

dr inż. Iwona Galman^{1*)}
 dr inż. Radosław Jasiński¹⁾
 inż. Tomasz Hahn¹⁾
 tech. Karol Konopka¹⁾

Badanie połączeń ścian murowych

Study of joints masonry wall

DOI: 10.15199/33.2017.10.32

Streszczenie. W artykule zostały przedstawione wyniki badań własnych połączeń ścian wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego. Przeanalizowano morfologię zarysowań i mechanizm zniszczenia, porównano zależność obciążenie – przemieszczenie różnych typów połączeń. Uzyskane wyniki odniesiono do rezultatów otrzymanych z modelu referencyjnego z klasycznym wiązaniem murarskim. W pozostałych modelach badawczych połączenie zostało ukształtowane przy użyciu najpowszechniej stosowanych w Polsce łączników stalowych w postaci: kątowników oraz blaszek perforowanych. Wykazano różny mechanizm zarysowania i zniszczenia oraz wyraźne różnice nośności każdego typu połączenia.

Słowa kluczowe: konstrukcje murowe; ściany usztywniające; połączenia ścian; łączniki; zbrojenie spoin wspornych.

Abstract. The paper presents original results of the tests performed on the joints of the walls made of AAC blocks. The analysis covered morphology of cracking and failure mechanism, as well as comparison of stress – strain relationship of different types of joints. The obtained results were related to the results of the reference model which was the model with classical masonry joint. In the remaining testing models the joint was made with the use of the most commonly used steel connectors in Poland applied in these joints: angle profiles and punched flat profiles. It has been shown that the joints differ in the cracking pattern and failure mechanism as well as in the load-bearing capacity.

Keywords: masonry structures; stiffening walls; wall joints; connectors; bed joint reinforcement.

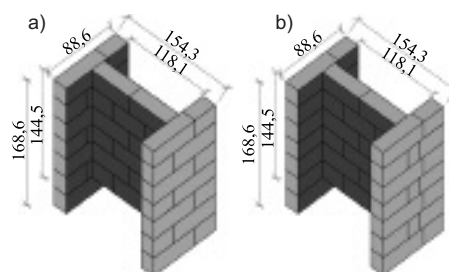
W artykule opublikowanym na łamach „Materiałów Budowlanych” nr 8/2017 [4] przedstawiono podstawy teoretyczne dotyczące połączeń ścian murowych, wybrane badania oraz wymagania normowe. Sformułowano wnioski i wskazano luki w aktualnym stanie wiedzy w aspekcie wyznaczania sił wewnętrznych oraz projektowania połączeń ścian. Ze względu na brak znormalizowanych metod umożliwiających wyznaczenie wytrzymałości na ścinanie i sztywności połączenia, wykonano rozpoznawcze badania połączeń ścian. Zastosowano elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK), a kształt modeli tak dobrano, aby w najprostszym sposobie odzwierciedlić rzeczywiste połączenie ścian jak w badaniach [5].

Modele badawcze i badania

Badania przeprowadzono na modelach wykonanych z elementów murowych z ABK na zaprawie systemowej do cienkich spoin, bez wypełniania spoin czołowych. Określona zgodnie z PN-EN 1052-1:2000 i przedstawiona w [1] wytrzymałość na ściskanie muru wynosiła $f_c = 2,97 \text{ N/mm}^2$, a mo-

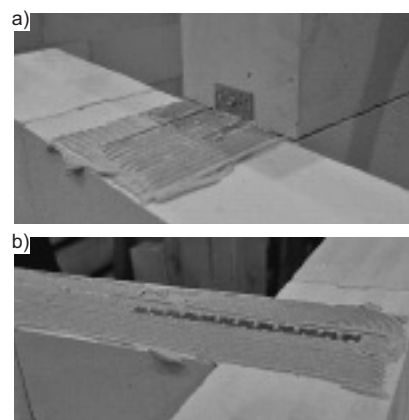
duł sprężystości $E_m = 2040 \text{ N/mm}^2$. Wytrzymałość na ścinanie wyznaczona wg normy PN-EN 1052-3:2004 i zaprezentowana w [2] początkowa wytrzymałość na ścinanie była równa $f_{vo} = 0,31 \text{ N/mm}^2$, a moduł Kirchhoffa określony wg normy ASTM E519-81 i podany w [3] wynosił $G = 329 \text{ N/mm}^2$.

Zbadano trzy modele o identycznym kształcie i wymiarach. Miały one bisymetryczny kształt dwuteowy, w którym środkową stanowiła podłużna ściana długości $\sim 120 \text{ cm}$, a półki dwie ściany o długości $\sim 90 \text{ cm}$ (rysunek 1a i b). Między środkową a półkami ukształtowano pionowe połączenie, którego konstrukcję zróżnicowano. W modelu badawczym oznaczonym umownie jako **M-B** między półkami a środkową wykonano klasyczne połączenie murarskie (rysunek 1a). Element ten traktowano jako model referencyjny, którego parametry mechaniczne i zachowanie się podczas obciążenia oraz zniszczenia było porównywane z wynikami z pozostałych badań. W kolejnych dwóch murach (geometria zgodnie z rysunkiem 1b) połączenie pomiędzy ścianami uzyskano za pomocą stalowych łączników, bez wiązania elementów murowych. W modelu **M-K2** zastosowano stalowe kątowniki dwuramienne, których ramiona zatopiono w cienkiej spoinie poziomej muru nieobciążonego – zewnętrznego i przykręcono śrubami do muru obciążanego – wewnętrznego (fotografia 1a). W ele-



Rys. 1. Geometria: a) muru referencyjnego typu M-B; b) murów ze stalowymi łącznikami (mur M-K2 oraz M-P30)

Fig. 1. Geometry: a) of M-B type reference masonry wall; b) masonry walls with steel connectors (wall M-K2 and M-P30)



Fot. 1. Sposób kotwienia: a) kątownikiem dwuramiennym; b) płaskownikiem perforowanym

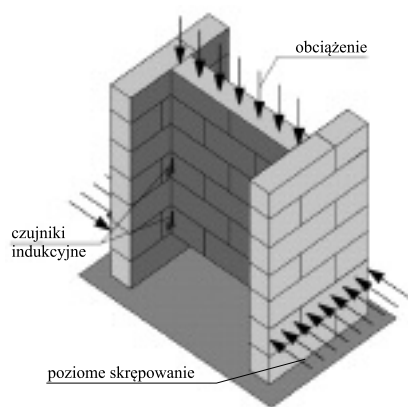
[Fot. I. Galman]
 Photo 1. Method of anchorage: a) with two-arm angle connector; b) method of anchorage with steel punched flat profile

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji:
 iwona.galman@polsl.pl

mencie **M-P30** połączenie zostało ukształtowane przez zatopienie w spoinach poziomych pojedynczych płaskowników perforowanych (fotografia 1b).

Do badań skonstruowano stanowisko składające się ze stalowej ramy oraz poziomych elementów krepujących. Pionową siłę ścinającą połączenie wywoływano hydraulicznym siłownikiem o zakresie 1000 kN, a rejestracji dokonywano przy użyciu siłomierza o zakresie 250 kN. Obciążenie na środkową ścianę (średnik) przekazywano w postaci dwóch sił skupionych przyłożonych symetrycznie w odległości 100 mm od połączenia. Aby uniknąć punktowego obciążenia ściany, zastosowano żelbetowy trawers o długości identycznej jak środkowa ściana. W dolnych strefach każdego modelu umieszczono stalowe, stabilizujące ramy zabezpieczające model przed niekontrolowanym rozwarstwieniem lub przemieszczeniem. Modele obciążano w jednym cyklu, aż do zniszczenia, przykładając siłę z szybkością 0,1 kN/s. Schemat statycznych badania modeli i widok stanowiska badawczego pokazano na rysunku 2. W trakcie badań dokonywano ciągłej rejestracji obciążenia oraz przemieszczeń ściany średnika względem półek (przy użyciu ośmiu indukcyjnych przetworników przemieszczeń typu PJX-10 o zakresie 10 mm i dokładności wskazań 0,002 mm).



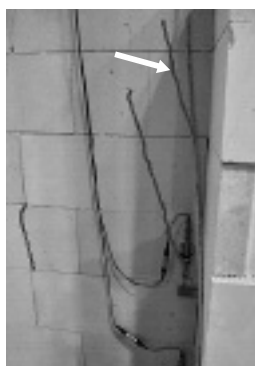
Rys. 2. Schemat statyczny badanych elementów (opis w tekście)

Fig. 2. Static scheme of the tested elements (description in the text)

Mechanizm zarysowania i zniszczenia

Charakter i morfologia zarysowań zależały od sposobu ukształtowania połączenia. Pierwsze widoczne zarysowanie (strzałka na fotografii 2) w murze referencyjnym pojawiło się przy ok. 60% wartości siły niszc-

czącej. Kolejne zlokalizowane były niesymetrycznie i koncentrowały się przy jednym ze styków. Przy zwiększeniu obciążenia pojawiła się rysa na przedłużeniu spoin czołowych w murze średnika. Powstałe zarysowania systematycznie zwiększały rozwartość (fotografia 3). Rysa niszcząca przebiegała przez spoinę pionową oraz przecinała bloczek betonowy. Nie stwierdzono symetrycznego obrazu zniszczenia, niszczące rysy oraz ściecie w połączeniu zaobserwowano tylko w jednym ze styków ściany średnika z półką.



Fot. 2. Pierwsze zarysowania modelu referencyjnego M-B
Photo 2. First cracks in the reference model M-B



Fot. 3. Obraz zniszczenia modelu referencyjnego M-B
Photo 3. Cracking pattern in the reference model M-B

W modelach, w których połączenie uzyskano za pomocą stalowych łączników (mur **M-K2** i **M-P30**) nie zaobserwowano rozwoju zarysowań i uszkodzeń muru. Zniszczenie miało charakter gwałtowny i polegało na ścięciu (symetrycznym) obydwu połączeń i wyraźnym pionowym przemieszczeniu (średnio o ok. 17 mm) ściany średnika, która osiadła na drewnianym zabezpieczeniu. Pod wpływem siły stalowe łączniki kątowe uległy uplastycznieniu. Wygięty fragment blachy wbił się w bloczek. Po odciążeniu modelu badawczego i usunięciu poziomego skrupowania doszło do całkowitej destrukcji modelu badawczego, nieobciążona ściana oderwała się od reszty muru. Wystąpiły więc dwa niepożądane zjawiska. Pierwsze związane z gwałtownością zniszczenia, a drugie z całkowitym brakiem stabilności modelu po zniszczeniu.

Zniszczenie modelu **M-P30** z płaskownikami perforowanymi nastąpiło w wyniku ich uplastycznienia i wygięcia w obrębie styku (fotografia 4). Dzięki otworom w płaskowniku nie doszło do poślizgu łącznika w zaprawie spoin wspornych. Zaprawa przenikająca przez otwory nie została ścięta, a zadziałała jak dybel, eliminując przesunięcie. Na podstawie oględzin wszystkich łączników stwierdzono, że deformacja w obrębie połączenia nie była taka sama. Największe wygięcia łączników zaobserwowano w górnych strefach połączeń, a najmniejsze w położonych najdalej od miejsca przyłożenia obciążenia.



Fot. 4. Typowe wygięcie stalowego płaskownika w obrębie połączenia
Photo 4. Typical cambers in the steel flat profile within the joint

Wyniki badań

Pierwsza widoczna rysa w murze referencyjnym **M-B** pojawiła się w przypadku siły 91 kN. Zniszczenie nastąpiło przy obciążeniu 152 kN. Przy sile 29 kN stwierdzono jednoczesne zarysowanie i zniszczenie modelu ze stalowymi łącznikami kątowymi **M-K2**. Dwukrotnie większe obciążenie był zdolny przejść model z łącznikami w postaci płaskowników perforowanych **M-P30**. Nośność obydwu modeli zbrojonych była co najwyżej o 50% mniejsza od nośności referencyjnego z klasycznym wiązaniem murarskim. Zestawienie wyników w postaci sił i przemieszczeń zarejestrowanych w chwili zarysowania i zniszczenia zamieszczono w tabeli. Podano również sztywność połączenia zdefiniowaną jako iloraz obciążenia przypadającego na pojedyncze połączenie i odpowiadającego przemieszczenia.

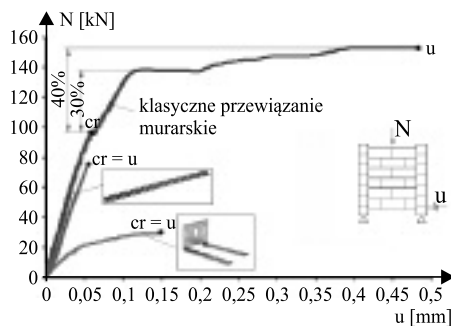
Oprócz wartości sił powodujących zarysowanie i zniszczenie istotnym parametrem charakteryzującym każde połączenie jest sztywność. Jej znajomość pozwala wyznaczyć wzajemne przemieszczenia połączonych ze sobą ścian przy znanych obciążeniach, a także wartość obciążenia przy znanych wzajemnych przemieszczeniach. Największą sprężystą sztywno-

Wyniki badań

Test results

Nazwa modelu badawczego	Siła		Przemieszczenie		Szywność połączenia $K_t = N_{cr}/2u_{cr}$ [MN/m]
	rysująca N_{cr} [kN]	niszcząca N_u [kN]	w chwili zarysowania u_{cr} [mm]	tuż przed zniszczeniem u_u [mm]	
M-B	91	152	0,05	0,48	910
M-K2	29	29	0,14	0,14	104
M-P30	72	72	0,06	0,56	643

ścią – 910 MN/m charakteryzował się model z klasycznym wiązaniem murarskim. Szywność modelu ze stalowymi kątownikami była niemal dziewięciokrotnie mniejsza, zaś modelu z perforowanymi płaskownikami ok. 30% mniejsza. Na rysunku 3 pokazano przebieg zależności siła – średnie przemieszczenie względne ściany środkowej i ścian półek, wszystkich zbadanych elementów próbnymi. Otrzymana w badaniach zależność obciążenie – przemieszczenie modelu z klasycznym przewiązaniem murarskim obrazuje wieloetapowość pracy połączenia. Do chwili zarysowania przemieszczenia narastały proporcjonalnie do obciążenia, a więc występowała sprężysta praca połączenia. Po zarysowaniu zaobserwowano niewielkie załamanie wykresu, ale w dalszym ciągu przemieszczenia narastały niemal proporcjonalnie do obciążeń. W chwili poprzedzającej zniszczenie wystąpił gwałtowny przyrost przemieszczeń przy nieznacznym wzroście pionowych obciążeń. W modelu ze stalowymi kątownikami, zakres sprężystej pracy modelu był niezauważalny. Niemal w całym zakresie obciążenia, a więc do chwili zarysowania i zniszczenia, przemieszczenia narastały nieproporcjonalnie. Prawie liniowa zależność obciążenie – przemieszczenie wystąpiła w modelu z płaskownikami perforowanymi. Zachowanie było podobne do modelu z klasycznym wiązaniem murarskim, nie



Rys. 3. Zależność całkowita siła – średnie, względne przemieszczenie styku

Fig. 3. Relationship between the total force and mean relative displacement of the joint

wystąpił jednak gwałtowny wzrost przemieszczeń po zarysowaniu, ale zniszczenie.

Podsumowanie

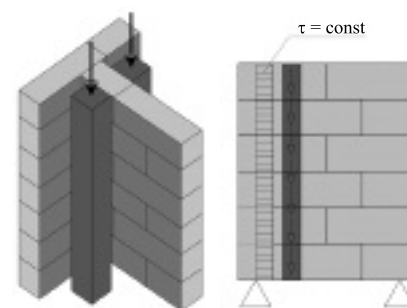
Uzyskane wyniki badań zachęcają do dalszego prowadzenia analiz dotyczących

uszczegółowienia pracy połączenia oraz zastosowania nowych metod konstruowania połączeń, z zastosowaniem innych łączników, większej liczby stalowych elementów w danej spoinie oraz optymalizacji kształtu stalowych płaskowników.

W badaniach wstępnych porównano zachowanie się zaledwie trzech typów połączeń ścian z ABK. Proces destrukcji i rozwój zarysowań w murze połączonym przewiązaniem klasycznym przebiegał etapowo i dość łagodnie. Przed zniszczeniem pojawiły się wyraźne zarysowania muru w obrębie połączenia. Oprócz zdecydowanie mniejszej nośności połączeń, proces zarysowania i zniszczenia modeli ze stalowymi łącznikami był zupełnie inny. Nie wystąpiły poprzedzające zniszczenie zarysowania muru, ale gwałtownie narosły przemieszczenia ze spadkiem obciążeń. Klasyczne przewiązanie murarskie miało ponad pięciokrotnie większą nośność niż modele ze stalowymi kątownikami. Nośność połączenia ze stalowymi płaskownikami była niemal dwukrotnie większa.

Przeprowadzone badania pilotażowe uwypukliły niedoskonałości kształtu elementów badawczych i techniki badań. Niesymetryczne obrazy zniszczenia dwóch jednakowych połączeń nie pozwoliły rozpoznać pracy pojedynczego połączenia. Mimo przyłożenia skupionych sił blisko płaszczyzny połączenia, wystąpiły rysy w dolnej strefie ściany środkowej, świadczące o zginaniu tego fragmentu modelu, co niewątpliwie komplikuje dalsze analizy. Kolejnym niepokojącym zjawiskiem zaobserwowanym w czasie badań była różna deformacja stalowych łączników (zależnie od położenia spoiny względem obciążanej krawędzi ściany środkowej, świadczącej o niejednorodnej pracy połączenia). W celu uniknięcia zasygnalizowanych niedoskonałości zdecydowano, że w badaniach zasadniczych zostanie ulegnie przede wszystkim kształt modelu badawczego. Zamiast elementu bisymetrycznego z dwoma połączeniami przed-

miotem badań będą elementy monosymetryczne – w kształcie litery T z pojedynczym połączeniem. Pionowe obciążenie generujące ścinanie połączenia nie będzie przykładane do górnej krawędzi ściany środkowej, ale przekazywane liniowo na całej wysokości muru, uzyskując równomierność naprężeń ścinających w połączeniu. Do badań zostanie skonstruowane stanowisko umożliwiające badanie elementów monosymetrycznych z liniowym przekazaniem obciążenia na połączenie (rysunek 4).



Rys. 4. Schemat zmodyfikowanego stanowiska badawczego

Fig. 4. Scheme of the modified testing set-up

Literatura

- [1] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński. 2015. „Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne z ABK poddanych ścisaniu”. *Materiały Budowlane* 4: 3 – 7. DOI: 10.15199/33.2015.04.02.
- [2] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński. 2015. „Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z betonu komórkowego poddanych ścinaniu”. *Materiały Budowlane* 5: 106 – 109. DOI: 10.15199/33.2015.05.44.
- [3] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński. 2015. „Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów poddanych ścinaniu – odkształcalność postaciowa”. *Materiały Budowlane* 7: 116 – 119. DOI: 10.15199/33.2015.07.32.
- [4] Galman Iwona, Radosław Jasiński. 2017. „Połączenia ścian murowych, podstawy teoretyczne”. *Materiały Budowlane* 8: 190 – 193. DOI: 10.15199/33.2017.08.54.
- [5] Phipps M. E., T. I. Montague. 1996. *The behaviour and design of steel shear connectors in plain and prestressed masonry*. 7th North American Masonry Conference: Vol. 2, s. 789 – 798. University of Notre Dame-South Bend, Indiana, USA.

Autoryzy wyrażają szczególne podziękowania firmie Solbet Sp. z o.o. i firmie NOVA Sp. z o.o. za cenne merytoryczne wskazówki oraz dostarczenie elementów murowych, zaprawy i łączników wykorzystanych do wykonania modeli badawczych i przeprowadzenia badań.

Przyjęto do druku: 28.08.2017 r.