

# Badania wytrzymałości na ściskanie filarów murowych wzmocnianych w spoinach wspornych przy użyciu splotów włókien PBO

## Cel i zakres badań

Filary murowe, obok ścian, łuków czy kopuł, są podstawowym elementem nośnym w konstrukcjach historycznych. Postępująca degradacja lub zmiany funkcji i obciążeń w tych obiektach mogą powodować konieczność przeprowadzenia zabiegów naprawy lub wzmocnienia substancji historycznej.

Tradycyjne metody w większości nie spełniają podstawowych wymagań związanych z doktrynami konserwatorskimi mówiącymi o minimum ingerencji oraz o odwracalności działań, w związku z tym od blisko dwóch dekad rozwijane są współczesne metody oparte m.in. na zastosowaniu metod naprawczych FRCM, w tym przypadku polegających na ograniczeniu odkształcalności poprzecznej zaprawy poprzez jej skrępowanie w spoinach wspornych.

W laboratorium Politechniki Wrocławskiej przeprowadzono badania filarów murowanych z cegieł pełnych na zaprawie wapiennej o charakterystykach zbliżonych do zapraw historycznych. W pracach analizowano wpływ zastosowania wzmocnień przy użyciu splotów włókien PBO-JOINT marki Ruregold o średnicy 3 mm w spoinach wspornych na pracę statyczną filarów ściskanych.

Do wykonania modeli badawczych użyto cegły pełne oraz zaprawę na bazie

naturalnego wapna hydraulicznego o klasie M2,5 po 90 dniach. Przekrój poprzeczny próbek był kwadratowy o długości boku 38 cm (1,5 cegły). Przygotowano modele *krepe* o wysokości 51 cm oraz *smukłe* o wysokości 201,5 cm, przy czym wysokość spoin wspornych była równa 15 mm. Obciążenie modeli było realizowane przy użyciu prasy hydraulicznej o nośności 6000 kN.

## Stanowiska badawcze

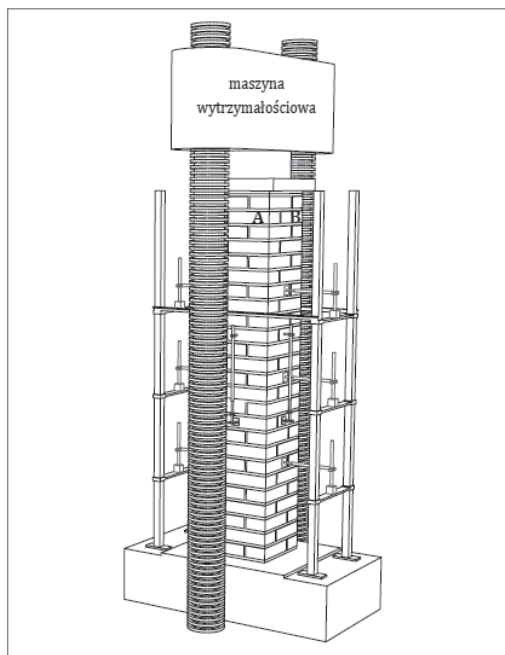
Badania filarów *krepych* oraz *smukłych* prowadzono poprzez ich ściskanie przy użyciu prasy hydraulicznej, wykonując równocześnie szereg pomiarów odkształceń. Przemieszczenia filarów mierzono przy użyciu czujników indukcyjnych. Przykładowe stanowisko badawcze filarów *smukłych* przedstawiono na rys. 1.

## Metoda wzmocniania

Po upływie czasu wiązania zaprawy usunięto w pierwszej kolejności we wszystkich spoinach wspornych zewnętrzną warstwę zaprawy. Bruzdy oczyszczono z pyłu oraz luźnych cząstek zaprawy, które powstały podczas wycinania. Na tak przygotowaną powierzchnię spoiny nałożono warstwę preparatu gruntującego z piaskiem kwarcowym. Następnie zaaplikowano zaprawę systemową MX-JOINT marki Ruregold w zagruntowanej spoinie wspornej, nakładając pierwszą warstwę. W umieszczoną zaprawę wklejono dewiatory w narożach, których zadaniem było niwelowanie wpływu koncentracji naprężeń. Przed aplikacją włókien PBO wykonano impregnację splotu rozcieńczoną zaprawą o konsystencji zawiesiny. Zaimpregnowane włókna umieszczono w spoinie (rys. 2), prowadząc po kolejnych płaskownikach w narożach, utrzymując naciąg oraz z wykonaniem zakładu, a następnie bezzwłocznie wykonano drugą warstwę zaprawy i ostatecznie wykonano spoinowanie zaprawą wapienną, aby uzyskać efekt wizualny zbliżony do próbek porównawczych.

## Praca statyczna filarów wzmocnionych

Średnia wartość granicznych naprężeń ściskających dla *krepych* filarów porównawczych wynosiła 9,84 MPa, przy czym zarysowanie obserwowano przy poziomie naprężeń średnio 7,10 MPa. Jeden z badanych filarów



Rys. 1. Stanowisko badawcze filarów smukłych

*krępych*, wzmocniany przy użyciu włókien PBO, nie przejawiał oznak zarysowania do osiągnięcia siły powyżej 2000 kN (ok. 14 MPa). Wzrost obciążenia prowadził do rozwoju rys pionowych w ceglach.

W badaniach filarów *smukłych* graniczne naprężenie ściskające próbek porównawczych wynosiło 5,01 MPa, natomiast zarysowanie następowało, gdy naprężenia osiągały wartość 3,50 MPa.

Przykładowo, w badaniu niszcącym jednego z modeli *smukłych* oznaczonego symbolem R1 (ze wzmocnieniem włóknami PBO) nie obserwowano zarysowań do poziomu naprężeń około 4,5 MPa. Przy obciążeniu około 650 kN widoczne były pierwsze rysy w środkowych strefach ścian A, B i C. Wraz ze wzrostem obciążenia mocno rozwijały się pionowe pęknięcia w ceglach, aż do maksymalnego naprężenia równego 5,50 MPa. Po osiągnięciu tej wartości siła na prasie hydraulicznej przestała przyrastać, jednak filar nie wykazywał gwałtownego zniszczenia (rys. 3).

### Podsumowanie i wnioski ogólne

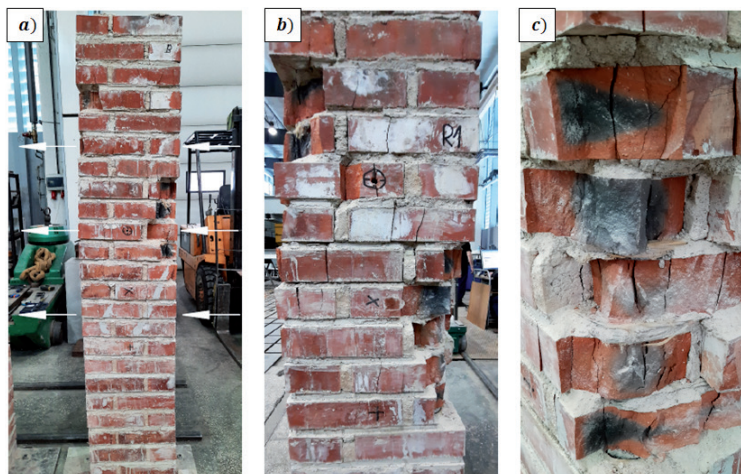
Historyczne konstrukcje murowe wznoszono zwykle przy zastosowaniu zapraw o charakterystykach mechanicznych, wyraźnie odbiegających od parametrów elementów murowych. Ta heterogeniczność mechaniczna filarów historycznych skłania do poszukiwania metod opartych na ograniczaniu odkształcalności zaprawy, w szczególności w spoinach wspornych. W budownictwie powszechnie stosowane są metody wzmocniania filarów polegające na wykonaniu zewnętrznych obejm stalowych lub tzw. koszulek żelbetowych, jednak wiąże się to z wyraźną ingerencją wizualną w substancję historyczną. Zastosowanie wzmocnień powierzchniowych przy użyciu siatek czy taśm prowadzi również do wyraźnej ingerencji w przypadku murów, w których nie wykonano warstw wykończeniowych (np. tynku). W związku z tym stosowanie elementów wiotkich – splotów, cięgien, w spoinach wspornych jest zasadne zarówno z punktu widzenia mechaniki muru, jak również doktryn konserwatorskich.

W przeprowadzanych badaniach zaobserwowano wyraźne korzyści wynikające ze skrępowania spoin wspornych wiązkami włókien PBO, takie jak:

- wzrost nośności na ściskanie filarów *krępych* o 59% oraz *smukłych* o 10–16%,
- przeciwdziałanie zarysowaniu polegające na zwiększaniu poziomu naprężeń, przy których rozwija się proces formowania rys (o 97% w filarach *krępych* oraz o 29–37% w filarach *smukłych*),
- ograniczenie odkształceń całego muru i zwiększenie sztywności podłużnej filarów.



Rys. 2. Widok włókien PBO w spoinie wspornej przed aplikacją drugiej warstwy zaprawy



Rys. 3. Filar R1 (*smukły*, wzmocniany w spoinach włóknami PBO) – uszkodzenia przy zniszczeniu:  
a) widok ściany A (białe strzałki wskazują kierunek wygięcia),  
b) widok pęknięć ściany B,  
c) widok naroża ścian B/C

Szczególnie istotnym zagadnieniem w przypadku stosowania włókien PBO jest ich właściwa współpraca ze spoiną wsporną. W badaniach zaobserwowano, że wcześniejsza impregnacja włókien pozwala na uzyskanie większej efektywności wzmocnienia. Należy również podkreślić, że mechanizm zniszczenia modeli wskazuje, że przy osiągnięciu naprężeń granicznych może nastąpić delaminacja włókien PBO bez ich zerwania.

Wzmocnienie poprzez krępowanie spoin wspornych może służyć do naprawy lub wzmocnienia w przypadku awarii konstrukcji, ale także może być wykorzystywane w obiekcie historycznym zmieniającym funkcję jako element przystosowania do prognozowanych większych obciążeń. Innym obszarem może być również monitoring konstrukcji, w którym krępowanie spoin wspornych przy użyciu włókien PBO zwiększa poziom bezpieczeństwa i pozwala na długotrwałą obserwację przed podjęciem kolejnych działań. Takie podejście jest zgodne z doktryną konserwatorską, mówiącą o stosowaniu minimum możliwej ingerencji.

Firma Visbud-Projekt Sp. z o.o., będąca w Polsce wyłącznym przedstawicielem marki Ruregold, składa podziękowania: prof. dr. hab. inż. Jerzemu Jasieńce, dr inż. Krzysztofowi Raszcukowi, mgr inż. Dawidowi Wójcikowi – za udostępnienie wybranych fragmentów prac badawczych związanych ze wzmocnieniami konstrukcji murowych systemami FRCM. Są one bardzo cenne dla dalszego rozwoju tego kierunku wzmocniania konstrukcji, lepszego ich poznania, a także wprowadzania nowych rozwiązań, które zwiększają efektywność tych wzmocnień.