

dr inż. Adam Piekarczyk¹⁾

Wpływ zastosowania siatek układanych w spoinach wspornych muru na jego wytrzymałość na zginanie

Influence of grid reinforcement placed in masonry bed joints on its flexural strength

DOI: 10.15199/33.2016.12.12

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie muru przy zniszczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych. Wyniki badań porównawczych elementów próbnych niezbrojonych i zbrojonych w spoinach wspornych siatkami stalowymi, z włókien szklanych i bazaltowych wykazały wyższą wytrzymałość na zginanie i większą rysoodporność muru w ten sposób zbrojonego i tak obciążonego. Mury zbrojone wykazywały charakter plastyczny po zarysowaniu, doznając dużych przemieszczeń poziomych i pozwalały na przenoszenie dużego obciążenia prostopadłego do ich powierzchni. W większości badań zbrojonych elementów próbnych obserwowano wzmocnienie muru zginanego, uzyskując maksymalne obciążenie w fazie po zarysowaniu.

Słowa kluczowe: wytrzymałość muru na zginanie, zbrojone konstrukcje murowe, zbrojenie muru siatkami.

Abstract. This paper presents the results of the flexural strength of masonry when plane of failure is perpendicular to the bed joints. Comparison tests of unreinforced specimens and specimens reinforced with steel wire, glass and basalt fiber grids applied in masonry bed joints showed the higher flexural strength and crack resistance of masonry reinforced in this manner and so loaded. Reinforced masonry exposed plastic character after cracking allow for large horizontal displacements and transfer the considerable loads perpendicular to their surface. The strengthening of masonry was observed in most tests of reinforced specimens leading to occurrence of the maximum load in after cracking phase.

Keywords: flexural strength of masonry, reinforced masonry structures, masonry grid reinforcement.

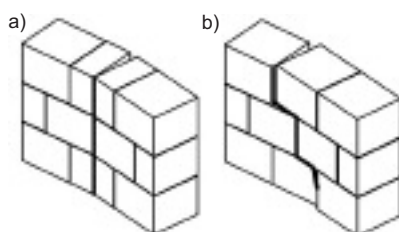
W zależności od orientacji płaszczyzny prostopadłej do płaszczyzny muru, w której na ścianę oddziałuje moment zginający, zgodnie z PN-EN 1996-1-1 [2], wyróżnia się dwa przypadki. W pierwszym do zniszczenia dochodzi w płaszczyźnie równoległej do spoin wspornych, a z uwagi na przyczepność między elementami murowymi i zaprawą zwykle niższą od wytrzymałości na rozciąganie elementów murowych, płaszczyzna zniszczenia przebiega na ogół przez spoiny wsporne muru. Wytrzymałość charakterystyczną muru na zginanie oznacza się wówczas jako f_{xk1} . W drugim przypadku do wyczerpania nośności muru zginanego dochodzi w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych. Zniszczenie muru może wówczas polegać na przekroczeniu wytrzymałości na rozciąganie elementów murowych. W przypadku, gdy niewypełnione są spoiny pionowe (rysunek 1a), płaszczyzna zniszczenia przebiega przez elementy murowe i spoiny pionowe lub może powstać rysa „schodkowa” przebiegająca

wzdłuż spoin wspornych i pionowych, gdy o zniszczeniu decyduwać będzie przede wszystkim maksymalne naprężenie styczne występujące w skręcającej spoinie wspornej (rysunek 1b). Możliwy jest także mieszany mechanizm zniszczenia tak zginanego muru. W tej sytuacji wytrzymałość charakterystyczną na zginanie, wg normy [2], oznacza się symbolem f_{xk2} .

Zwiększenie nośności na zginanie muru przy zniszczeniu w płaszczyźnie prostopa-

dłej do spoin wspornych możliwe jest dzięki umieszczeniu zbrojenia w spoinach wspornych.

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu zastosowania siatek, wykonanych z różnych materiałów, układanych w spoinach wspornych muru na wytrzymałość na zginanie przy zniszczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych oraz wpływu tego rodzaju zbrojenia na wartość obciążenia prostopadłego do powierzchni muru wywołującego jego zarysowanie. Podczas badań dokonano również pomiaru poziomego przemieszczenia (ugięcia) murowanych elementów próbnych niezbrojonych i zbrojonych siatkami.



Rys. 1. Zniszczenie muru zginanego obciążonego prostopadle do jego powierzchni, gdy do wyczerpania nośności dochodzi w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych przebiegającej przez: a) elementy murowe i spoiny pionowe; b) spoiny wsporne i pionowe

Fig. 1. Flexural failure of masonry for the plane of failure perpendicular to the bed joints running through: a) masonry units and vertical joints; b) bed and vertical joints

Elementy próbne i metoda badań

Do wykonania elementów próbnych zastosowano bloczki z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) SOLBET Optimal o średniej gęstości 600 kg/m³ z uchwytami montażowymi i wyposażone w pióro i wpust. Zgodnie z deklaracją producenta nominalna szerokość bloczków wynosi 180 mm, wysokość 240 mm, natomiast długość 590 mm, przy deklarowa-

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa; adam.piekarczyk@polsl.pl

ných odchylek na długości i szerokości $\pm 1,5$ mm oraz $\pm 1,0$ mm na wysokości. Z deklaracji producenta wynika, że bloczki należą do kategorii I elementów mury, a średnia deklarowana wytrzymałość na ściskanie nie powinna być mniejsza niż $3,0$ N/mm². Zgodnie z wynikami badań materiałowych przeprowadzonych w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej w Gliwicach i opublikowanych w [1], średnia znormalizowana wytrzymałość bloczków f_b określona na podstawie PN-EN 772-1 [3] na próbkach sześciennych o boku 100 mm, wyciętych z bloczków, wyniosła $4,04 - 4,10$ N/mm² w zależności od kierunku obciążenia ściskającego.

Zgodnie z aktualną deklaracją właściwości użytkowych, wytrzymałość na zginanie muru z bloczków z ABK przy zniszczeniu w płaszczyźnie równoległej do spoin wspornych wynosi $0,105$ N/mm², natomiast wytrzymałość na zginanie, gdy płaszczyzna zniszczenia jest prostopadła do spoin wspornych i spoiny pionowe są niewypełnione, jest nie mniejsza niż $0,075$ N/mm².

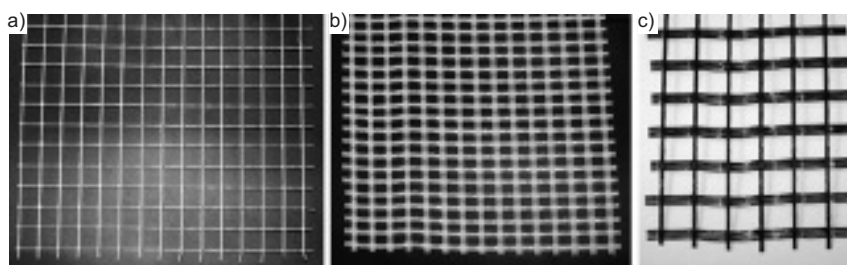
Elementy próbne wykonano przy użyciu systemowej zaprawy murarskiej na cementie białym SOLBET 01 do murowania konstrukcji murowych z ABK z cienkimi spoinami klasy M5. Zgodnie z wynikami badań materiałowych przeprowadzonych wg normy PN-EN 1015-11 [4] przedstawionych w [1], wytrzymałość zaprawy na zginanie wynosiła $2,0$ N/mm², natomiast średnia wytrzymałość na ściskanie $6,1$ N/mm².

Do zbrojenia muru układanego w spoinach wspornych użyto trzech rodzajów siatek:

1) zgrzewanej stalowej Armanet® o oczkach kwadratowych $12,7 \times 12,7$ mm i średnicy drutu $1,05$ mm (rysunek 2a) zabezpieczonej antykorozyjnie warstwą cynku w ilości nie mniejszej niż 350 g/m². Zgodnie z deklaracją producenta wytrzymałość na rozciąganie pojedynczego drutu wynosi 350 N;

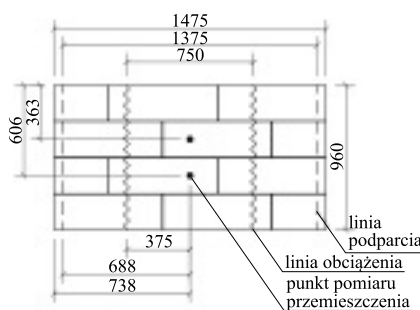
2) z włókien szklanych o osnowie złożonej z trzech nici i pojedynczej nici wątku (rysunek 2b). Odległość między środkowymi niemi osnowy wynosiła ok. 13 mm, natomiast między niemi wątku 9 mm, a gramatura zaimpregnowanej siatki (według deklaracji producenta) 335 ± 30 g/m². Deklarowana wytrzymałość na rozciąganie pasa siatki o szerokości 5 cm jest nie mniejsza niż 4000 N w przypadku rozciągania w kierunku wzdłuż osnowy i nie mniejsza od 3000 N, gdy siła rozciągająca jest równoległa do kierunku wątku. Siatka jest według producenta odporna na alkalia i gnicie;

3) z włókien bazaltowych o oczkach 30×30 mm i gramaturze 260 ± 10 g/m², zbudowanej z pojedynczej nici osnowy i poczwórnej nici wątku (rysunek 2c). Deklarowana wytrzymałość na rozciąganie siatki w obydwu prostopadłych kierunkach jest nie mniejsza niż 50000 N/m, wydłużenie przy zerwaniu wynosi $2,5 \pm 1\%$, a ciężar objętościowy włókien, z których wykonano siatkę $2,67 \pm 5\%$ g/cm³, natomiast deklarowana temperatura topnienia to 1350 ± 100 °C.



Rys. 2. Siatki zastosowane do zbrojenia muru zginanego, układane w spoinach wspornych, wykonane z: a) ocynkowanego drutu stalowego; b) włókien szklanych; c) włókien bazaltowych
Fig. 2. Grids used to reinforce the masonry laid in bed joints and made of: a) galvanized steel wire; b) glass fibers; c) basalt fibers

Kształt i wymiary elementów próbnych do badania wytrzymałości na zginanie, przy płaszczyźnie zniszczenia prostopadłej do spoin wspornych, przyjęto zgodnie z wymaganiami PN-EN 1052-2 [5]. Na rysunku 3 pokazano wymiary nominalne elementów próbnych użytych w badaniach. Określono je przy założeniu nominalnych wymiarów elementów murowych oraz cienkich spoin wspornych i pionowych o grubości 3 mm. Normowa metoda badawcza nosi często nazwę metody czterech punktów obciążenia. Elementy próbne podpira się swobodnie wzdłuż dwóch podpór liniowych oddalonych o ok. 50 mm od krawędzi pionowych muru (linie przerywane na rysunku 3), natomiast obciążenie przykłada się również wzdłuż dwóch linii (linie faliste na rysunku 3) w takiej samej odległości od podpór tak, aby pomiędzy liniami obciążenia zna-



Rys. 3. Element próbny użyty w badaniach
Fig. 3. Specimens used in the tests

lazła się co najmniej jedna spoina pionowa. W przypadku opisywanych badań odległość między liniami podpór wynosiła $l_1 = 1375$ mm, natomiast między dwiema liniami obciążenia $l_2 = 750$ mm, a zatem stosunek l_2/l_1 mieścił się w zakresie od $0,4$ do $0,6$ wymagany w normie [5].

Przeprowadzono badania sześciu elementów próbnych niezbrojonych i po sześć elementów próbnych zbrojonych trzema rodzajami siatek (rysunek 2). Łącznie zbadano 24 elementy próbne. Siatki zbroje-

niowe umieszczano w każdej z trzech spoin wspornych muru. Zbrojenie było ciągłe na długości każdej spoiny. W przekroju poprzecznym elementów próbnych w każdej spoinie wspornej występowało 13 drutów siatki stalowej lub 12 potrójnych nitek siatki z włókien szklanych bądź 6 nitek siatki z włókien bazaltowych. Efektywna szerokość zastosowanej siatki stalowej i z włókien bazaltowych wynosiła zatem ok. 155 mm, a szerokość siatki z włókien szklanych ok. 145 mm. Deklarowana wytrzymałość na rozciąganie w kierunku równoległym do spoin wspornych pojedynczej siatki stalowej wynosiła $4,55$ kN, siatki z włókien szklanych $11,6$ kN, natomiast siatki z włókien bazaltowych $7,75$ kN. Elementy próbne niezbrojone nosiły oznaczenie X2N-i, elementy ze zbrojeniem w postaci siatki stalowej oznaczano X2S-i, elementy próbne zbrojone siatką z włókien szklanych miały oznaczenie X2G-i, natomiast zbrojone siatką z włókien bazaltowych X2B-i, gdzie i, to numer kolejnego elementu próbnego w danej serii badawczej i = 1 ... 6.

Badania prowadzono w specjalnie do tego celu zaprojektowanym stalowym stanowisku badawczym odpowiadającym wymaganiom normy [5].

Oprócz pomiaru siły obciążającej elementy próbne dokonywano również pomiaru ich przemieszczeń poziomych (poziomego ugięcia) w dwóch punktach

znajdujących się w środku rozpiętości między liniami podparcia w dwóch wewnętrznych warstwach muru (rysunek 3). Czujniki do pomiaru przemieszczeń o zakresie do 20 mm miały kontakt ze ściśkaną powierzchnią zginanych elementów próbnych.

Wyniki badań

Wytrzymałość średnią i charakterystyczną muru na zginanie wyznaczono zgodnie z normą [5]. W tabeli 1 podano wyniki badań wytrzymałości muru na zginanie przy płaszczynie zniszczenia prostopadłej do spoin wspornych.

Na rysunku 4 przedstawiono zależność średnich wartości poziomych przemieszczeń muru w od siły F , którą obciążano elementy próbne. W przypadku czterech elementów próbnych bez zbrojenia z serii X2N doszło do kruchego zniszczenia mu-

ru, czyli po uzyskaniu maksymalnego obciążenia nastąpiło zarysowanie i gwałtowne zmniejszenie siły przy niewielkim przemieszczeniu (rysunek 4a). Dwa elementy próbne z tej serii charakteryzowały się jednak swoistym zachowaniem plastycznym, które polegało na tym, że po zarysowaniu muru zdolny był do przenoszenia stosunkowo dużej siły przy znacznych przemieszczeniach poziomych. Maksymalną wartość obciążenia uzyskano nie w chwili wystąpienia zarysowania, lecz po wzmocnieniu muru przy dużych przemieszczeniach. Taki specyficzny mechanizm zniszczenia mógł być spowodowany ukształtowaniem powierzchni czołowych elementów murew wyposażonych w pióro i wpust oraz klinowaniem się bloczków przy ich wzajemnym obrocie.

Plastyczny charakter miały wszystkie zależności przemieszczeń poziomych od obciążenia w przypadku elementów próbnych z serii X2S (rysunek 4b), czyli zawierających w spoinach wspornych siatki stalowe. Po zarysowaniu uzyskiwano w badaniach bardzo duże przemieszczenia muru przy obciążeniu pozostającym wciąż na wysokim poziomie. Średnia wartość siły F przy przemieszczeniu poziomym muru, która wynosiła ok. 20 mm, była wciąż większa od średniej siły niszczącej mury bez siatek. W czterech elementach próbnych z serii X2S maksymalne obciążenie było jednocześnie obciążeniem powodującym zarysowanie muru. W przypadku

dwoch elementów wzmocnienie po zarysowaniu okazało się na tyle duże, że siłą maksymalną zarejestrowano po powstaniu rys. Elementy próbne z siatkami z włókien szklanych X2G i bazaltowych X2B również charakteryzowały się plastycznym zachowaniem po zarysowaniu (rysunki 4c i 4d). Podobnie jak poprzednio zaobserwowano duże przemieszczenia przy utrzymujących się dość wysokich siłach wywołujących zginanie. W kilku przypadkach wystąpiły jednak dużo większe spadki nośności i przy mniejszych przemieszczeniach niż w murach zbrojonych siatkami stalowymi. Inny charakter, w porównaniu z elementami próbnymi z serii X2S, miało również wzmocnienie muru zginanego po zarysowaniu. W badaniach wszystkich elementów próbnych z serii X2G i X2B siła towarzysząca zarysowaniu nie była obciążeniem niszczącym. Maksymalną wartość siły F uzyskiwano zawsze w fazie wzmocnienia muru zginanego po wystąpieniu zarysowania.

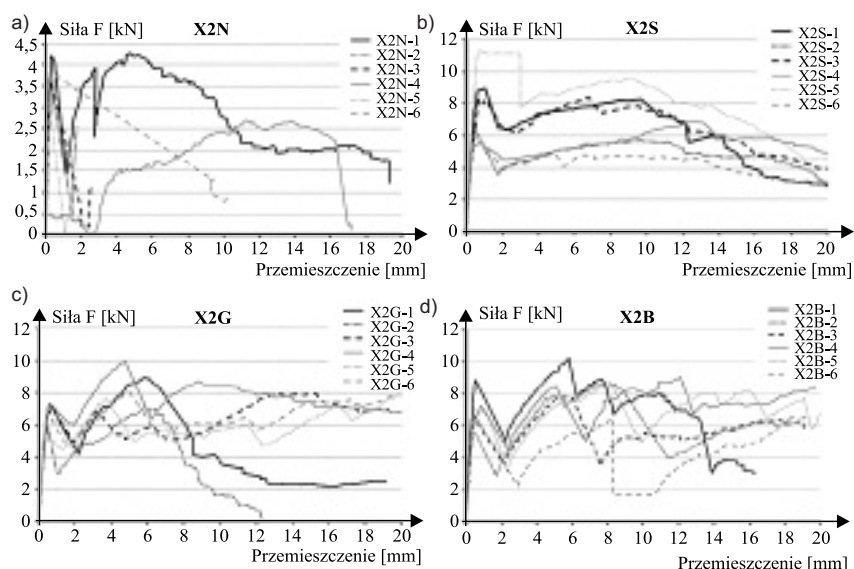
Synteza wyników badań

W tabeli 2 podano wytrzymałość charakterystyczną muru na zginanie przy zniszczeniu w płaszczynie prostopadłej do spoin wspornych. Największy wzrost nośności uzyskano, stosując siatki bazaltowe, natomiast najmniejszy w przypadku elementów próbnych ze zbrojeniem w postaci siatek stalowych przy czym największe

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałości muru na zginanie

Table 1. Results of flexural masonry strength tests

Element próbny	Maksymalna siła $F_{i,max}$ [kN]	Wytrzymałość na zginanie $f_{x2,i}$ [N/mm ²]	Wytrzymałość charakterystyczna f_{yk2} [N/mm ²]
Mur niezbrojony			
X2N-1	4,29	0,13	0,07
X2N-2	3,68	0,11	
X2N-3	3,69	0,11	
X2N-4	2,68	0,08	
X2N-5	3,14	0,09	
X2N-6	3,73	0,11	
Mur zbrojony siatką stalową			
X2S-1	8,93	0,27	0,14
X2S-2	6,39	0,19	
X2S-3	8,37	0,25	
X2S-4	6,85	0,21	
X2S-5	11,3	0,34	
X2S-6	6,08	0,18	
Mur zbrojony siatką z włókien szklanych			
X2G-1	8,93	0,27	0,19
X2G-2	7,05	0,21	
X2G-3	7,97	0,24	
X2G-4	9,92	0,30	
X2G-5	8,06	0,24	
X2G-6	8,07	0,24	
Mur zbrojony siatką z włókien bazaltowych			
X2B-1	10,2	0,31	0,20
X2B-2	8,61	0,26	
X2B-3	7,75	0,23	
X2B-4	8,99	0,27	
X2B-5	8,76	0,26	
X2B-6	7,30	0,22	



Rys. 4. Zależność przemieszczeń poziomych w elementach próbnym od siły F wywołującej zginanie w przypadku muru: a) bez zbrojenia siatkami; b) z siatkami stalowymi; c) z siatkami z włókien szklanych; d) z siatkami z włókien bazaltowych

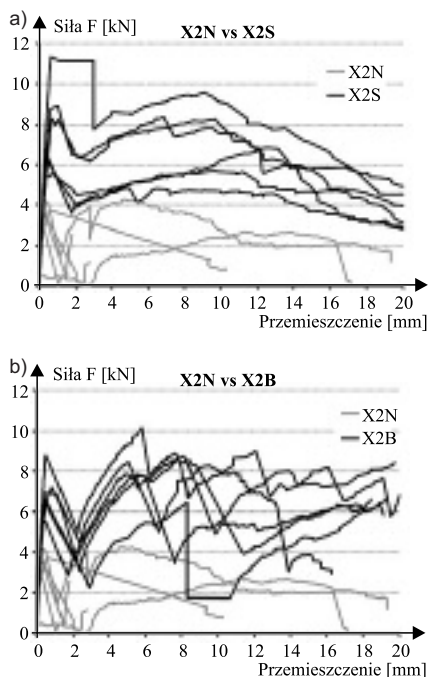
Fig. 4. The horizontal displacements w of the specimens from the F force causing bending in case of the masonry: a) without reinforcing grids; b) with steel wire grids; c) with glass fibres grids; d) with basalt fibres grids

Tabela 2. Wytrzymałość charakterystyczna na zginanie muru niezbrojonego i zbrojonego siatkami różnego rodzaju

Table 2. Characteristic flexural strength of unreinforced masonry and masonry with various grid reinforcement

Elementy próbne	Wytrzymałość charakterystyczna na zginanie f_{yk2} [N/mm ²]	$f_{yk2,(S,G,B)}/f_{yk2,N}$
X2N – niezbrojone	0,07	–
X2S – zbrojone siatkami stalowymi	0,14	2,00
X2G – zbrojone siatkami z włókien szklanych	0,19	2,70
X2B – zbrojone siatkami z włókien bazaltowych	0,20	2,86

szą wytrzymałość na rozciąganie miały siatki z włókien szklanych. Wzrost nośności muru zginanego nie był zatem proporcjonalny do nośności siatek zbrojenio- wych. Uzasadnienie takiego zjawiska wymaga przeprowadzenia próby rozciągania włókien siatek w celu określenia zależności σ - ε i przeprowadzenia na tej podstawie analizy odkształceń i naprężeń w zbrojonym przekroju zginanym. Na rysunku 5



Rys. 5. Porównanie zależności przemieszczeń poziomych w od obciążenia F elementów próbnych niezbrojonych (linie szare) z elementami zbrojonymi (linie czarne): a) siatkami stalowymi; b) siatkami z włókien bazaltowych

Fig. 5. Comparison of the horizontal displacements from the F force dependencies obtained for unreinforced specimens (grey lines) and reinforced specimens (black lines) with: a) steel wire grids; b) basalt fibre grids

porównano zależność przemieszczenia poziomego w od obciążenia F muru niezbrojonego (linie szare) i zbrojonego (linie czarne) siatkami stalowymi (rysunek 5a) i siatkami z włókien bazaltowych (rysunek 5b). Na wykresach widoczna jest większa nośność oraz plastyczny charakter zależności F-w w przypadku muru zbrojonego w porównaniu z niezbrojonym oraz kruche zniszczenie większości niezbrojonych elementów próbnych.

Tabela 3 zawiera wartości sił wywołujących zarysowanie muru, po którym następowało zwykle znaczne zmniejszenie siły i zwiększenie poziomych przemieszczeń. W przypadku niezbrojonych elementów próbnych X2N i zbrojonych siatkami stalowymi X2S siła rysująca była jednocześnie maksymalną wartością uzyskaną w badaniach, inaczej niż w przypadku murów ze zbrojeniem w postaci siatek z włókien szklanych i bazaltowych.

Z porównania średnich sił rysujących uzyskanych w przypadku murów zbrojonych i średniej siły wywołującej zarysowanie murów bez zbrojenia (tabela 3) wynika, że zastosowanie w spoinach wspornych siatek powoduje znaczne

nych i zbrojonych w spoinach wspornych siatkami różnego rodzaju stwierdzono, że:

■ wytrzymałość charakterystyczna na zginanie, określona zgodnie z normą PN-EN 1052-2 [5], murów zbrojonych była co najmniej dwukrotnie większa od wytrzymałości charakterystycznej murów bez zbrojenia;

■ siła wywołująca zarysowanie murów zbrojonych była większa niż w przypadku murów niezbrojonych; stosunek średniej siły rysującej zarejestrowanej w badaniach zbrojonych elementów próbnych do średniej siły powodującej zarysowanie murów niezbrojonych był nie mniejszy niż 1,80;

■ maksymalne poziome przemieszczenie (ugięcie) zbrojonych murów zginanych było większe niż większości murów niezbrojonych; zastosowanie siatek w spoinach wspornych umożliwiło przenoszenie przez mur dosyć dużego obciążenia po wystąpieniu zarysowania przy dużych przemieszczeniach poziomych; w przypadku większości zbrojonych elementów próbnych maksymalne obciążenia uzyskano w fazie wzmocnienia muru po jego zarysowaniu.

Tabela 3. Porównanie sił wywołujących zarysowanie muru zginanego

Table 3. Comparison of forces at the moment of masonry cracking

Elementy próbne	Średnia siła rysująca $F_{cr,mv}$ [kN]	Odchylenie standardowe siły rysującej s_{Fcr} [kN]	Wskaźnik zmienności siły rysującej v_{Fcr} [%]	$F_{cr,mv,(S,G,B)}/F_{cr,mv,N}$
X2N – niezbrojone	3,69	0,38	10,2	–
X2S – zbrojone siatkami stalowymi	7,78	2,19	28,2	2,11
X2G – zbrojone siatkami z włókien szklanych	6,63	0,82	12,4	1,80
X2B – zbrojone siatkami z włókien bazaltowych	6,93	1,08	15,6	1,88

zwiększenie rysoodporności muru zginanego, gdy do zniszczenia dochodzi w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych. Największy wzrost siły rysującej mur zbrojony w stosunku do obciążenia powodującego zarysowanie muru bez zbrojenia zaobserwowano w przypadku zastosowania zbrojenia siatkami stalowymi, choć w tym przypadku wskaźnik zmienności siły rysującej był znacznie większy niż w pozostałych seriach badawczych.

Podsumowanie

Na podstawie wyników badań wytrzymałości na zginanie przy zniszczeniu w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych murów niezbrojo-

Literatura

- [1] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński. 2015. „Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z ABK poddanych ścisaniu”. *Materiały Budowlane* 512 (4): 3 – 7. DOI: 10.15199/33.2015.04.02
- [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 772-1:2011 Metody badań elementów murowych. Część 1: Określanie wytrzymałości na ściskanie.
- [4] PN-EN 1015-11:2001/A1:2007 Metody badań zapraw do murów. Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy.
- [5] PN-EN 1052-2:2001 Metody badań murów. Część 2: Metody badań murów. Określenie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu.

Przyjęto do druku: 12.09.2016 r.