dr hab. inż. Radosław Jasiński, prof. PŚ [1)]
ORCID: 0000-0003-4015-4971
dr inż. Iwona Galman [1)*)]
ORCID: 0000-0002-0196-6478

Propozycja analitycznego opisu faz pracy niezbrojonego połączenia ścian murowanych wykonanych z elementów z ABK

A proposal for an analytical description of the work phases of the unreinforced joint of masonry walls made of AAC masonry units

DOI: 10.15199/33.2020.05.07

Streszczenie. Artykuł przedstawia zachowanie się niezbrojonych połączeń ścian wykonanych z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK). Na podstawie badań własnych zdefiniowano i opisano poszczególne fazy pracy połączenia. Zaproponowano empiryczne podejście umożliwiające określenie sił i przemieszczeń połączenia ścian z wykorzystaniem parametrów uzyskiwanych ze standardowych testów zawartych w przepisach normowych.
Słowa kluczowe: konstrukcje murowe; sztywność połączeń; połączenia ścian.

Abstract. The article presents the description of the behavior of unreinforced joints of walls made of masonry elements of autoclaved aerated concrete (AAC). Based on our own research, the individual phases of the connection were defined and described. An empirical approach was proposed to determine the forces and displacements of the wall connection using parameters obtained from standard tests included in the standard provisions.
Keywords: masonry structures; stiffness of connection; wall joints.

Artykuł jest kontynuacją cyklu publikacji [2, 3, 4], dotyczących połączeń ścian murowych. Jak wynika z analizy aktualnego stanu wiedzy, dotychczas nie przeprowadzono kompleksowych badań poświęconych zachowaniu się połączeń ścian. Dotyczy to nie tylko ścian z ABK, ale także modeli wykonanych z innych elementów murowych. W normach projektowania brakuje wytycznych umożliwiających wyznaczanie wartości sił wewnętrznych w miejscu krzyżujących się ścian, a także służących do sprawdzenia warunków ULS i SLS.

Nieliczne badania nie pozwalają opisać mechanizmu pracy połączenia, a tym bardziej sformułować wytycznych do ich projektowania i konstruowania. W związku z tym, bazując na wynikach badań własnych, podjęto próbę opisu zachowania się i budowy uproszczonego modelu połączenia ścian wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego.

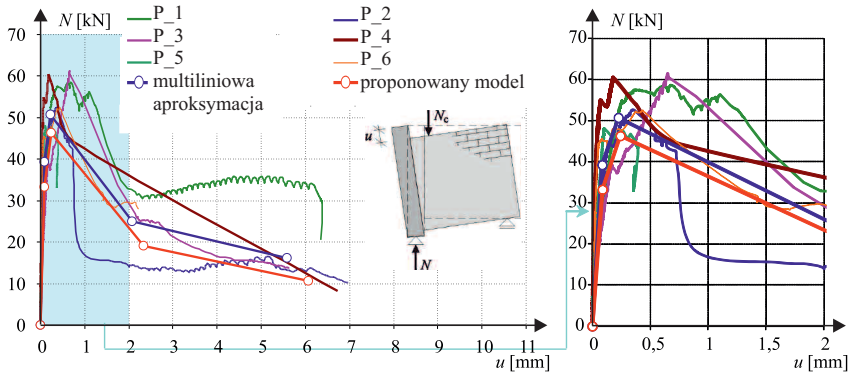
Badania

Technikę badania oraz wyniki obejmujące morfologię zarysowania i mechanizm zniszczenia omówiono szczegółowo w pracy [4]. Warto przypomnieć, że badania modeli prowadzono w specjalnie do tego celu skonstruowanym stanowisku badawczym. Celem badań była obserwacja połączenia dwóch prostopadłych ścian w sytuacji, gdy jedna z nich jest obciążona, a druga pozostaje swobodna. Badania przeprowadzono na modelach wykonanych z elementów murowych z ABK (odmiany 600, grubości 180 mm) na zaprawie systemowej do spoin cienkowarstwowych (M5), bez wypełniania spoin czołowych (fotografia). Przedstawiona w artykule analiza wyników badań dotyczy połączeń pomiędzy ścianami wykonanych, jako klasyczne przewiązanie murarskie – bez zbrojenia.

Badaniu poddano sześć elementów. Mechanizm ich pracy przedstawiono w postaci zależności obciążenie **N** – względne (wzajemne) przemieszczenie **u** łączonych ścian (rysunek 1). Do chwili zarysowania styku, które wystąpiło przy obciążeniu N_{cr} = 27,3 ÷ 54,1 kN, względne przemieszczenia **u** zwiększały się niemal wprost proporcjonalnie, dlatego ten etap pracy nazwano umownie **fazą sprężystą**. Po zarysowaniu w **fazie postsprężystej** zaobserwowano zmniejszenie sztywności, ale połączenia wykazywały w dalszym ciągu zdolność do przejmowania obciążenia. Faza ta zakończyła się przy maksymalnej sile N_u = 38,6 ÷ 59,8 kN. Dalsze próby obciążenia w fazie zniszczenia spowodowały wyraźny spadek wartości sił rejestrowanych przez siłomierz, którym towarzyszył wzrost względnego przemieszczenia. Siły nie zmniejszyły się do zera, a połączenie zdolne było przejąć pewne obciążenie. Siły w tym etapie pracy po-

Model badawczy
Researh model

[1)] Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa
[*)] Adres do korespondencji: iwona.galman@polsl.pl



Rys. 1. Zależność między siłą całkowitą a średnim przemieszczeniem – wyniki testu i obliczenia
Fig. 1. Relationship between the total force and mean displacement for test results and calculations

łączenia nazwano siłami zazębiania (*aggregate interlocking*) $N_{ag} = 14{,}1 \div 31{,}1$ kN. Dalsze zwiększenie przemieszczenia w połączeniu powodowało nieznaczny wzrost obciążenia. Ostatnie zarejestrowane siły, nazwane umownie **siłami rezydualnymi**, poprzedzające zniszczenie, które związane było z całkowitym odspojeniem się łączonych elementów i wzajemnym obrotem, wyniosły $N_r = 8{,}4 \div 42{,}9$ kN. Wyznaczono sztywność połączeń (tabela 1):

- w fazie sprężystej:

$$K_t = \frac{N_{cr}}{u_{cr}} \tag{1}$$

- w fazie postsprężystej:

$$K_p = \frac{N_u - N_{cr}}{u_u - u_{cr}} \tag{2}$$

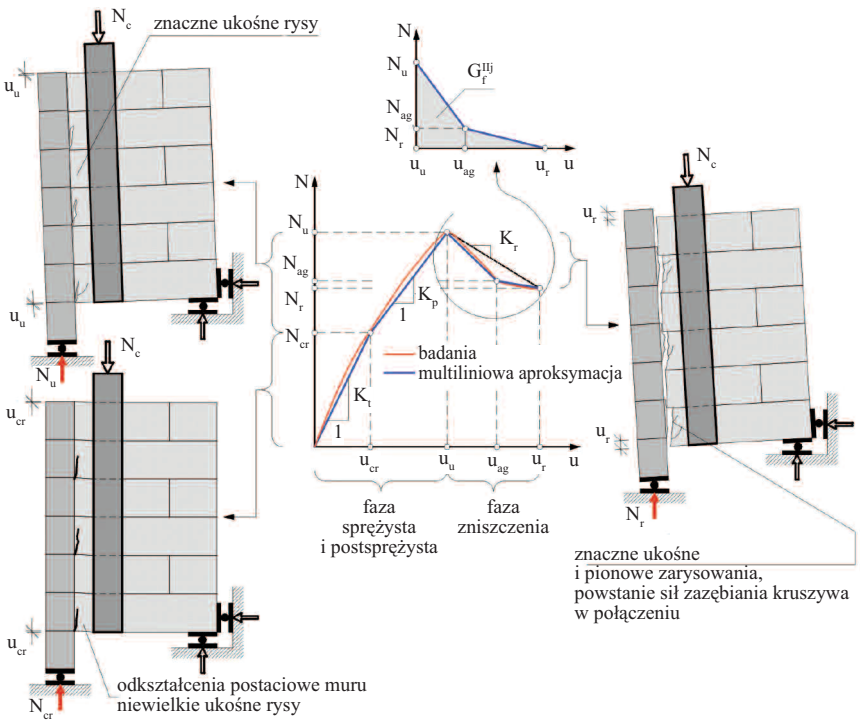
- w fazie zniszczenia:

$$K_r = \frac{|N_r - N_u|}{u_r - u_u} \tag{3}$$

Uśrednione wartości sił i przemieszczeń, w poszczególnych fazach pracy niezbrojonych połączeń ścian murowanych, pokazano na rysunku 1 w postaci multiliniowej aproksymacji.

Tabela 1. Wyniki badania sztywności połączeń niezbrojonych
Table 1. Test results for joints stiffness between unreinforced walls

Model	Sztywność w fazie sprężystej		Sztywność w fazie postsprężystej		Sztywność resztkowa	
	$K_{t,i}$ [MN/m]	$K_{t,mv}$ [MN/m]	$K_{p,i}$ [MN/m]	$K_{p,mv}$ [MN/m]	$K_{r,i}$ [MN/m]	$K_{r,mv}$ [MN/m]
P_1	413	496	119	123	5,89	7,39
P_2	341		60		5,93	
P_3	268		163		4,51	
P_4	804		52,8		7,86	
P_5	562		322		–	
P_6	590		23		12,75	



Rys. 2. Aproksymacja pracy niezbrojonego połączenia ścian murowanych
Fig. 2. Approximation of work of unreinforced joint between masonry walls

Walidacja modelu

Na podstawie przeprowadzonych badań podjęto próbę uogólnienia uzyskanych rezultatów i **zaproponowano tzw. model standardowy**. Przyjęto następujące założenia:

a) nieliniową zależność N – u, uzyskaną w badaniach, można zastąpić zależnością wieloodcinkową opisującą wszystkie obserwowane fazy pracy połączenia (rysunek 2), a mianowicie: i. – faza sprężysta występująca w przedziale obciążeń 0 – N_{cr}; ii. – faza postsprężysta w przedziale obciążeń N_{cr} – N_u; iii. – faza zniszczenia w przedziale obciążeń N_u – N_{ag} – N_r;

b) wszystkie parametry materiałowe zastosowane w modelu zostaną określone wg standardowych i znormalizowanych metod;

c) model podlegać będzie statystycznej walidacji na podstawie wykonanych badań własnych.

Do określenia sił i przemieszczeń w poszczególnych fazach pracy połączenia ścian murowanych zaproponowano następujące zależności empiryczne:

■ siły i przemieszczenia w fazie sprężystej:

$$N_{cr} = \alpha_1 \tau_{cr,RL} A \tag{4}$$

$$u_{cr} = N_{cr}/K_t = N_{cr}/\alpha K_{RL} \tag{5}$$

■ siły i przemieszczenia w fazie post-sprężystej:

$$N_u = \beta_1 \tau_{u,RL} A \quad (6)$$

$$u_u = u_{cr} + (N_u - N_{cr})/K_p = u_{cr} + (N_u - N_{cr})/\beta K_t \quad (7)$$

Parametry ścinania potrzebne we wzorach 4 ÷ 7 wyznaczono w próbie ukośnego ściskania wg normy ASTM E519-81 [1]. W fazie zniszczenia wyznaczono na wstępie wartość siły rezydualnej i zazębiającej wg następujących wzorów:

$$N_r = \gamma \tau_{u,RL} A \quad (8)$$

$$N_{ag} = \gamma_1 \tau_{u,RL} A \quad (9)$$

Do wyznaczenia przemieszczeń odpowiadających sile zazębiającej wykorzystano zależność empiryczną:

$$u_{ag} = \omega \tau_{u,RL}/K_{RL} \quad (10)$$

α, α_1, β, β_1, γ, γ_1 oraz ω w podanych wzorach, to współczynniki empiryczne. Ich wartość obliczono, korzystając z wyników badań materiałowych poszczególnych elementów, a w fazie zniszczenia zgodnie z zasadami kontynualnej mechaniki pękania. Bardziej szczegółowe wyjaśnienie zagadnienia zamieszczono w pracy [5]. Empiryczne zależności, opisujące pracę połączenia w poszczególnych fazach, podano w tabeli 2. Porównanie wartości obliczonych i otrzymanych empirycznie zestawiono w tabeli 3 i na rysunku 1.

Obliczone siły wyznaczające współrzędne poszczególnych faz pracy połączenia były zgodnie z założeniami mniejsze od uzyskanych w badaniach. W przypadku siły powodującej zarysowanie różnica ta wynosiła 15%, a siły niszczącej 9%. Największą różnicę otrzymano w fazie zniszczenia. Obliczone wartości N_{ag} i N_r były wówczas mniejsze o 36% i 44% od średnich wartości empirycznych. W przypadku względnych przemieszczeń w fazie sprężystej, obliczone przemieszczenie różniło się zaledwie o 3% od średniej wartości empirycznej, a przy największej sile różnica wynosiła przeszło 7%. W fazie zniszczenia, przemieszczenia odpowiadające siłom N_{ag} i N_r różniły się odpowiednio o 12% i 17%.

Tabela 2. Zależności opisujące pracę niezbrojonego połączenia ścian
Table 2. Relationships describing the work of unreinforced joint between walls

Faza pracy połącznia	Siła	Sztywność	Przemieszczenie
Faza sprężysta	$N_{cr} = 0{,}67\tau_{u,RL}A$	$K_t = 3{,}22K_{RL}$	$u_{cr} = N_{cr}/3{,}22K_{RL}$
Faza postsprężysta	$N_u = 0{,}91\tau_{u,RL}A$	$K_p = 0{,}14K_{RL}$	$u_u = (N_u - N_{cr})/0{,}14K_{RL}$
Faza zniszczenia	$N_{ag} = 0{,}37\tau_{u,RL}A$	$(N_u - N_{ag})/(u_u - u_{ag})$	$u_{ag} = 5{,}39\tau_{u,RL}A/K_{RL}$
	$N_r = 0{,}21\tau_{u,RL}A$	$K_r = (N_u - N_r)/(u_r - u_u)$	$u_r = \frac{2G_f^{II}A - N_u(u_{ag} - u_u) + N_{ag}u_u + N_r(u_{ag} - 2u_u)}{(N_{ag} - N_r)}$

Tabela 3. Porównanie wyników badań i obliczeń wg modelu standardowego
Table 3. Compared tests results and own calculations for the standard model

Wyniki badań				Wyniki obliczeń			
siły				siły			
$N_{cr,mv}$ [kN]	$N_{u,mv}$ [kN]	$N_{ag,mv}$ [kN]	$N_{r,mv}$ [kN]	$N_{cr,cal}$ [kN]	$N_{u,cal}$ [kN]	$N_{ag,cal}$ [kN]	$N_{r,cal}$ [kN]
39,2	50,7	24,9	16,2	33,3	46,3	19,0	10,7
przemieszczenia				przemieszczenia			
$u_{cr,mv}$ [mm]	$u_{u,mv}$ [mm]	$u_{ag,mv}$ [mm]	$u_{r,mv}$ [mm]	$u_{cr,cal}$ [mm]	$u_{u,cal}$ [mm]	$u_{u,cal}$ [mm]	$u_{r,cal}$ [mm]
0,09	0,243	2,08	5,58	0,09	0,24	2,34	6,53

Otrzymane rezultaty pozwalają, z zadowalającą precyzją, dokonać predykcji sił, a co za tym idzie poprawnie sprawdzić warunki SLS połączenia. Większą różnicę uzyskano w przypadku przemieszczeń, których znajomość jest istotna podczas sprawdzania warunków SLS. Największą rozbieżność otrzymano w przypadku maksymalnego obciążenia.

Podsumowanie

Zaprezentowana analiza wyników badań połączeń ścian murowanych z elementów z ABK ukształtowanych jako klasyczne przewiązanie murarskie (bez zbrojenia) jest częścią kompleksowych prac prowadzonych obecnie w Politechnice Śląskiej. Określono i zdefiniowano poszczególne fazy pracy i na tej podstawie zaproponowano empiryczne podejście, umożliwiające określenie sił i przemieszczeń połączenia ścian z wykorzystaniem wyników badań pochodzących z mniej skomplikowanych badań standardowych.

Zgodnie z obserwacjami, fazę zniszczenia opisano dwoma odcinkami, w których siły zmieniały się od N_u do N_{ag}, a następnie od N_{ag} do N_r przy odpowiadających przemieszczeniach u_u, u_{ag} i u_r. Uzyskano bezpieczne oszacowanie wartości sił rysujących i niszczących. Różnica w stosunku do wyników badań wyniosła 15% i 9%.

Literatura

[1] ASTM E519-81 Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) of Masonry.

[2] Galman Iwona, Radosław Jasiński. 2017. „Połączenia ścian murowych, podstawy teoretyczne". *Materiały Budowlane* 540 (8): 190 – 193. DOI: 10.15199/33.2017.08.54.

[3] Galman Iwona, Radosław Jasiński, Tomasz Hahn, Karol Konopka. 2017. Badanie połączeń ścian murowych". *Materiały Budowlane* 542 (10): 94 – 96. DOI: 10.15199/33.2017.10.32.

[4] Galman Iwona, Radosław Jasiński. 2019. „Wytrzymałość niezbrojonych połączeń ścian z ABK". *Materiały Budowlane* 559 (3): 58 – 59. DOI: 10.15199/33.2019.03.13.

[5] Jasiński Radosław, Iwona Galman. 2020. „Testing joints between walls made of AAC masonry units". *Buildings*, Vol. 10, Iss. 4, 69: 1 – 24. DOI 10.3390/buildings10040069.

Podziękowanie

Autorzy składają szczególne podziękowania firmie Solbet Sp. z o.o. za cenne merytoryczne wskazówki oraz dostarczenie elementów murowych i zaprawy do wykonania modeli badawczych i przeprowadzenia badań.

Przyjęto do druku: 20.04.2020 r.

Partner działu: **Stowarzyszenie Producentów Betonów**

www.s-p-b.pl