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

Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z betonu komórkowego poddanych ścinaniu – odkształcalność postaciowa

Influence of the kind of mortar on mechanical parameters of AAC masonry subjected to shear – dilatational deformability

DOI: 10.15199/33.2015.07.32

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki badań odkształcalności postaciowej i modułu odkształcenia postaciowego muru. Na podstawie badań 21 modeli, w których zastosowano 3 typy zapraw i 3 typy spoin wspornych oraz 2 typy spoin czołowych (bez lub z zaprawą) wykazano, że największe wartości kątów odkształcenia postaciowego i moduły odkształcenia postaciowego uzyskano, wypełniając czołowe spoiny zaprawą. Natomiast stosując do łączenia elementów murowych klej poliuretanowy, uzyskano niekorzystnie dużą odkształcalność postaciową. Słowa kluczowe: konstrukcje murowe, projektowanie konstrukcji murowych, wpływ rodzaju zaprawy, odkształcalność postacio-

wa muru, moduł ścinania (Kirchhoffa), Eurokod 6.

metodzie ukośnego ściskania (rozciągania) ścinanie realizowane jest w sposób pośredni przez siły ściskające zorientowane ukośnie w stosunku do płaszczyzny spoin wspornych. Dzięki temu, w obszarze środkowym ściany główne naprężenia rozciągające σ, są równe naprężeniom stycznym i pochylone pod kątem 45° w stosunku do płaszczyzny spoin wspornych. Zniszczenie muru następuje na skutek zarysowania elementów murowych i zaprawy rysą biegnącą zgodnie z kierunkiem głównych naprężeń rozciągających wg [2]

$$\sigma_{1} = \tau = \frac{\sqrt{2}F}{2A_{n}} = \frac{0,707F}{A_{n}}$$
(1)

gdzie:

F - siła ściskająca (rozłupująca);

A, - pole powierzchni poprzecznego przekroju muru obliczane z zależności $A_n = 0,5(I + h)tn;$

I, 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 drążeń) elementu murowego.

Dokonując podczas badań pomiarów zmiany długości przekątnych muru [2], możliwe jest wyznaczenie kąta odkształcalności postaciowej i modułu ścinania wg zależności

$$\Theta = 2 \operatorname{arctg}\left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{y} + |\Delta \mathbf{x}| + |\Delta \mathbf{y}|}{\mathbf{x} + \mathbf{y} + |\Delta \mathbf{x}| - |\Delta \mathbf{y}|}\right) \to \mathbf{G} = \frac{\tau}{\Theta}$$
(2)

gdzie:

x, y – długość przekątnych modelu w kierunku prostopadłym i równoległym do siły;

Θ - kąt odkształcenia postaciowego;

 Δx , Δy – przyrost długości przekątnych modelu;

G – moduł odkształcenia postaciowego.

Abstract. In the article research results are presented dilatational deformability and shear modulus of the walls. On the basis of 21 models that use 3 types of mortars and 3 types of bed joints and 2 types of head joints (with or without mortar) have shown that the greatest values of the angles shear and shear modules obtained by filling leading mortar joints. Applying for joining masonry polyurethane glue obtained unfavorably high dilatational deformability.

Keywords: masonry structures, design of masonry structures, influence of the kind of mortar, masonry dilatational deformability, shear modulus (Kirchhoff modulus), Eurocode 6.

Opis badań

Wszystkie wykonane i zbadane modele miały takie same wymiary i kształt. Długość każdej ściany była równa I = 1180 mm, wysokość wynosiła h = 1212 mm, a grubość odpowiadała grubości pojedynczego elementu murowego t = 180 mm (rysunek 1). Wykonano 5 serii elementów, w ramach Rys. 1. Kształt, wymiary których zbadano 3 – 6 elementów modelu





próbnych (łącznie 21 elementów – Fig. 1. Form, dimension model tabela 1). Poszczególne serie zróżnicowano pod względem

typu zaprawy lub konstrukcji spoin wspornych i czołowych. Elementy zbadano w specjalnym stanowisku opisanym szczegółowo w [1], w którym możliwe było wywołanie siły ściskającej przyłożonej przez stalowe gniazda do przeciwległych narożników ściany. Gniazda zaopatrzone zostały w przeguby walcowe eliminujące wpływy przypadkowych mimośrodów powstałych podczas obciążania. Ponadto w trakcie badań dokonywano pomiaru przemieszczeń poziomych i pionowych przy użyciu czujników indukcyjnych, które naklejono wzdłuż dwóch przekątnych po obydwu stronach modelu. Pomiaru dokonywano na długości 932 mm z dokładnością do 0,002 mm. Długość baz dobrano zgodnie z wytycznymi normy ASTM E519-81 [2], tak aby obejmowały jak największą długość przekątnej. Przy każdej zarejestrowanej sile F, (przy i-tym poziomie obciążenia) obliczano wartość średnich naprężeń stycznych τ_{vi} jako iloraz obciążenia F

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*)} Autor do korespondencji: e-mail: radoslaw.jasinski@polsl.pl

Nazwa serii	Rodzaj zaprawy	Rodzaj spoiny	Liczba elementów badawczych	
NI5 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	pasmowa spoina cienko- warstwowa o szerokości równej 2 x 50 mm	3	
MIN RL-S-N10	Solbet 0.4 M10	spoina cienkowar- stwowa o szerokości równej szerokości muru	3	
	21			

 Tabela 1. Program badań ścian ściskanych ukośnie

 Table 1. The research program of the masonry diagonally compression

i pola powierzchni przekroju pionowego muru (wzdłuż przekątnej) A_k z zależności:

$$=\frac{F_i}{A_h}=\frac{F_i}{t\sqrt{l^2+h^2}}$$

(3)

gdzie:

F, = siła pionowa przy i-tym poziomie obciążenia;

 $\tau_{v,i}$

t = 180 mm grubość muru; l = 1180 mm długość muru;

h = 1212 wysokość muru.

Kąt odkształcenia postaciowego Θ_i oraz moduł odkształcenia postaciowego G_i wyznaczano w funkcji obciążenia F_i z zależności (2). Wartości naprężeń rysujących τ_{cr} i odpowiadające im kąty Θ_{cr} oraz moduły odkształcenia postaciowego G_{cr} określono w przypadku sił rysujących F_{cr} , przy których zaobserwowano pojawienie się nowych rys o rozwartości 0,1 mm. Natomiast naprężenia niszczące τ_u i kąty deformacji postaciowej Θ_u określano przy siłach powodujących zniszczenie modelu (nie rejestrowano dalszego wzrostu obciążeń przy wzroście odkształceń postaciowych muru).

Wyniki badań

We wszystkich ścianach zniszczenie muru przebiegało dość gwałtownie, tracona była przyczepność między elementami murowymi a zaprawą w spoinach wspornych i nastąpiło zarysowanie elementów murowych w środkowym obszarze muru. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie uzyskanych zależności naprężenie styczne – kąt odkształcenia postaciowego ($\tau - \Theta$).

We wszystkich elementach na zaprawach mineralnych M5 i M10 do chwili zarysowania odkształcenia postaciowe zmieniały się proporcjonalnie do naprężeń. Nieproporcjonalny wzrost odkształceń w funkcji naprężeń stycznych wystąpił w elementach połączonych klejem poliuretanowym. W zasadzie po zarysowaniu następowało zniszczenie elementu bez





wzrostu odkształceń postaciowych. W tabeli 2 zestawiono średnie kąty odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania $\Theta_{cr,mv}$ i zniszczenia $\Theta_{u,mv}$ oraz modułów odkształcenia postaciowego $G_{cr,mv}$.

W modelach z cienka spoina wsporna z zaprawy M5 o grubości równej szerokości muru zarysowania występowały przy średnim kącie $\Theta_{cr,mv}$ = 0,587 mrad, natomiast w pozostałych seriach były mniejsze. W modelu z klejem poliuretanowym w chwili zarysowania odkształcenia postaciowe były niemal dwukrotnie większe $\Theta_{cr.mv}$ = 1,159 mrad. Kiedy zastosowano zaprawę klasy M10, uzyskano odkształcenia postaciowe Θ_{crmv} = 0,518 mrad, a więc podobne jak w modelach na zaprawie klasy M5. Na Tabela 2. Zbiorcze zestawienie wyników badań Table 2. Summary of the test results

Nazwa serii	⊖ _{cr,mv} [mrad]	G _{cr,mv} [MPa]	⊖ [mrad]	
NO	0,587	329	0,601	
22	0,500	561	0,549	
	1,159	119	1,237	
E STATE	0,379	325	0,401	
AND	0,518	363	0,653	

rysunku 3 porównano uzyskane zależności moduł odkształcenia postaciowego – naprężenie styczne (G – τ) wszystkich zbadanych modeli badawczych. Wynika z niego, że w przedziale naprężeń stycznych 0 – 0,1 $\tau_{u,mv}$ następowała gwałtowna degradacja modułu ścinania muru od wartości G > 2000 MPa do wartości 1000 – 500 MPa, związana z przemieszczeniami elementów murowych przez niewypełnione spoiny wsporne. Przy dalszym obciążaniu modeli wartość modułów G również zmniejszyła się, ale gradient był znacznie mniejszy niż w stadium początkowym. W chwili zarysowania wartość modułu odkształcenia postaciowego wynosiła G_{cr.mv} = 329 MPa i była mniejsza niż w pozostałych elementach. Największe wartości modułu odkształcenia postaciowego uzyskano w modelach, w których wypełniano spoiny czołowe zaprawą. Kiedy do połączenia elementów murowych użyto kleju



Rys. 3. Porównanie zależności moduł odkształcenia postaciowego – naprężenie styczne $(G - \tau)$ wszystkich zbadanych serii *Fig. 3. Comparisons of shear modulus – shear stress* $(G - \tau)$ all series

poliuretanowego, uzyskano znacznie mniejszy moduł rzędu $G_{cr,mv} = 119$ MPa, natomiast w modelach na zaprawie M10 wartości modułu były niewiele większe od uzyskanych w elementach na zaprawie M5 i wynosiły $G_{cr,mv} = 363$ MPa. Na rysunku 4 zestawiono zbiorczo wartości kątów odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania i zniszczenia, a na rysunku 5 wartości modułów odkształcenia postaciowego wszystkich zbadanych modeli.

Eurokod 6 [6] podaje, że moduł odkształcenia postaciowego murów niezbrojonych określa się z zależności

$$G_{EC6} = 0.4E_{EC6}$$
(4)

gdzie:

E_{EC6} – jest modułem sprężystości muru obliczanym wg wzoru:

 $E_{EC6} = K_{E}f_{k} = 600Kf_{b}^{0.85} = 600 \cdot 0.75f_{b}^{0.85} = 450 \cdot 4.0^{0.85} = 1462 \text{ MPa}$ gdzie: (5)

 ${\rm f_b}$ – znormalizowana wytrzymałość na ściskanie elementu murowego ${\rm f_b}$ = 4 MPa.

W tabeli 3 zestawiono wyniki badań murów niezbrojonych oraz obliczonych wartości modułów odkształcenia postaciowego, podając także wartość modułu odkształcenia postaciowego obliczonego na podstawie wartości E_{test} uzyskanej w badaniach murów ściskanych przedstawionych w [4] z zależności





Rys. 4. Porównanie wartości kątów odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania Θ_{crmv} i zniszczenia $\Theta_{u,mv}$ wszystkich serii Fig. 4. Comparisons of non-dilatational Θ_{crmv} and ultimate $\Theta_{u,mv}$ strain angle all series





Fig. 5. Comparisons of shear modulus G_{crmv} all series



Table 3. Summary of the shear modulus results

Seria	G [N/mm ²]	f [N/mm ²]	E [N/mm ²]	G _{EC6} [N/mm ²] (4)	G _{test} [N/mm ²] (6)	G _{EC6} / G _{cr,mv}	G _{test} / G _{cr,mv}
NO	329	2,97	2040	- 585	816	1,8	2,5
CK EF	561	2,61	2447		979	1,0	1,7
	119	3,00	770		308	4,9	2,6
E. E	325	2,52	2279		900	1,8	2,8

Moduł odkształcenia postaciowego obliczony wg zaleceń Eurokodu 6 w zależności od nominalnej wytrzymałości na ściskanie wynosił G_{EC6} = 585 MPa i z wyjątkiem ścian z wypełnionymi spoinami pionowymi przekraczał znacznie wartości G_{crmy} uzyskane w badaniach. W przypadku ścian z cienką spoiną o szerokości równej grubości muru oraz spoiną pasmową moduł wyznaczony normowo był ponad 80% większy. Natomiast kiedy zastosowano wypełnienie spoin czołowych, moduł wyznaczony normowo był równy wyznaczonemu w badaniach. W murach, w których zastosowano klej poliuretanowy, moduł obliczony normowo (przy założeniu współczynnika K = 600) był o 400% większy. Większe wartości modułu odkształcenia postaciowego uzyskano również wówczas, kiedy wykorzystano wartości modułu sprężystości E_{test} muru uzyskane w badaniach murów ściskanych. W murze wykonanym na cienką spoinę obliczony moduł odkształcenia postaciowego był ponad 150% większy, a w murze z wypełnionymi spoinami czołowymi 70% od wyznaczonego bezpośrednio w badaniach. W przypadku, gdy do wykonania murów zastosowano klej poliuretanowy, obliczony moduł odkształcenia postaciowego był 160% większy od modułu uzyskanego na drodze empirycznej. Doświadczalnie wyznaczony moduł odkształcenia postaciowego w murach ze spoinami pasmowymi był ponad 180% większy niż obliczony na podstawie znajomości modułu sprężystości muru, a kiedy zastosowano zbrojenie w postaci kratowniczek z podwójnie nakładaną zaprawą, różnica ta wynosiła ponad 100%.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

• w modelach wykonanych na zaprawie M5 ze spoiną o szerokości równej grubości muru moduł odkształcenia postaciowego wynosił G_{crmv} = 329 MPa i był o 71% mniejszy niż w elementach z wypełnioną spoiną czołową;

• w modelach ze spoiną pasmową moduł odkształcenia postaciowego był równy G_{crmy} = 325 MPa i był niemal równy modułowi uzyskanemu w modelach ze spoiną o szerokości równej szerokości muru;

• w modelach wykonanych na kleju poliuretanowym moduł odkształcenia postaciowego wynosił G_{crmv} = 119 MPa i był o 64% mniejszy od modułu uzyskanego w modelach ze spoiną o szerokości równej grubości muru;

• w modelach wykonanych na zaprawie klasy M10 moduł odkształcenia postaciowego wynosił G_{cr.mv} = 363 MPa, czyli był niewiele większy niż w elementach na zaprawie klasy M5.

W odniesieniu do zaleceń normowych uzyskano nastepujace rezultaty:

moduł odkształcenia postaciowego obliczony wg zaleceń Eurokodu 6, w zależności od nominalnej wytrzymałości na ściskanie, wynosił G_{EC6} = 585 MPa;

w przypadku ścian z cienką spoiną o szerokości równej grubości muru oraz w wypadku spoiny pasmowej moduł wyznaczony normowo był ponad 80% większy od wartości wyznaczonej w badaniach;

w murach z dodatkowo wypełnionymi spoinami czołowymi moduł obliczony normowo był identyczny z modułem uzyskanym na drodze empirycznej;

w murach, gdzie zastosowano klej poliuretanowy, moduł obliczony normowo był o 400% większy;

moduły odkształcenia postaciowego obliczone na podstawie modułów sprężystości (murów ściskanych) wyznaczonych empirycznie były także większe niż uzyskane w badaniach, różnica ta wynosiła:

- 150% w murach z cienkimi spoinami, 70% w murach z wypełnionymi spoinami czołowymi i 180% w murach ze spoinami pasmowymi;

- w murach z klejem poliuretanowym obliczony moduł odkształcenia postaciowego był 160% większy od modułu uzyskanego na drodze empirycznej.

Z przeprowadzonych badań wynikają również wnioski o charakterze ogólnym:

• wykonanie spoin czołowych wypełnionych zaprawą wpływa korzystnie na ograniczenie odkształceń postaciowych w chwili zarysowania;

 stosując klej poliuretanowy, uzyskano odkształcalność postaciową 4-krotnie większą niż murów wykonanych tradycyjnie;

 obliczony wg zaleceń EC6 moduł odkształcenia postaciowego, z wyjątkiem ścian z wypełnionymi spoinami czołowymi, przekraczał znacznie wartości G_{cr.mv} uzyskane w badaniach. Podobną tendencję stwierdzono, gdy moduł odkształcenia postaciowego wyznaczono na podstawie empirycznego modułu sprężystości. W zastosowaniach praktycznych takie przeszacowanie modułu odkształcenia postaciowego może prowadzić do wyraźnego zanizenia odkształceń postaciowych.

Syntetyczne wnioski wynikające z cyklu badań materiałowych

Przedstawione w artykule oraz w publikacjach wcześniejszych [1, 4, 5] wyniki badań wpływu różnych kombinacji rodzaju zapraw oraz konstrukcji spoin wspornych, w odniesieniu do podstawowej konstrukcji muru wykonanego na cienką spoinę bez wypełnionych spoin czołowych, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

zmiana zaprawy wpływa istotnie na wytrzymałość muru na ściskanie; przykładowo zmiana spoiny cienkiej na pasmową powoduje spadek wytrzymałości o ok. 24%

zastosowanie wyższych klas zapraw nie jest czynnikiem istotnie zwiększającym parametry muru ze względu na ścinanie;

wypełniając spoiny czołowe, uzyskać można znaczne zwiększenie wytrzymałości muru na ścinanie oraz wzrost sztywności muru, dzięki czemu ściany wykonane w tej technologii wykorzystać można jako alternatywę ścian zbrojonych. Należy jednak pamiętać, że wypełnienie spoin czołowych powoduje zmniejszenie o 12% wytrzymałości muru na ściskanie;

spoiny pasmowe w murze obniżają właściwości muru przy obciążeniach ścinających, nie jest to jednak wpływ dyskwalifikujący tego typu technologię. Spoiny pasmowe powodują również zmniejszenie wytrzymałości muru na ściskanie, lecz wzór normowy do określania wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie daje bezpieczne jej oszacowanie;

klej poliuretanowy zastosowany do scalenia elementów murowych nie zmniejszył istotnie początkowej wytrzymałości muru na ścinanie, ale zdecydowanie obniżył wartość modułu odkształcenia postaciowego, a tym samym zwiększył odkształcalność postaciową ścian. Zmniejszoną sztywność z powodzeniem wykorzystać można do realizacji ścian niekonstrukcyjnych wykonywanych na podatnych podporach (na stropach na deformującym się podłożu). Wytrzymałość na ściskanie z klejem poliuretanowym jest większa niż murów wykonanych na zaprawach zwykłych i cienkowarstwowych.

Autorzy badań wyrażają szczególne podziekowania 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 - rysoodporność i wytrzymałość na ścinanie. Materiały Budowlane, nr 6/2015, str. 92 - 96.

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

[3] PN-EN 1052-3:2004/A1:2009 Metody badań murów. Część 3: Określanie początkowej wytrzymałości muru na ścinanie.

[4] Drobiec Ł., Jasiński R.: Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z ABK poddanych ściskaniu. Materiały Budowlane, nr 4/2015. str. 3 – 7.

[5] Drobiec Ł., Jasiński R.: Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z betonu komórkowego poddanych ścinaniu. Materiały Budowlane, nr 5/2015, str. 106 - 109.

[6] 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.

Przvieto do druku: 14.06.2015 r.