

dr hab. inż. Łukasz Drobiec¹⁾
dr inż. Radosław Jasiński^{1)*}

Wpływ rodzaju zaprawy na rysoodporność i wytrzymałość na ścinanie murów z betonu komórkowego

Influence of the kind of mortar on cracking shear stress and shear strength of AAC

DOI: 10.15199/33.2015.06.37

Streszczenie. W trzecim artykule z cyklu publikacji dotyczących badań właściwości murów z betonu komórkowego („Materiały Budowlane” 4/2015 i 5/2015) prezentowane są wyniki badań niewielkich ścian badanych w próbie ukośnego ściskania zgodnie z amerykańską normą ASTM E519-81. Zbadano 21 modeli, w których zastosowano 3 typy zapraw, 3 typy spoin wspornych i 2 typy spoin czołowych (bez lub z zaprawą). Badania wykazały m.in., że najkorzystniejszy wpływ na rysoodporność i wytrzymałość na ścinanie uzyskuje się, wypełniając spoiny czołowe zaprawą. Z kolei najgorsze rezultaty w zakresie nośności i rysoodporności otrzymano, wykorzystując spoiny pasmowe.

Słowa kluczowe: konstrukcje murowe, projektowanie konstrukcji murowych, wpływ rodzaju zaprawy, wytrzymałość muru na ścinanie, Eurokod 6.

Abstract. The third article of a series of publications the study of the properties of AAC masonry walls (Building Materials 4/2015, 5/2015) presents the results of a small walls study examined in an attempt to diagonal compression in accordance with the American ASTM E519-81 code. 21 models examined, using 3 types and 3 types of mortar bed joints and 2 types of vertical joints (with or without mortar). It has been shown, that the most favorable effect on the cracking shear stress and shear strength obtained by filling with mortar vertical joints. The worst results in terms of carrying capacity and shear stress obtained using strip joints.

Keywords: masonry structures, design of masonry structures, influence of the kind of mortar, masonry shear strength, Eurocode 6.

W artykule pt. „Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z betonu komórkowego poddanych ścinaniu”, opublikowanym w „Materiałach Budowlanych” nr 5/2015 [1] przedstawiono wyniki badań muru na ścinanie wykonanych wg europejskiej normy PN-EN 1052-3:2004 [3] zharmonizowanej z Eurokodem 6 [2]. W przypadku różnych typów zapraw i konstrukcji spoin wspornych określono początkową i charakterystyczną wytrzymałość muru na ścinanie (f_{vo} i f_{vok}) oraz tangens kąta tarcia wewnętrzznego zaprawy w spoinie wspornej $0,8 \tan \alpha$. Proponowana metoda może wzbudzać istotne wątpliwości co do odwzorowania rzeczywistej pracy muru pod obciążeniem ścinającym, ze względu na pominięcie współpracy z elementami murowymi przylegającymi w poziomie oraz w pionie. W związku z tym zdecydowano się na wykonanie dodatkowych badań parametrów ścinania na niewielkich ścianach badanych w próbie ukośnego ściskania wg zaleceń amerykańskiej normy ASTM E519-81 [4]. Celem

badania było rozpoznanie wpływu zmiany rodzaju zaprawy i konstrukcji spoin na rysoodporność oraz wytrzymałość na ścinanie f_{vk} murów wykonanych z bloczków z betonu komórkowego **SOLBET OPTIMAL** z zamkami do murowania na pióro i wpust. Właściwości elementów murowych, zapraw oraz murów poddanych ściskaniu zostały podane w artykule, który ukazał się w „Materiałach Budowlanych” nr 4/2015 [5].

Idea badań ukośnego ściskania

Oprócz testów składających się z dwóch, trzech lub czterech zespolonych ze sobą elementów murowych proponowanych m.in. w normie PN-EN 1052-3:2004 [3], parametry ścinania określa się również na elementach dużych lub średnich gabarytów w próbach bezpośredniego ścinania lub ukośnego ściskania/rozciągania. W **metodach bezpośredniego ścinania** wykorzystywane są ściany jedno- lub wielokondygnacyjne najczęściej w skali naturalnej, ewentualnie modele ścian proporcjonalnie zmniejszone. Największym problemem jest wówczas odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy ściany w budynku w zakresie obciążenia oraz podparcia. Przegląd metod badań wy-

mienionymi metodami można znaleźć w [6]. Natomiast w przypadku **metody ukośnego ściskania/rozciągania** naprężenia styczne generowane są pośrednio przez siły ściskające zorientowane ukośnie w stosunku do płaszczyzny spoin wspornych. W tej grupie badań stosuje się metody normowe scharakteryzowane w normach ASTM E519-81 [4] oraz RILEM LUMB 6 [7], w których siłami skupionymi obciąża się kwadratowy model o boku co najmniej 1,0 m. Obie normy zakładają, że w środkowym obszarze muru nie występują naprężenia normalne (rysunek 1b), lecz naprężenia styczne stanowiące iloraz wypadkowej siły F rozłożonej na ścianę elementu i pola powierzchni poprzecznego przekroju muru A_n . Główne naprężenia rozciągające σ_1 równe są naprężeniom stycznym i pochylone pod kątem 45° do płaszczyzny spoin wspornych. Zniszczenie muru następuje na skutek zarysowania elementów murowych i zaprawy rysą biegnącą zgodnie z kierunkiem głównych naprężeń rozciągających:

$$\sigma_1 = \tau = \sqrt{2}F/2A_n = 0,707F/A_n \quad (1)$$

gdzie:

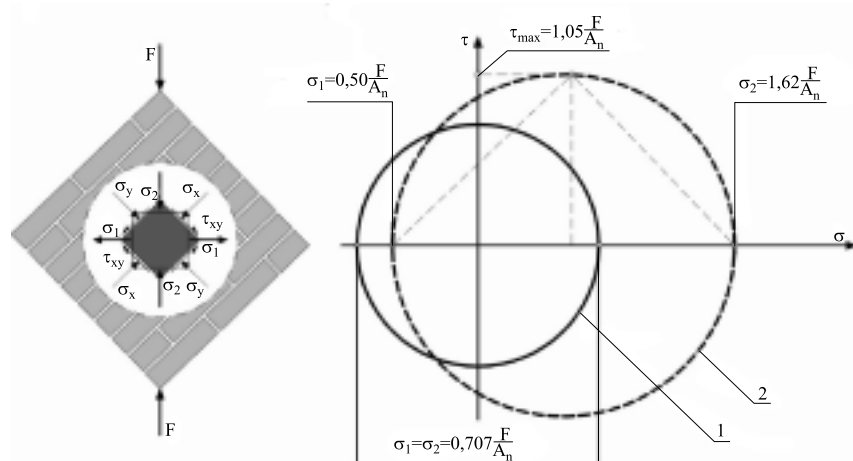
F – siła ściskająca (rozłupująca);

A_n – pole powierzchni poprzecznego przekroju muru obliczone z zależności $A_n = 0,5(1+h)tn$;

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*)} Autor do korespondencji:

e-mail: radoslaw.jasinski@polsl.pl



Rys. 1. Graficzna interpretacja próby ukośnego ściskania: a) stan naprężeń w środku elementu, b) koło naprężeń Mohra: 1 – stan naprężenia wg norm RILEM LUMB 6 [7, 9] i ASTM E519-81 [4]; 2 – rzeczywisty stan naprężenia w fazie sprężystej [9, 10]

Fig. 1. Graphical interpretation of attempts to the diagonal compression: a) the state of stress in the center of the element; b) Mohr's stress circle: 1 – state of stress according to RILEM standards LUMB 6 [7, 9] and ASTM E519-81 [4]; 2 – the actual state of stress in the elastic phase [9, 10]

l, h, t – odpowiednio: długość, wysokość i grubość muru;

$n = A_{brutto}/A_{netto}$ – iloraz pola powierzchni brutto A_{brutto} i netto A_{netto} (po uwzględnieniu pionowych drążów) elementu murowego.

Rozkład głównych naprężeń w stadium sprężystym wzdłuż rysy jest silnie zaburzony, a wyznaczone teoretycznie wartości głównych naprężeń są mniejsze niż obliczone z zależności (1) (rysunek 1a). Analizy Frochta z 1931 r. [8] wskazują, że w środkowym obszarze oprócz naprężeń ścinających występują także naprężenia normalne prostopadłe i równoległe (2) do spoin wspornych i dlatego stan naprężenia istotnie odbiega od stanu czystego ścinania.

$$\sigma_x = \sigma_y = 0,56F/A_n; \tau_{xy} = 1,05F/A_n; \sigma_1 = 0,5F/A_n; \sigma_2 = -1,62F/A_n \quad (2)$$

W [9] zaproponowano, aby wytrzymałość na rozciąganie (ścianica) muru obliczać na podstawie rzeczywistej wartości głównych naprężeń rozciągających z zależności:

$$f_t = 0,50F/A_n \quad (3)$$

natomiast w [11] przyjęto ogólną zależność w następującej postaci

$$\tau = \alpha F/A_n \quad (4)$$

gdzie:

α – współczynnik zależny od rodzaju muru.

W przypadku murów z kamienia naturalnego na zaprawie wapiennej przyjęto w [11] współczynnik $\alpha = 0,35$, natomiast Jasiński, Piekarczyk i Kubica [12], prowadząc badania murów z cegły pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej i cementowej grubości 0,12 m i 0,25 m (ze spoiną podłużną), wyznaczyli $\alpha = 0,42$, a więc zbli-

żony do wartości uzyskanych w badaniach [8, 9].

W zaleceniach RILEM LUMB 6 nie sprecyzowano jednoznacznie, jakie powinny być wymiary modeli badawczych oraz w jaki sposób obliczać odkształcenia postaciowe ściany. Informacje takie, a także szczegółowy opis procedury zawarte zostały w normie ASTM E519-81 [4], którą potraktowano jako merytoryczną podstawę przedstawionych badań.

Modele badawcze i program badań

Do wykonania modeli badawczych zastosowano zaprawę murarską **SOLBET do cienkich spoin na cemencie białym – oznaczoną symbolem 0.1** nominalnej klasy M5, zaprawę murarską **SOLBET do cienkich spoin oznaczoną symbolem Dünnbettmörtel 0,4** zaprawa murarska do cienkich spoin, przeznaczoną na rynek niemiecki nominalnej klasy M10 oraz klej poliuretanowy. W przypadku spoin wspornych elementów murowych zaprawę nanoszono przy użyciu specjalnej kielni szerokości 180 lub 50 mm. Natomiast klej poliuretanowy nakładano dwoma paskami równoległymi do krawędzi podłużnej muru za pomocą pistoletu. W modelach badawczych z wypełnionymi spoinami czołowymi zaprawę nakładano na część bloczka poza obszarem pióra i wpustu. Modele wykonano i przechowywano przez 28 dni w warunkach laboratoryjnych. Wszystkie miały taki sam kształt i takie same wymiary: długość

$l = 1180$ mm, wysokość $h = 1212$ mm, natomiast grubość odpowiadała grubości pojedynczego elementu murowego $t = 180$ mm. Wykonano 5 serii modeli badawczych, w ramach których zbadano 3 ÷ 6 elementów próbnymi, ogółem 21 elementów. Poszczególne serie zróżnicowano pod względem typu zaprawy lub konstrukcji spoin wspornych i czołowych.

Serię oznaczoną jako RL-S-N stanowiło 5 elementów bez wypełnienia spoin czołowych, natomiast seria RL-S-NW składała się z 6 elementów z wypełnionymi spoinami czołowymi. Do wykonania elementów zastosowano zaprawę systemową klasy M5. W serii RL-S-NS wykonano i zbadano 3 elementy z pasmowymi spoinami wspornymi, a w serii RL-S-NP również 3 elementy, ale zamiast zaprawy mineralnej zastosowano klej poliuretanowy SOLBET SMART. W dodatkowej serii oznaczonej jako RL-S-N10 zastosowano systemową zaprawę klasy M10, którą nakładano na szerokości równej grubości muru.

Stanowisko badawcze i technika badań

Elementy badawcze 1 osadzono w specjalnych gniazdach stalowych 2, tak aby jedna przekątna była usytuowana pionowo, a ramiona stalowego okucia obejmowały ok. 1/10 długości (wysokości) badanego elementu. Gniazda wyposażono w przeguby walcowe eliminujące wpływ przypadkowych mimośrodków powstałych w trakcie obciążania. Zaopatrzone w stalowe okucia modele badawcze ustawiono na wózku 7 pod stalową ramą 6 i obciążano, stosując stały przyrost przemieszczeń tłoka siłownika hydraulicznego 3, aż do momentu zniszczenia elementu. Widok stanowiska do badań wytrzymałości muru przy ukośnym ściskaniu przedstawiono na rysunku 2.

W trakcie badań dokonywano pomiaru siły obciążającej za pomocą dwóch elektrooporowych sprzężonych siłomierzy 4 o zakresie 100 kN każdy oraz pomiaru przemieszczeń poziomych i pionowych przy użyciu indukcyjnych czujników przemieszczeń 5. Czujniki przemieszczeń naklejono wzdłuż dwóch przekątnych po obydwu stronach modelu. Pomiaru dokonywano wzdłuż baz długości 932 mm, dobranych zgodnie z wytycznymi normy ASTM E519-81 [4], tak aby obejmowały jak największą długość przekątnej. W przypadku każdej zarejestrowanej siły F_i (przy i-tym poziomie obciążenia)

obliczano wartość średnich naprężeń stycznych $\tau_{v,i}$ jako iloraz obciążenia F_i i pola powierzchni przekroju pionowego muru (wzdłuż przekątnej) A_n z zależności:

$$\tau_{v,i} = F_i/A_h = F_i/t\sqrt{l^2 + h^2} \quad (5)$$

gdzie:

F_i = siła pionowa przy i -tym poziomie obciążenia;
 t = 180 mm (grubość muru);
 l = 1180 mm (długość muru);
 h = 1212 mm (wysokość muru).

Wartości naprężeń rysujących τ_{cr} , odpowiadające im kąty Θ_{cr} oraz moduły odkształcenia postaciowego G_{cr} określono od sił rysujących F_{cr} , przy których zaobserwowano pojawienie się nowych rys o rozwarości $> 0,1$ mm. Natomiast naprężenia niszczące τ_u i kąty deformacji postaciowej Θ_u określono przy siłach powodujących zniszczenie modelu (nie rejestrowano dalszego wzrostu obciążeń przy wzroście odkształceń postaciowych muru).

Wyniki badań

Zniszczenie wszystkich elementów badawczych miało charakter gwałtowny, tzn. podczas obciążenia nie pojawiały się rysy widoczne na powierzchniach muru, lecz słyszalne były jedynie pojedyncze i niezbyt intensywne trzaski. Zniszczenie elementów polegało na utracie przyczepności między elementami murowymi a zaprawą w spoinach wspornych i zarysowaniu elementów murowych w środkowym obszarze muru. W elementach z wypełnionymi spoinami czołowymi powstały pionowe zarysowania między elementami. Typowy obraz zarysowania modeli pokazano na fotografii, a w tabeli 2 zestawiono średnie wyniki naprężeń w chwili zarysowania $\tau_{cr,mv}$ i zniszczenia $\tau_{u,mv}$. Dysponując wynikami badań różnych serii elementów w tabeli 2 (w ostatniej kolumnie) przedstawiono również obliczoną charakterystyczną wytrzymałość muru na ścinanie wg procedury podanej w Załączniku D Eurokodu PN-EN 1990:2004 [13]. Jako porównanie w przedostatniej kolumnie podano również wyniki badań zawartych w [1]. Na rysunku 3 porównano wyniki badań naprężeń w chwili zarysowania i zniszczenia.

Zgodnie z PN-EN 1996-1-1, charakterystyczną wytrzymałość na ścinanie $f_{vk,EC6}$ muru wykonanego na zaprawie ogólnego przeznaczenia lub na zaprawie do cienkich spoin grubości $0,5 \div 3$ mm, lub na lekkiej zaprawie, mającego niewypełnione spoiny pionowe, ale z przyległymi do siebie czółami elementów murowych, można określać z równania

$$f_{vk,EC6} = 0,5f_{vko,EC6} + 0,4\sigma_d = 0,5f_{vko,EC6} + 0,8tg\alpha_{EC6}\sigma_d \quad (6)$$

przy czym $f_{vko,EC6}$ wynosi nie więcej niż $0,045f_0$ lub $0,7$ wartości granicznej równej $0,25 \text{ N/mm}^2$ (por. tablica NA6 normy [2]). Biorąc pod uwagę, że badania wykonano na niewielkich ścianach przy $\sigma_d = 0$, uznać należy, że uzyskane wytrzymałości na ścinanie serii, w których nie wypełniano spoin czołowych zaprawą, uwzględniają ten wpływ. W związku z tym poszukiwana, początkowa wytrzymałość na ścinanie murów z bloczków z betonem komórkowym z niewypełnionymi spoinami wspornymi, ale ze spoiną równą grubości muru wynosi:

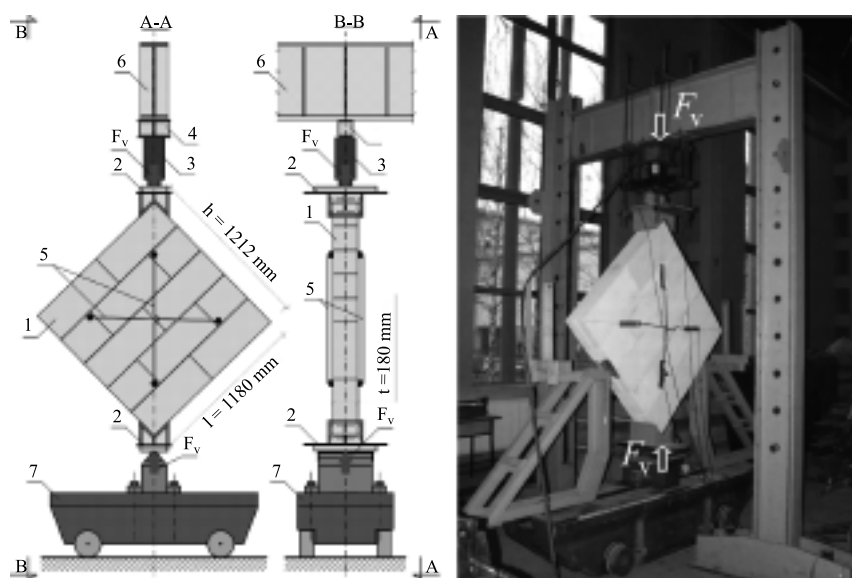
- zaprawa nominalnej klasy M5:

$$f_{vko} = 2f_{vk} = 2 \cdot 0,161 = 0,32 \text{ MPa}$$

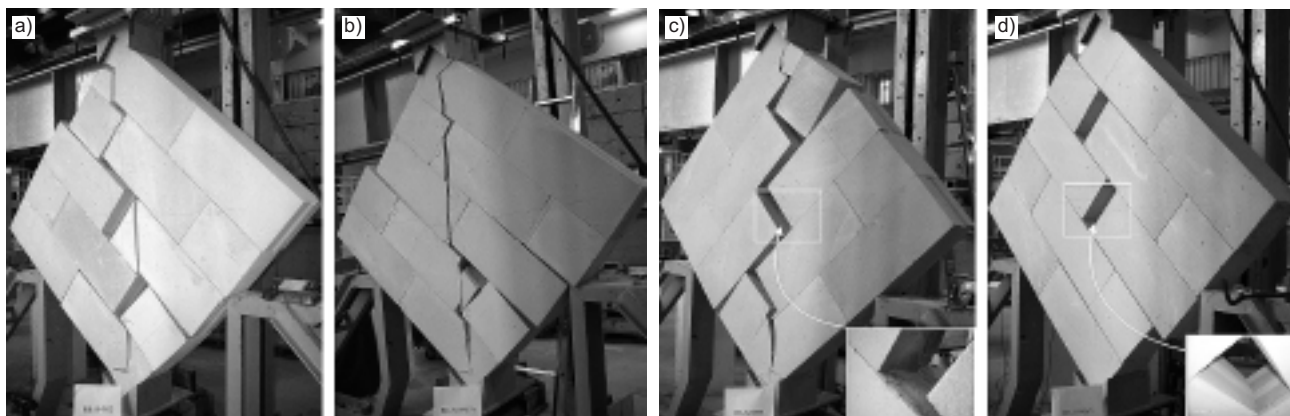
$$> f_{vko,EC6} = 0,25 \text{ MPa};$$

Tabela 1. Program badań ścian ściskanych ukośnie
Table 1. The research program of the masonry diagonally compression

Kształt, wymiary modelu	Nazwa serii	Rodzaj zaprawy	Rodzaj spoiny	Liczba elementów badawczych
	RL-S-N	Solbet 0.1 M5	spoina cienkowarstwowa o szerokości równej szerokości muru	5
	RL-S-NW	Solbet 0.1 M5	spoina cienkowarstwowa o szerokości równej szerokości muru, wypełniona spoiną czołową	6
	RL-S-NP	Solbet Smart	spoina z kleju poliuretanowego	3
	RL-S-NS	Solbet 0.1 M5	pasmosowa spoina cienkowarstwowa o szerokości równej 2 x 50 mm	3
	RL-S-N10	Solbet 0.4 M10	spoina cienkowarstwowa o szerokości równej szerokości muru	3
Razem:				21



Rys. 2. Stanowisko badawcze (opis w artykule)
Fig. 2. The test stand (description in text)








Typowe zarysowanie ścian w chwili zniszczenia: a) modele z cienką spoiną wsporną; b) wypełnione spoiny czołowe; c) elementy z klejem poliuretanowym; d) elementy ze spoinami pasmowymi

Typical cracking patterns: a) thin joint; b) filled head joints; c) polyurethane glue; d) shell bedded joint

Tabela 2. Zbiorcze zestawienie wyników badań

Table 2. Summary of the test results

Lp.	Seria	$\tau_{cr,mv}$ [MPa]	$\tau_{u,mv}$ [MPa]	f_{vk} [MPa] wg pracy [1] zgodnie z normą PN-EN 1052-3:2004 [3]	f_{vk} [MPa] wg normy ASTM E519-81 [4]
1	 RL-S-N	0,192	0,196	0,24	0,161
2	 RL-S-NW	0,282	0,292	–	0,168
3	 RL-S-NP	0,135	0,138	0,22	0,076
4	 RL-S-NS	0,123	0,126	0,11	0,064
5	 RL-S-N10	0,180	0,189	–	0,114

na ścinanie ścian z wypełnionymi spoinami czołowymi jest równa:

$$f_{vk, EC6} = f_{vko, EC6} = 0,168 \text{ MPa} < f_{vko, EC6} = 0,25 \text{ MPa} \quad (8)$$

W przypadku zapraw mineralnych nominalnej klasy M5 i M10 oraz spoin o szerokości równej szerokości muru uzyskano wytrzymałość większą lub zbliżoną do zalecanej przez EC6, natomiast w przypadku kleju poliuretanowego początkowa wytrzymałość charakterystyczna muru na ścinanie była o ponad 40% mniejsza od wymaganej w EC6.

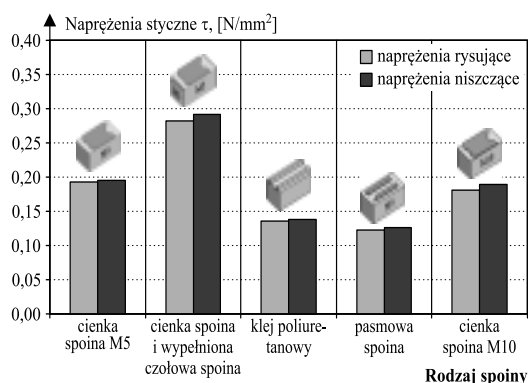
W przypadku muru ze spoinami pasmowymi, gdzie elementy murowe są układane na dwóch lub więcej równoległych pasmach zaprawy zwykłej, z których każdy ma szerokość Σg co najmniej 30 mm, f_{vk} można obliczyć z zależności:

$$f_{vk, EC6} = (\Sigma g/t) f_{vko, EC6} + 0,4\sigma_d = (\Sigma g/t) f_{vko, EC6} + 0,8tg\alpha_{EC6}\sigma_d \quad (9)$$

Po uwzględnieniu, że $\sigma_d = 0$, początkową wytrzymałość muru na ścinanie z pasmowymi spoinami o szerokości $t = 2 \times 50 \text{ mm}$ można obliczyć z wzoru:

$$f_{vko} = (t/g) f_{vk} = (180/2 \cdot 50) 0,064 = 0,115 \text{ MPa} < f_{vko, EC6} = 0,25 \text{ MPa} \quad (10)$$

W tej sytuacji początkowa wytrzymałość na ścinanie ze spoiną pasmową okazała się o przeszło 46% mniejsza od wytrzymałości zalecanej przez normę. W normie nie uwzględniono sytuacji, w której mur ze spoiną pasmową nie ma wypełnionych spoin czołowych, słusznie zakładając, że redukcja wytrzymałości na ścinanie spowodowana jest przede wszystkim przez pasmowe spoiny. Jeżeli uwzględniony zostanie ten fakt, wtedy początkowa wytrzymałość charakterystyczna na ścinanie



Rys. 3. Porównanie wartości naprężeń rysujących $\tau_{cr,mv}$ i niszczących $\tau_{u,mv}$ wszystkich serii

Fig. 3. Comparisons of cracking $\tau_{cr,mv}$ and ultimate $\tau_{u,mv}$ shear stress all series

- zaprawa nominalnej klasy M10:
 $f_{vko} = 2f_{vk} = 2 \cdot 0,114 = 0,23 \text{ MPa}$
 $< f_{vko, EC6} = 0,25 \text{ MPa}$;
- klej poliuretanowy:
 $f_{vko} = 2f_{vk} = 2 \cdot 0,076 = 0,152 \text{ MPa}$
 $< f_{vko, EC6} = 0,25 \text{ MPa}$;

W sytuacji, gdy ściana wykonana jest z cienkimi spoinami wspornymi z wypełnionymi spoinami czołowymi, wytrzymałość charakterystyczna na ścinanie wg EC6 wynosi:

$$f_{vk, EC6} = f_{vko, EC6} + 0,4\sigma_d = f_{vko, EC6} + 0,8tg\alpha_{EC6}\sigma_d \quad (7)$$

Po uwzględnieniu $\sigma_d = 0$, początkowa wytrzymałość charakterystyczna

murów ze spoinami pasmowymi, bez wypełnionych spoin czołowych, wynosi $f_{vko} = 2 \times 0,115$ MPa i jest o 8% większa od wartości normowej wynoszącej 0,25 MPa.

Wnioski

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- w stosunku do mechanizmu zarysowania i zniszczenia:

- we wszystkich elementach, w których zastosowano zaprawę mineralną M5 i M10 oraz klej poliuretanowy, proces zarysowania i zniszczenia elementów przebiegał w sposób gwałtowny. Zniszczenie polegało na utracie przyczepności między elementami murowymi i zaprawą, a sporadycznie pojawiały się zarysowania elementów w środkowym obszarze modelu;

- w stosunku do wartości naprężeń stycznych w chwili zarysowania $\tau_{cr, mv}$:

- w modelach wykonanych na zaprawie M5 ze spoiną szerokości równej grubości muru wartości naprężeń stycznych w chwili zarysowania wynosiły $\tau_{cr, mv} = 0,192$ MPa i były o 47% mniejsze niż w elementach z wypełnioną spoiną czołową;

- w modelach ze spoiną pasmową naprężenia w chwili zarysowania wynosiły $\tau_{cr, mv} = 0,123$ MPa i były o 36% mniejsze niż w modelu ze spoiną o szerokości równej szerokości muru;

- w modelach wykonanych na kleju poliuretanowym wartości naprężeń stycznych w chwili zarysowania wynosiły $\tau_{cr, mv} = 0,136$ MPa i były o 30% mniejsze od uzyskanych w modelach ze spoiną szerokości równej grubości muru;

- w przypadku gdy do wykonania modeli użyto zaprawy klasy M10, wartości naprężeń rysujących w modelach ze spoiną wsporną o szerokości równej grubości muru wyniosły $\tau_{cr, mv} = 0,180$ MPa, czyli były mniejsze niż w elementach na zaprawie klasy M5;

- w stosunku do wartości naprężeń stycznych w chwili zniszczenia $\tau_{u, mv}$:

- w modelach wykonanych na zaprawie M5, ze spoiną o szerokości równej grubości muru, wartości naprężeń stycznych w chwili zniszczenia wynosiły $\tau_{u, mv} = 0,196$ MPa i były o 49% mniejsze niż w elementach z wypełnioną spoiną czołową;

- w modelach ze spoiną pasmową naprężenia w chwili zniszczenia wynosiły $\tau_{u, mv} = 0,126$ MPa i były o 35% mniejsze niż uzyskane w modelu ze spoiną o szerokości muru;

- w modelach wykonanych na kleju poliuretanowym wartości naprężeń stycznych w chwili zniszczenia wynosiły $\tau_{u, mv} = 0,138$ MPa i były o 29% mniejsze od uzyskanych w modelach ze spoiną szerokości równej grubości muru;

- gdy do wykonania modeli użyto zaprawy klasy M10, wartości naprężeń niszczących w modelach ze spoiną wsporną szerokości równej grubości muru wyniosły $\tau_{u, mv} = 0,189$ MPa i były mniejsze niż w elementach na zaprawie klasy M5.

W odniesieniu do zaleceń normowych uzyskano następujące rezultaty:

- początkowa wytrzymałość charakterystyczna na ścinanie f_{vko} murów niezbrojonych wyniosła:

- w murach na zaprawie do spoin ciekowarstwowych nominalnej klasy M5: $f_{vko} = 0,32$ MPa i była większa od wartości podanej w EC6 wynoszącej 0,25 MPa;

- w murach na zaprawie do spoin ciekowarstwowych nominalnej klasy M10: $f_{vko} = 0,23$ MPa i była niewiele mniejsza od wartości podanej w EC6 wynoszącej 0,25 MPa;

- w murach, w których zastosowano klej poliuretanowy: $f_{vko} = 0,15$ MPa i była mniejsza od wartości podanej w EC6 wynoszącej 0,25 MPa;

- w murach na zaprawie do spoin ciekowarstwowych nominalnej klasy M5 ze spoinami pasmowymi 2×40 mm: $f_{vko} = 0,17$ MPa i była mniejsza od wartości podanej w EC6 wynoszącej 0,25 MPa, a po uwzględnieniu, że mury tego typu nie miały wypełnionych spoin czołowych, uzyskano wytrzymałość $f_{vko} = 0,34$ MPa, która była większa od wartości normowej wynoszącej 0,25 MPa.

Wnioski ogólne z przeprowadzonych badań:

- wykonanie spoin czołowych wypełnionych zaprawą wpływa korzystnie na wartość naprężeń rysujących i niszczących;

- stosując klej poliuretanowy, uzyskano znacznie mniejszą wartość naprężeń w chwili zarysowania w porównaniu z murami na zaprawie mineralnej;

- w murach ze spoinami pasmowymi względnej szerokości równej $100/180 = 0,56$, wartości naprężeń w chwili zarysowania i zniszczenia były wyraźnie mniejsze niż w elementach ze spoiną wsporną rozmieszczoną na całej grubości muru. Stosunek uzyskanych wytrzymałości w chwili zarysowania był jednak większy niż stosunek pól powierzchni spoin i wynosił $0,123/0,192 = 0,64$, a w chwili zniszczenia $0,126/0,196 = 0,66$;

- dwukrotne zwiększenie klasy wytrzymałościowej zaprawy z M5 do M10 nie spowodowało proporcjonalnego wzrostu wartości naprężeń rysujących i niszczących w stosunku do elementów wykonanych na zaprawie niższej klasy.

Dziękujemy firmie Solbet sp. z o.o. za podjęcie współpracy z Katedrą Konstrukcji Budowlanych oraz merytoryczną i materialną pomoc przy realizacji badań konstrukcji murowych.

Literatura

- [1] Drobiec Ł., Jasiński R.: Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z betonu komórkowego poddanych ścinaniu. Materiały Budowlane, nr 5/2015, str. 106 – 109.
- [2] PN-EN 1996-1-1+A1:2013-05/NA: 2014-03: Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.
- [3] PN-EN 1052-3:2004/A1: 2009 Metody badań murów. Część 3: Określanie początkowej wytrzymałości muru na ścinanie.
- [4] ASTM E519-81 Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) of Masonry Assemblages.
- [5] Drobiec Ł., Jasiński R.: Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z ABK poddanych ścisaniu. Materiały Budowlane, nr 4/2015, str. 3 – 7.
- [6] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Konstrukcje murowe według Eurokodu 6 i norm związanych. Tom 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
- [7] RILEM LUMB 6: 1991 Diagonal Tensile Strength Tests of Small Wall Specimens. TC 76 – LUM.
- [8] Frocht M. M. Recent advances in photoelasticity. Transactions of the ASME. Vol. 55, September–December 1931, str. 135 – 153.
- [9] Milosevic J., Gago A. S., Lopes M., Bento R.: Experimental assessment of shear strength parameters on rubble stone masonry specimens. Construction and Building Materials. Vol. 47, 2013, str. 1372 – 1380.
- [10] Calderini Ch., Cattari S., Lagomarsino S.: The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of Masonry. Construction and Building Materials. Vol. 24, 2010, str. 677 – 685.
- [11] Brignola A., Frumento S., Lagomarsino S., Podesta S.: Identification of shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test. International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration. Vol. 3, Issue 1, 2008, str. 52 – 73.
- [12] Jasiński R., Piekarczyk A., Kubica J.: Badania początkowej wytrzymałości muru na ścinanie wg zaleceń Rilem Lumb 6. XLVII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2001, tom 3, str. 353÷360.
- [13] PN-EN 1990: 2004. Podstawy projektowania konstrukcji.

Otrzymano 21.04.2015 r.