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Rys. 1. Krużganki wawelskie wzmocnione zastosowanymi ściągami stalowymi

Przed przystąpieniem do wzmacniania zakrzywionych konstrukcji murowych metodami wykorzystującymi ściągi stalowe należy wykonać szereg stosownych badań i obliczeń, których celem jest wyznaczenie rzeczywistych charakterystyk wzmacnianej konstrukcji murowej. Należy określić:

- wytrzymałość muru,
- strukturę muru i stopień jego niejednorodności,
- moduł sprężystości,
- oszacować zjawiska opóźnione.

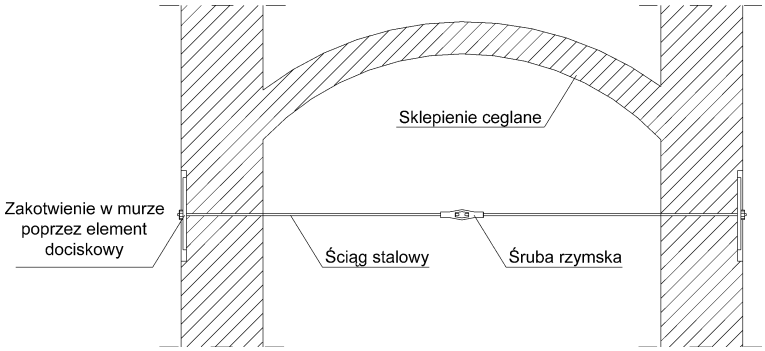
Ogólne zasady obliczania sprężanych konstrukcji murowych są identyczne jak dla konstrukcji betonowych. Różnice wynikają ze specyficznych własności muru, takich jak właściwości anizotropowe i silny wpływ efektu skali.

Norma Eurocode 6 zaleca między innymi, aby przy obliczaniu murów (sprężonych) rozpatrywać kolejno SGU, a następnie SGN. Przyjęte w Eurocode 6 zasady i zalecenia mają charakter ogólny, a poza tym dotyczą projektowania nowych konstrukcji i stąd nie mogą być bezkrytycznie zaakceptowane w projektowaniu i obliczaniu wzmocnień istniejących konstrukcji murowych.

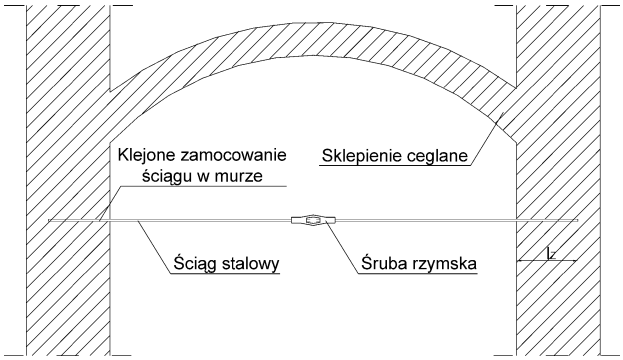
Analizując obliczeniowo wzmocnienie konstrukcji murowej ściągami należy rozwiązać następujące zagadnienia:

- oszacowanie parametrów mechanicznych muru,
- przyjęcie określonego rodzaju stali oraz technologii kotwienia i sprężania,
- określenie wielkości siły sprężającej z uwzględnieniem strat doraźnych i reologicznych,
- zapewnienie właściwego przeniesienia sił od naprężenia ściągu na mur poprzez odpowiednio ukształtowane i powiązane z konstrukcją murową elementy.

Bezpieczne przenoszenie siły ze ściągu na konstrukcję murową związane jest przede wszystkim z prawidłowym rozmieszczeniem ściągów i odpowiednim przygotowaniem fragmentu muru. Zasadą przy stężaniu istniejących konstrukcji murowych jest przekazanie sił od ściągu na możliwie dużą powierzchnię muru. Związane jest to z niską punktową wytrzymałością muru ceglanego na ściskanie. Istotne jest to zwłaszcza w obiektach zabytkowych,



Rys. 2. Zakotwienie ściągu stalowego poprzez zastosowanie elementu dociskowego



Rys. 3. Ściąg stalowy wklejony w mur

w których mury charakteryzują się często niewielką wytrzymałością i znaczną niejednorodnością.

Klasycznym sposobem zamocowania ściągu stalowego jest zakotwienie go poprzez element dociskowy w murze. Ostatnie lata przyniosły również inne rozwiązanie, kotwienie stalowych ściągów poprzez ich wklejanie. Jest to sposób o tyle interesujący, że pozwala ominąć ograniczenia związane z ingerencją w elewację obiektu zabytkowego, umożliwia swobodny dostęp do różnych miejsc obiektu od jego wnętrza oraz skrócenie czasu montażu i obniżenie kosztów całego przedsięwzięcia [4].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Na podstawie badań przeprowadzonych w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej oraz prób wdrożeniowych na wybranych obiektach zabytkowych (klasztor Cystersów w Lubiążu) można stwierdzić, że wklejane ściągi stalowe są przydatne do wzmacniania konstrukcji murowych obiektów zabytkowych.

W pracy [5] przedstawiono opis i czynniki badań połączenia klejowego „mur ceglany – pręt stalowy" oraz badań przyczepności różnych klejów i zapraw epoksydowych do podłoża ceglanego. Równocześnie przeprowadzono badania uzupełniające cech fizykomechanicznych wszystkich łączonych elementów. Szczegółowo analizowano odkształcenia w połączeniu, a na ich podstawie obliczono naprężenia normalne w pręcie stalowym oraz naprężenia styczne w spoinie klejowej. Na modelach realizowano próbę rozciągania, różnicując długość zakotwienia (wklejenia) l_Z w celu uzyskania różnych obrazów zniszczenia połączeń.

Model zaproponowany przez autorów badań z Instytutu Budownictwa zbliża się swoimi wynikami do rzeczywistych rozkładów naprężeń, np. spełnia podstawowy warunek zerowej wartości naprężeń ścinających w spoinie na obciążonym końcu połączenia [5].

Po analizie wyników badań doświadczalnych i uwzględnieniu warunków brzegowych zaproponowano następujące zależności określające rozkład naprężeń ścinających $\tau_k(x)$ w spoinie klejowej oraz naprężeń normalnych $\sigma_s(x)$ w pręcie stalowym:

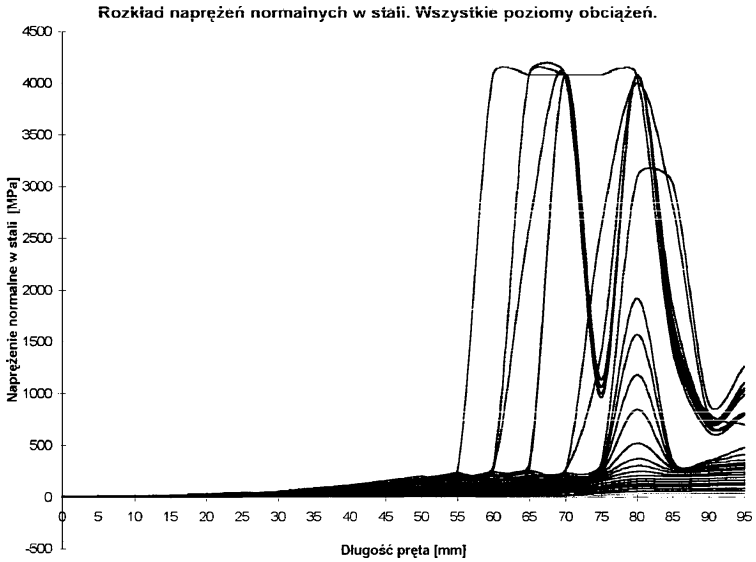
$$\tau_k(x) = x\frac{d_p^2 E_s R_t \pi}{l_Z E_m A_m}\cdot e^{-2^2\frac{d_p E_s A_s R_t \pi}{l_Z E_m A_m F}}$$

$$\sigma_s(x) = \frac{F}{A_s}\cdot e^{-2^2\frac{d_p E_s A_s R_t \pi}{l_Z E_m A_m F}}$$

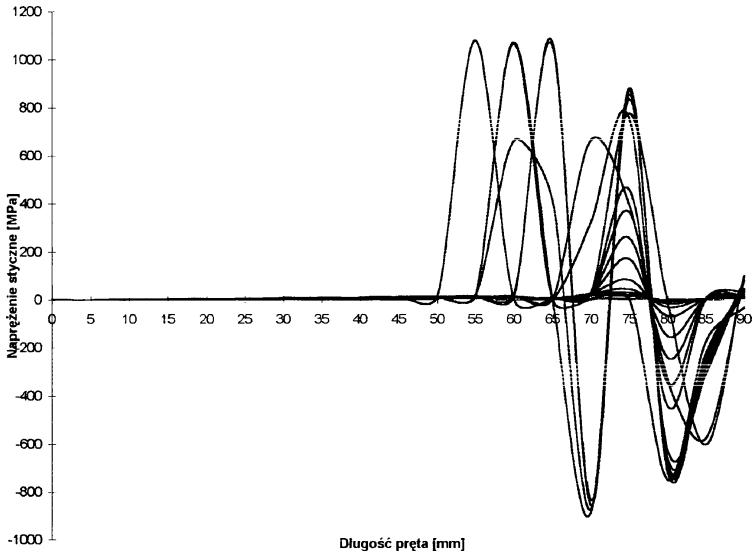
gdzie:
- A_m – współpracująca powierzchnia przekroju,
- A_s – powierzchnia przekroju pręta,
- E_m – moduł Younga dla muru,
- E_s – moduł Younga dla stali,
- F – siła wyrywająca pręt,
- R_t – średnia wytrzymałość na ścinanie najsłabszego ogniwa połączenia,
- d_p – średnica pręta,
- l_Z – długość zakotwienia pręta w murze.

Powyższe wzory na rozkład naprężeń normalnych σ_s w pręcie stalowym oraz naprężeń ścinających τ_k w spoinie pozwalają na szacunkowe określenie dwóch modeli zniszczenia próbki w stosunku do wartości siły wyrywającej. Możliwe do osiągnięcia modele zniszczenia to:
- wykorzystanie nośności pręta (zerwanie),
- wykorzystanie nośności spoiny klejowej lub nośności na ścinanie muru.

Na podstawie porównania nośności doświadczalnych z teoretycznymi autorzy opracowania zakładają, że w połączeniu klejowym „pręt stalowy – mur ceglany" przy niepełnym wykorzystaniu no-



Rys. 4. Rozkład naprężeń normalnych $\sigma_s(x)$ w stali. Wszystkie poziomy obciążeń.



Rys. 5. Rozkład naprężeń stycznych $\tau_k(x)$ w spoinie klejowej. Wszystkie poziomy obciążeń.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

śności pręta słuszne jest przyjęcie powierzchni ścinania na styku „spoina klejowa – mur" [6].

Technologia stalowych prętów wklejanych może być z powodzeniem przeniesiona na zespalanie spękanych części, np. nadproży łukowych (w połączeniu z iniekcją spękań) czy realizację połączeń pomiędzy wzmacnianą powłoką sklepienia (żebrem) a nową konstrukcją wzmacniającą.

2. Powłoki żelbetowe

Innym sposobem wzmacniania ceglanych sklepień jest zastosowanie cienkościennej powłoki żelbetowej umiejscowionej na grzbietowej ich stronie, kotwionej w ścianach obwodowych.

Ze względu na występujące często w konstrukcjach zabytkowych polichromie, wzmocnienie sklepienia następuje przez jego podwieszenie i zespolenie z powłoką żelbetową, opartą na ścianach obiektu najczęściej za pośrednictwem wieńca obwodowego.

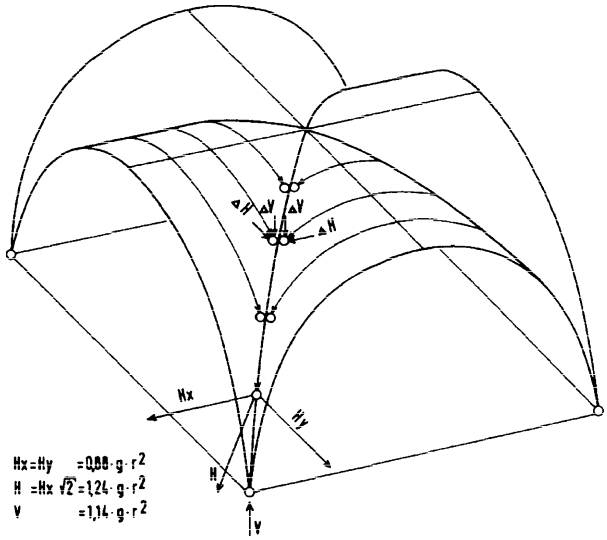
Sposób zazbrojenia powłoki należy wykonać stosując użebrowanie, zgodnie z zasadami projektowania konstrukcji żelbetowych, z uwzględnieniem występujących sił przekrojowych.

Najszybszym sposobem wykonania powłoki żelbetowej nad sklepieniem jest zastosowanie betonu natryskowego (torkretu). Aby zapewnić odpowiednią współpracę konstrukcji istniejącej ze wzmocnieniem, należy opracować odpowiedni system połączeń. Ciekawym rozwiązaniem jest podwieszenie historycznego sklepienia ceglanego do powłoki żelbetowej za pośrednictwem stalowych łączników (strzemion) wklejonych w spoiny pionowe między cegłami sklepienia przy użyciu kleju epoksydowego [8]. Dla lepszego zespolenia powłoki wzmacniającej z istniejącym sklepieniem należy starannie oczyścić grzbietową powierzchnię sklepienia z zaprawy, luźnych fragmentów zasypki, usunięcie zaprawy ze spoin na głębokość nie większą niż 10 mm i zastosowanie tzw. warstwy szczepnej.

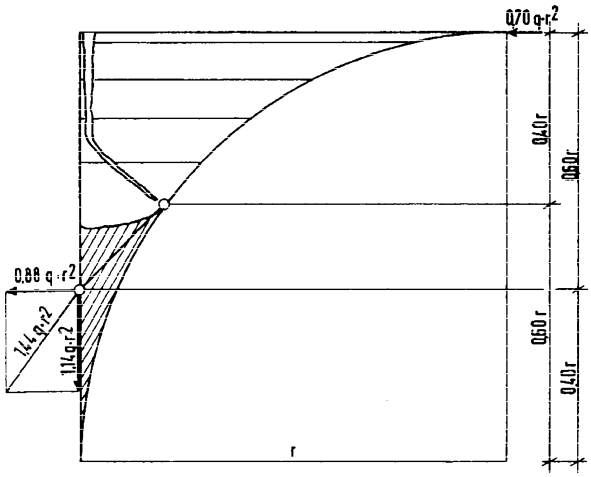
Aby poprawnie zastosować taką formę wzmocnienia, należy wykonać niezbędne obliczenia statyczno-wytrzymałościowe obiektu. Prawidłowo zamodelowana istniejąca konstrukcja murowa pozwala na znaczne uproszczenia. W obliczeniach można posłużyć się następującymi metodami szacowania nośności:

Metoda Piepera

Sklepienia składają się wg [1] z dwóch elementów konstrukcyjnych: żeber nośnych i wysklepek, które są rozpięte między nimi. Pojęcie pracy statycznej zakrzywionych konstrukcji ceglanych wg tej metody sprowadza się do analizy rozkładu sił



Rys. 6. Schemat statyczny sklepienia wg metody Piepera



Rys. 7. Schemat zarysowania sklepienia wg Piepera

wewnętrznych w żebrach, a wysklepki są tylko elementami przekazującymi obciążenia z całej powierzchni sklepień. W schemacie statycznym żebra i wyodrębnione pasma łukowe z wysklepek traktuje się jako łuki trójprzegubowe [1].

Metoda bezmomentowa Heymana

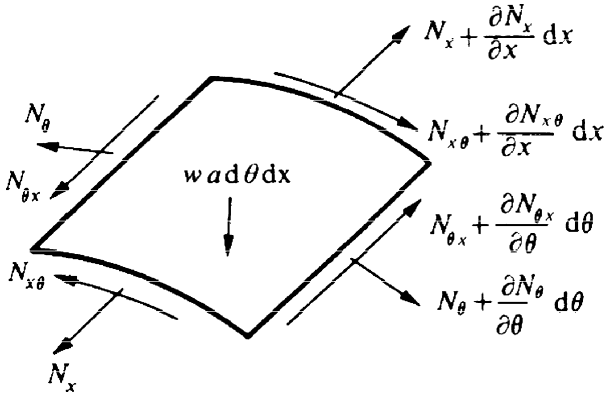
Autor opracowania zakłada, że kopuły i sklepienia są membranami (błonami), które można opisać matematycznie za pomocą krzywych tworzących łuki z ich powierzchni, co w dużym stopniu ułatwia analizę statyczną zakrzywionych konstrukcji. Teoria opiera się na założeniu, że konstrukcje takie pracują pierwotnie w stanie bezmomentowym [7].

Do określenia sił powstających w sklepieniu posłużono się następującymi zależnościami:

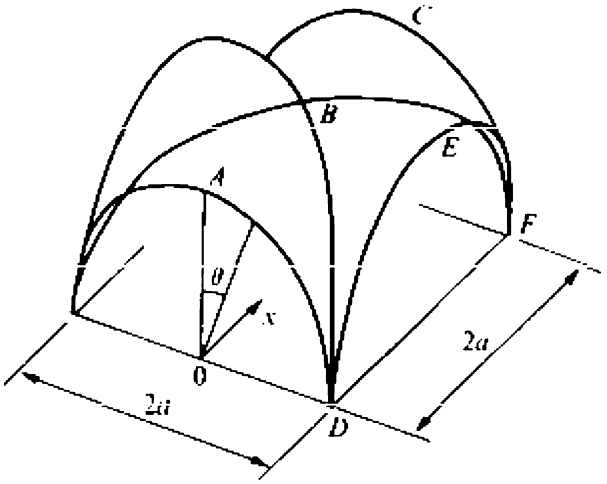
$$N_\theta = -wa\cos\theta$$

$$N_{x\theta} = -2wx\sin\theta$$

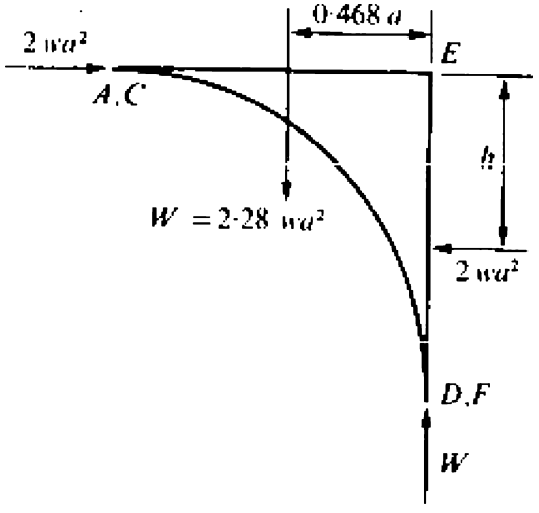
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 8. Rozkład sił w powłoce



Rys. 9. Model sklepienia żebrowego



Rys. 10. Optymalny rozkład sił w sklepieniu

$$N_x = \frac{wx^2}{a}\cos\theta + f(\theta)$$

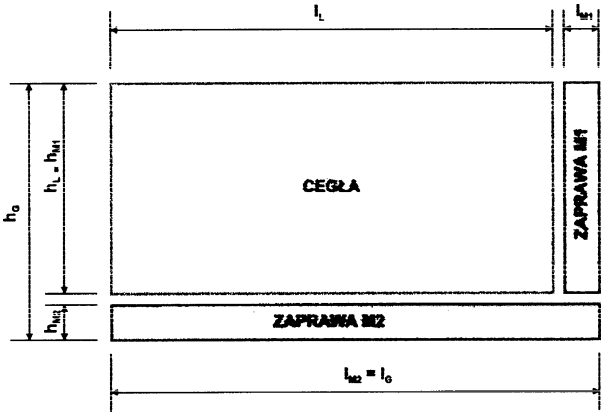
Metodę bezmomentową (błonową) w obliczeniach statycznych wykorzystano w analizie sklepienia kościoła Przemienienia Pańskiego w Poznaniu [8]. Sklepienie znajduje się obecnie w złym stanie i grozi zawaleniem. Obserwowane uszkodzenia wskazują na obniżenie się środkowego pasma sklepienia powstałe prawdopodobnie na skutek poziomego przesunięcia podpór, starzenia materiału lub przeciążenia oraz znacznego odkształcenia żeber na granicy obniżonego pasma. W prawidłowo ukształtowanym sklepieniu występują wyłącznie naprężenia ściskające. W przypadku analizowanego sklepienia, w środkowej części, pojawiają się naprężenia rozciągające, co prowadzi do zarysowania przekroju, a ostatecznie do zniszczenia [8].

Metoda elementów skończonych (MES)

Metoda elementów skończonych (MES) jest obecnie powszechnie stosowanym narzędziem obliczeń inżynierskich. Głównym problemem, jaki należy pokonać przy modelowaniu zakrzywionych konstrukcji murowych, jest przyjęcie sposobu modelowania. Dla dużych modeli numerycznych, takich jak cały budynek czy jego znaczna część, stosuje się analizę na poziomie ogólnym określaną jako makromodelowanie. Podejście takie wymaga przyjęcia ujednoliconego, zhomogenizowanego ośrodka zastępczego, będącego uproszczeniem rzeczywistego układu muru. Takie rozwiązanie proponują: Lopez J. [9], Oller S. [9], Onate E. [9], Lubliner J. [9]. Zaproponowana przez autorów metoda modelowania konstrukcji murowych polega na przyjęciu homogenizowanego modelu muru. Podstawowe założenia to:

– wysokość i szerokość podstawowego elementu jest duża w porównaniu do jej grubości, co pozwala założyć płaski stan naprężeń w ich płaszczyźnie,
– układ jednostek murowych i spoin może być traktowany jako ortotropowy.

Model ten bazuje na założeniach zgodności odkształceń i warunkach równowagi „modelowej



Rys. 11. Modelowa komórka ośrodka muru

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

komórki" ośrodka murowego dla różnych przypadków obciążenia. Związek konstytutywny sformułowany jest na bazie równań równowagi i zgodności odkształceń. Równania te określa się dla każdego przypadku deformacji modelowej komórki. Następnie, korzystając z równań konstytutywnych każdego ze składowych modelowej komórki muru, otrzymujemy wyrażenia pozwalające opisać zależności pomiędzy naprężeniami i odkształceniami już jako zhomogenizowane parametry mechaniczne.

3. Blachy i pręty stalowe doklejane

Technika klejenia umożliwia wzmacnianie zakrzywionych konstrukcji ceglanych poprzez doklejenie za pomocą klejów na bazie żywic syntetycznych zewnętrznego zbrojenia w postaci blach i prętów stalowych. Od wielu lat, z powodzeniem, stosuje się tego rodzaju wzmocnienia w konstrukcjach żelbetowych i drewnianych [10].

Zbrojenie blachami lub prętami stalowymi jest sposobem wzmacniania, mającym na celu zwiększenie nośności i sztywności zakrzywionej konstrukcji murowej przy zachowaniu możliwie małej wysokości przekroju po wzmocnieniu.

Ważne jest odpowiednie przygotowanie stali przed klejeniem, najlepiej przez piaskowanie. Piaskowanie daje największe rozwinięcie powierzchni kontaktowej i zabieg ten jest zalecany w przygotowaniu elementów stalowych do klejenia. Dobrą współpracę i trwałość połączenia konstrukcji murowej i zbrojenia zapewniają kleje epoksydowe. Odpowiednie dobranie materiału sklejającego jest kluczowym elementem takiego połączenia, gdyż zadaniem kleju właśnie jest zapewnienie współpracy między łączonymi elementami. Płaskowniki stalowe współpracują z zakrzywionymi powłokami ceglanymi jedynie dzięki siłom adhezji kompozycji klejowej. Siły te umożliwiają umonolitycznienie połączenia obu materiałów oraz przeniesienie przez zastosowane zewnętrzne elementy wzmacniające dodatkowego obciążenia.

Przy wykonywaniu wzmocnień należy zapewnić dość rozbudowaną powierzchnię klejenia, a pasma należy kotwić w strefie gromadzenia się imperfekcji i spiętrzenia naprężeń stycznych, zwłaszcza na końcach. Siła rozwarstwiająca powstająca przez wzrost naprężeń stycznych pomiędzy konstrukcją murową a elementem doklejanym prowadzi do niezachowania trzeciego, umownego stanu granicznego nośności połączenia elementu wzmacnianego z elementem wzmacnianym.

Badania potwierdzają, że prawidłowo zaprojektowane i wykonane wzmocnienie wklejanymi elementami stalowymi przyczynia się do znacznego zmniejszenia ugięć badanych elementów i spadku odkształceń. Zaletą tej metody jest to, że nieznacznie zwiększając ciężar zakrzywionego elementu murowego można wyraźnie zwiększyć jego nośność oraz ograniczyć ugięcia.

Wadą doklejanego zbrojenia stalowego jest podatność na korozję oraz duży współczynnik rozszerzalności termicznej. Szczególnie ważny jest to problem, gdy wzmacniane elementy wystawione są na działanie promieni słonecznych.

4. Maty i taśmy FRP

Specyfika historycznych konstrukcji budowlanych sprawia, że w konserwacji obiektów zabytkowych z dużą ostrożnością należy podchodzić do niezweryfikowanych w czasie nowoczesnych, zaawansowanych technologicznie technik i materiałów. Współczesne doktryny konserwacji zabytków pozwalają czasem na zastosowanie materiałów i metod wymagających dużych nakładów i bardziej rozwiniętych technologicznie.

Rys. 12. Wzmacnianie żeber sklepień ceglanych w bazylice św. Franciszka w Asyżu za pomocą włókien węglowych

Nowością ostatnich lat jest zastosowanie doklejanego zbrojenia zewnętrznego w postaci taśm i mat ze wzmocnionych kompozytów włóknistych (FRP – fibre reinforcement polimer). Spośród stosowanych 4 rodzajów typów włókien polimerowych (poliestrowe, aramidowe, szklane i węglowe) przy ratowaniu ceglanych obiektów zabytkowych zastosowanie znajdują włókna szklane i węglowe.

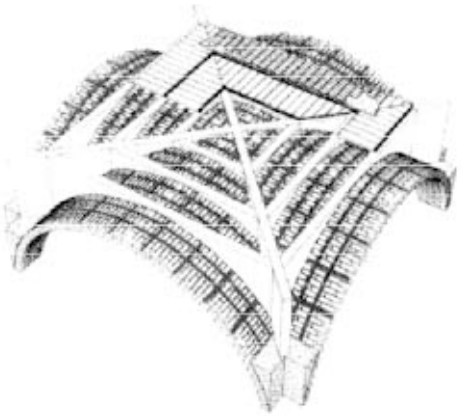
Jeśli istotne jest podniesienie nośności elementu przy jednoczesnym ograniczeniu odkształceń, należy zastosować wzmocnienie z włókien węglowych. Wykazują one bardzo dużą odporność zmęczeniową oraz odporność na zjawiska relaksacji.

Maty z włókna szklanego (maty polipropylenowe) mają zdolność kompensacji odkształcalności konstrukcji. Dzięki niskiemu współczynnikowi

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

sprężystości i odpowiedniemu ukształtowaniu mat, pozwalają na duże odkształcenie bez gwałtownego narastania sił i naprężeń przekazywanych na podłoże. Dzięki takim właściwościom mogą być stosowane na słabych podłożach, o małej przyczepności na odrywanie np. jako podkład pod taśmy z włókiem węglowych lub wyprawy z zapraw cementowych czy wapiennych. Takie łączone sposoby wzmacniania najlepiej spełniają swoją rolę w zabytkowych, zakrzywionych konstrukcjach ceglanych. Na słabym podłożu stosuje się maty z włókna szklanego, a na kierunkach działania głównych sił i elementach nośnych (np. żebra) stosuje się taśmy lub maty z włókna węglowego.

Pomimo wielu zalet (mały ciężar, dostosowanie do kształtu wzmacnianego zakrzywionego elementu, krótki czas wykonania, odporność na korozję, starzenie i warunki atmosferyczne) należy

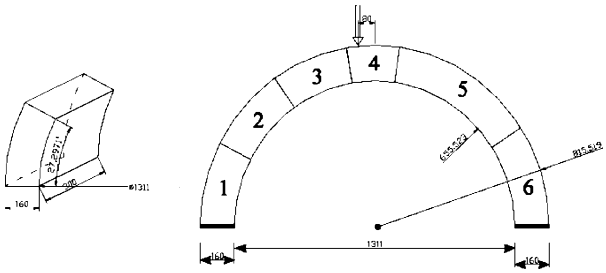


Rys. 13. Schemat wzmocnienia sklepienia bazyliki św. Franciszka w Asyżu taśmami z włókna węglowego (na podstawie materiałów firmy Ombran)

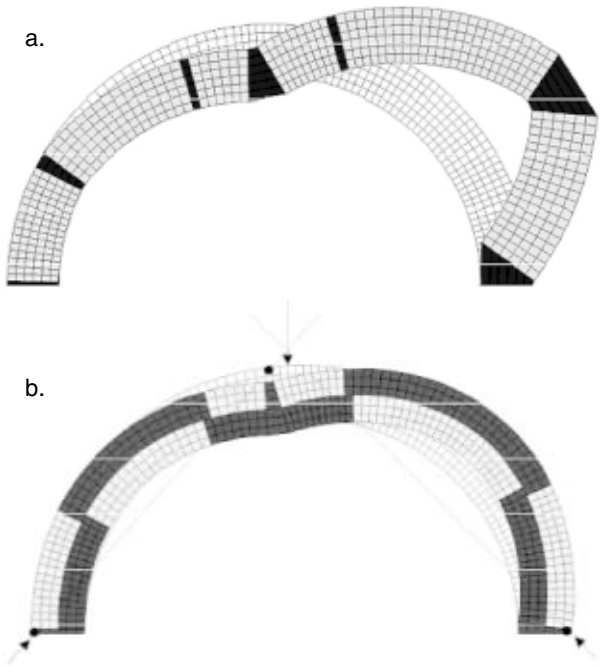
pamiętać, aby szczegółowo przeanalizować sposób klejenia i rodzaj zastosowanych mat. Niewłaściwe użycie, nieuwzględnienie praw statyki i fizyki budowli może wiązać się ze zniszczeniem obiektu o znacznych walorach architektonicznych i kulturowych [11].

Autorzy wielu opracowań zauważają tendencje ostatnich lat związane ze wzrostem zainteresowania zastosowaniem taśm CFRP do wzmacniania zakrzywionych konstrukcji ceglanych. Skuteczność wzmocnienia taśmami CFRP jest potwierdzona przez doświadczenia na obiektach wykonanych w skali rzeczywistej [12] – niewzmocnionych i wzmocnionych włóknami węglowymi. Ponadto, zastosowana metoda numeryczna potwierdza wykonane doświadczenia [12].

Badania wskazują na skuteczność zastosowania taśm CFRP do wzmacniania zakrzywionych kon-



Rys. 14. Geometria łuku i pojedynczego bloku



Rys. 15. Porównanie deformacji łuku niewzmocnionego (a) i wzmocnionego (b)

strukcji ceglanych. W analizowanych przypadkach, nośność łuku wzrastała znacznie – o około 1000%. Ponadto stwierdzono, że metody numeryczne potwierdzają wyniki badań laboratoryjnych i są przydatne do przewidywania zachowania nie wzmocnionych i wzmocnionych konstrukcji łukowych [12].

5. Drewniane i stalowe konstrukcje umożliwiające podwieszenie żeber i powłok pierwotnych

Kolejnym z przedstawianych sposobów naprawy ceglanych konstrukcji zakrzywionych jest wzmocnienie przez zastosowanie nowej konstrukcji nośnej, podobnie jak w rozwiązaniu z powłoką żelbetową. Tu jednak spotykamy się ze znacznie ciekawszymi problemami. Zakrzywione, do kształtu sklepienia, drewniane belki przenoszą znacznie mniejsze siły niż powłoka żelbetowa. Można tu za-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

stosować klejone dźwigary drewniane, mogące przenosić znaczne obciążenia. Połączenie takiego rozwiązania ze wzmocnieniem taśmami CFRP daje większe korzyści niż powłoka żelbetowa. Wzmacniająca konstrukcja jest wielokrotnie lżejsza, korzystniej dostosowuje się do panujących nad sklepieniami warunków, niweluje wpływy zagadnień fizyki budowli na prace konstrukcji po wzmocnieniu.

Rys. 16, 17. Zastosowanie grzbietowych, drewnianych żeber wzmacniających ceglane sklepienie w bazylice św. Franciszka w Asyżu

Podstawowym problemem pojawiającym się w tego typu rozwiązaniach jest zapewnienie rozbudowanej powierzchni klejenia i rozwiązanie problemów związanych z naprężeniami stycznymi pojawiającymi się na styku uszkodzonej, zakrzywionej konstrukcji murowej z pasmami doklejanych dźwigarów drewnianych, oraz ewentualnych wklejanych łączników stalowych. W tym rozwiązaniu również siła rozwarstwiająca powstająca przez wzrost naprężeń stycznych pomiędzy konstrukcją murową a elementem doklejanym może prowadzić do niezachowania trzeciego, umownego, stanu granicznego nośności połączenia elementu wzmacnianego z elementem wzmacnianym.

Niestety metoda ta nie została dokładnie opisana pod względem wykonawczym i naukowym w dostępnej literaturze fachowej.

Możliwe jest w tej filozofii wzmacniania zastosowanie nowych, lekkich kratowych konstrukcji stalowych.

6. Iniekcje

Regeneracja i wzmacnianie uszkodzonych lub nadwątlonych elementów konstrukcyjnych zabytku jest częścią ogólnego programu konserwatorskiego prac technicznych wiążących się ściśle z zagadnieniami wchodzącymi w zakres stabilizacji i konsolidacji konstrukcji. Prace te stanowią najczęściej jedno z ważniejszych i najbardziej istotnych przedsięwzięć w dziedzinie utrwalania zabytku. Wzmacnianie i regeneracja mają na celu przywrócenie układom konstrukcyjnym zdolności do spełniania określonych funkcji użytkowych, podniesienie ich statyczno-wytrzymałościowych wartości i uodpornienie na procesy niszczące.

Tak więc, kolejnym sposobem na wzmocnienie zakrzywionych konstrukcji ceglanych jest iniekcja. Metoda iniekcji zwiększa nośność, uszczelnia i zamyka dostęp szkodliwych czynników, zwłaszcza wilgoci i agresywnych gazów do wnętrza murów. Regeneracja układów sklepień murowych za pomocą iniekcji stanowi zabieg bardzo delikatny i wymaga przeprowadzenia szeregu czynności wstępnych, z których dobór składników wypełniacza i jego konsystencji jest najistotniejszy.

We współczesnej praktyce możliwe jest zastosowanie trzech metod wzmacniania zakrzywionych konstrukcji murowych:

- iniekcji grawitacyjnej, polegającej na tym, że wypełniacz wprowadza się do szczelin grawitacyjnie za pomocą węży gumowych, które są połączone ze zbiornikiem położonym wyżej niż miejsce wzmacniane,
- ciśnieniowej, przy której wypełniacz jest wtłaczany w mur za pomocą specjalnego agregatu,
- próżniowej, wprowadzającej wypełniacz w konstrukcję murową na zasadzie podciśnienia wytworzonego przez agregat próżniowy.

Sam iniekt wprowadzony w konstrukcję murową ma zapewnić uszczelnienie i scalenie części muru ceglanego. Choć na ogół iniekty powinny być stosowane jako uzupełnienie głównego wzmocnienia i uszczelnienie, to w wyjątkowych przypadkach są stosowane jako samodzielne wzmocnienie przenoszące obciążenia wywołujące ściskanie lub ścinanie w rysie. Iniekcje nie eliminują przyczyn uszkodzenia konstrukcji i mogą być stosowane tylko wtedy, gdy proces uszkodzenia się ustabilizował.

Preparaty, aby mogły być stosowane do wzmacniania zakrzywionych konstrukcji murowych, po-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

winny spełniać kilka warunków. Wśród najważniejszych należy wymienić następujące:

- powinny to być roztwory o niskiej lepkości, aby mogły szybko na drodze kapilarnej wznosić się w materiałach nawet o bardzo małych średnicach porów,
- roztwory te nie mogą w najmniejszym stopniu oddziaływać chemicznie z minerałami ilastymi cegieł i składnikami zapraw,
- wprowadzony w pory preparat musi rozkładać się równomiernie w całej strukturze wzmocnionego materiału,
- wzmocnienie nie może powodować jakichkolwiek zmian w estetycznym odbiorze obiektu (zmiany barwy, plamy, wykwity),
- preparat wzmacniający, oprócz poprawy właściwości mechanicznych, musi chronić konstrukcję przed dalszym niszczeniem i sam nie może ulegać procesom destrukcyjnym.

W zależności od typu konstrukcji, jej wieku oraz stopnia uszkodzenia stosuje się różnego rodzaju mieszanki iniekcyjne. Muszą one mieć dostateczny okres urabialności, odpowiednią lepkość, niski skurcz, wiązać w określonym zakresie temperatur, zapewnić odpowiednią przyczepność do łączonych elementów murowych oraz mieć odpowiednią wytrzymałość.

Iniekty można podzielić na mineralne (cementowe, mikrocementowe, gipsowe, gipsowo-wapienne) oraz z tworzyw sztucznych (epoksydowe, poliuretanowe) [3].

Iniekty mineralne, choć tańsze, nie zawsze nadają się do konstrukcji zabytkowych za względu na możliwość reakcji iniektu ze starą zaprawą oraz możliwość pęcznienia i wprowadzenia dodatkowych sił w konstrukcji.

Iniekty epoksydowe, choć oparte na drogich żywicach syntetycznych, można dostosować do każdego rodzaju konstrukcji murowej i uzyskać oczekiwane cechy [11].

Przedstawione powyżej metody wzmacniania i naprawy zakrzywionych konstrukcji ceglanych z reguły występują łącznie. Często dopiero połączenie ich daje oczekiwane efekty. Należy pamiętać, że każda z metod wymaga szczegółowej analizy zastosowania do danego rodzaju konstrukcji zarówno ze względu na powiązanie materiałowe, jak ze względu na dostępną przestrzeń nad konstrukcją wzmacnianą. Zasadniczą sprawą jest dobór metody ściśle uwzględniający zakładane parametry pracy statycznej konstrukcji po wzmocnieniu oraz defekty konstrukcji przed wzmocnieniem.

Literatura

1. Pieper K., *Sicherung historischer Bauten,* Berlin – Monachium, 1983
2. Minch M., Trochanowski A., *Wybrane zagadnienia wzmocnienia zabytkowego pałacu w Dobrzycy*, VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy remontowe w budownictwie", Wrocław – Szklarska Poręba, 1996
3. Małyszko L., Orłowicz R., *Konstrukcje murowe. Zarysowania i naprawy*. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn, 2000
4. Jasieńko J., Minch M., Trochanowski A., *Wybrane problemy badania stalowych ściągów wklejanych w mur na przykładzie budynku klasztoru w Lubiążu,* VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy remontowe w budownictwie", Wrocław – Szklarska Poręba, 1996
5. Marek A., *Połączenia klejowe we wzmacnianiu struktur obiektów zabytkowych – analiza optymalnych ekonomicznie rozwiązań*, praca magisterska Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej wykonana pod kierunkiem dr. hab. inż. J. Jasieńki
6. Jasieńko J., *Praca połączenia klejonego: mur ceglany – pręt stalowy w świetle zastosowań od usztywnienia układów ścian konstrukcyjnych budynków murowanych z cegły,* Raport Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997
7. Heyman J., *Equilibrium of shell structures*, Oxford, 1977
8. Jasieńko J., Rapp P., *Wzmocnienie konstrukcji sklepienia nad nawą kościoła Przemienienia Pańskiego w Poznaniu,* Wiadomości Konserwatorskie, 13/2003
9. Lopez J., Oller S., Onate E., Lubliner J., *A homogeneous constitutive model for masonry*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 46, 1999
10. Jasieńko J., *Wybrane zagadnienia naprawy i wzmacniania drewnianych belek zginanych,* Konferencja Naukowo – Techniczna „Awarie Budowlane", Szczecin, 1996
11. Materiały informacyjne firm: S&R Reinforcement Company, Sika, Hilti, Deitermann, STO-ISPO
12. Luciano R., Marfia S., Sacco E., *Reinforcement of masonry arches by FRP materials: experimental tests and numerical investigations*, International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong, China, 2001

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ