

Badania wpływu wzmocnienia murów z ABK za pomocą zaprawy cementowej z włóknami

The effect of the strengthening of AAC masonry walls using FRCM system

Łukasz Drobiec¹, Radosław Jasiński¹, Wojciech Mazur^{1,*}, Remigiusz Jokiel²

¹ Silesian University of Technology, Department of Building Structures, Akademicka 5, 44-100 Gliwice, Poland

² BUDINŻ PB sp. z o.o. sp. komandytowa, ul. Niedobczycka 2, 44-290 Jejkowice, Poland

*corresponding author: W. Mazur, e-mail: wojciech.mazur@polsl.pl

Streszczenie

W pracy opisano wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przez ściskanie murów bez wzmocnienia, wzmocnionych z jednej oraz z dwóch stron za pomocą zaprawy cementowej z siatką. Modele badawcze wykonano z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego SOLBET OPTIMAL 4/600. Mury wzniesiono na systemowej zaprawie do cienkich spoin klasy M5, bez wypełniania spoin czołowych. Jako wzmocnienie powierzchniowe zastosowano siatki z włókna PBO, osadzone w mineralnej matrycy. Mury wzmocniano nakładając na powierzchnie boczne modeli zaprawę systemową PBO-MX GOLD MASONRY i wtapiano w nią siatkę PBO-MESH GOLD 22/22, a następnie nakładano wierzchnią warstwę zaprawy systemowej PBO-MX GOLD MASONRY. Zastosowane wzmocnienie powierzchniowe pozwoliło na wzmocnienie modeli po zarysowaniu i bezpieczniejsze ich zachowanie po zniszczeniu.

Słowa kluczowe: ABK, FRCM, Aramis, wzmocnienie powierzchniowe

Summary

This paper describes results from testing the tensile strength of compressed masonry walls strengthened with fiber-reinforced cement matrix [FRCM] system on one side, both sides, or without any strengthening. Test models were prepared from masonry units made of autoclaved aerated concrete SOLBET OPTIMAL 4/600. Walls were built with a ready-mixed mortar for thin layer joints of class M5, without filling head joints. PBO fibre grids embedded in a mineral matrix were used as superficial strengthening. Lateral surfaces of masonry walls were strengthened with ready-mixed mortar PBO-MX GOLD MASONRY with embedded grid PBO-MESH GOLD 22/22. Then, the surface layer of ready-mix mortar PBO-MX GOLD MASONRY was applied. The used superficial strengthening provided an additional strengthening of the cracked models and their safer behaviour after failure.

Keywords: AAC, FRCM, Aramis, superficial strengthening

1. Wprowadzenie

Wykonując mur z elementów murowych i zaprawy, przez zróżnicowane ich zastosowanie i różną technikę murowania, można uzyskać mur o różnej wytrzymałości. Konieczność szybszego i łatwiejszego wznoszenia ścian murowanych spowodowała zmiany w technologii murowania. Zrezygnowano z wypełniania spoin czołowych, pionowych oraz stosowania zaprawy do cienkich spoin, niejednokrotnie kosztem zmniejszenia wytrzymałości, odporności na powstawanie rys oraz modułu odkształcenia muru. To spowodowało zwiększenie liczby usterek konstrukcji murowanych oraz

1. Introduction

Specified materials [masonry units, mortar] used in a different way and with a different bricklaying technique, can produce masonry walls with different strengths. Faster and easier erection of masonry walls forced changes in bricklaying techniques by not filling head i.e. vertical joints and by using mortar for thin joints often at the cost of reduced strength, crack resistance, and wall deformation. The above resulted in a greater number of defects in masonry structures, the necessity to strengthen them and increase their load-carrying capacities at the design stage. For new structu-

konieczność ich wzmacniania już na obiekcie i zwiększenia ich nośności na etapie projektowania. W przypadku wznoszonych konstrukcji z autoklawizowanego betonu komórkowego [ABK] wzrost wytrzymałości oraz wzrost odporności na powstawanie rys, można uzyskać wypełniając zaprawą spoiny czołowe lub stosując zbrojenie spoin wspornych (1-3). Uszkodzony mur, lub mur o zbyt małej wytrzymałości, można wzmocnić różnymi metodami, między innymi wzmacniając zewnętrzne powierzchnie muru. W przypadku murów z cegły zazwyczaj wzmocnienie lub naprawę wykonuje się umieszczając zbrojenie w spoinach wspornych lub wykonanie stalowej konstrukcji spinającej mur. Dobre wyniki uzyskuje się dzięki zastosowaniu materiałów kompozytowych. Pierwsze badania dotyczące wzmacniania murów materiałami kompozytowymi przeprowadzili Priestley i Seible (4), a także Schwegler (5) oraz Valluzzi et al. (6), Tomazevic (7) i Al.-Jabeli et al. (8). Zaprezentowano w nich zróżnicowane zastosowanie wzmocnień powierzchniowych, pozwalających uzyskać większą wytrzymałość muru. Zazwyczaj mamy do czynienia z biernym wzmacnianiem konstrukcji. Oznacza to, że wzmocnienie następuje dopiero w chwili przyrostu odkształceń konstrukcji. Czynne wzmacnienie konstrukcji wymaga dodatkowego odkształcenia wzmacnianych elementów przed zastosowaniem, w wyniku ich sprężenia taśmami kompozytowymi. Współpraca między wzmocnionym elementem i kompozytem następuje już w chwili trwałego przytwierdzenia wzmocnienia do elementu. Ze względu na znaczny koszt wykonania wzmocnienia powierzchniowego, w trakcie projektowania rozważa się rodzaj wzmocnienia – włókna szklane lub węglowe, metodę jego zastosowania i wpływ na wzrost nośności. Próbę optymalnej metody zewnętrznego wzmocnienia murów z ABK włóknami wzmocnionymi polimerami, podjęto także na Politechnice Śląskiej (9-11).

Zgodnie z wynikami badań (1-3), zastosowanie zbrojenia kratowniczkami w spoinach wspornych murów z ABK spowodowało wzrost wytrzymałości na ściskanie z poziomu 2,97 MPa do 3,12 MPa (5%) oraz spadek z 0,196 MPa do 0,156 MPa, a więc o 26% wytrzymałości na ścinanie. Wzrost wytrzymałości na ścinanie o 27% uzyskano tylko przy zastosowaniu podwójnie nakładanej warstwy zaprawy. Na podstawie tych wyników postanowiono przeprowadzić badania mające na celu określenie wpływu wzmocnienia powierzchniowego włóknami, na wytrzymałość na ścinanie muru z ABK.

W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przez ściskanie murów wzmocnionych powierzchniowo włóknami z jednej oraz z dwóch stron. Wyniki porównano z wynikami modeli murów bez wzmocnienia. Modele badawcze zostały wykonane z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego SOLBET OPTIMAL 4/600. Mury zostały wzniesione na systemowej zaprawie do cienkich spoin klasy M5, bez wypełniania spoin czołowych. Jako wzmocnienie powierzchniowe zastosowano siatki z włókna PBO, osadzone w mineralnej matrycy.

res built from autoclaved aerated concrete [AAC], the increased strength and crack resistance can be produced by using the filled in head joints or reinforcement in bed joints (1-3). The damaged masonry or the one with too low strength can be strengthened in many ways, including reinforcements applied to the outer surfaces of the wall. Brick walls are usually strengthened or repaired by placing the reinforcement in bed joints or using the steel structure clamping the wall. Composite materials also provide satisfactory results. First tests on strengthening walls with composite materials were presented in the doctoral thesis by Schwegler (4) and one year later the paper of Priestley and Seible (5) was published. Next, much later further papers appeared (6-8). They described a different use of superficial strengthening to provide a higher strength. However, the most common method is a passive strengthening of the structure. It means strengthening is used only at the time of an increase in deformations of the structure. The active strengthening of the structure requires additional deformation of strengthened units before their application, by their tensioning with composite bands. The interaction between the strengthened element and the composite occurs at the time of fixing permanently the strengthening system to the unit. During the designing process a type of strengthening – carbon or glass fibres, the method of its application, and its impact on the increased load-carrying capacity were considered, due to the considerable costs of preparing the strengthening. The Silesian University of Technology also tested the optimal method of external strengthening of AAC masonry walls using fiber-reinforced polymer [FRP systems] (9-11).

According to the test results (1-3), the use of steel truss reinforcement in the supporting joints of AAC walls, increased the compressive strength from 2.97 MPa to 3.12 MPa (5%) and a decrease from 0.196 MPa to 0.156 MPa (26%) in the case of shear strength. An increase in shear strength by 27% was obtained only when using a double layer of mortar. On the basis of these results, it was decided to conduct research aimed at determining the effect of surface reinforcement with the FRCM system on the shear strength of AAC masonry.

This paper describes results from testing the tensile strength of compressed masonry walls strengthened with FRCM system, from one and from two sides. The results were compared with unstrengthened models. The test models were prepared from masonry units made of autoclaved aerated concrete SOLBET OPTIMAL 4/600. Walls were built with a ready-mixed mortar for thin layer joints of class M5, without filling head joints. PBO fibre grids embedded in a mineral matrix were used, as superficial strengthening.

2. Test models and testing programme

Test models were built from masonry units of autoclaved aerated concrete, with dimensions of 600 x 240 x 180 mm, equipped with a tongue and a groove. The density of used masonry units ρ_v was equal to 600 kg/m³, their standardised compressive stress was $f_b = 4.0$ N/mm² (2). The used mortar was ready-mixed and dedicated to thin-layer joints; its compressive strength was $f_m = 6.1$ N/mm²

2. Modele badawcze i program badań

Modele badawcze wykonano z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego o wymiarach 600x240x180 mm, wyposażonych w pióro i wpust. Zastosowane elementy murowe miały gęstość $\rho_v = 600 \text{ kg/m}^3$ oraz znormalizowaną wytrzymałość na ściskanie równą $f_b = 4,0 \text{ N/mm}^2$ (2), systemowej przygotowanej fabrycznie zaprawy cienkowarstwowej, której wytrzymałość na ściskanie wynosiła $f_m = 6,1 \text{ N/mm}^2$ (2). Bloczki miały pióro i wpust na powierzchniach czołowych, w związku z czym nie wypełniano zaprawą spoin pionowych – czołowych. Mury wzmocniano nakładając na powierzchnie boczne modeli zaprawę systemową PBO-MX GOLD MASONRY i wtapiano w nią siatkę PBO-MESH GOLD 22/22. Następnie nakładano wierzchnią warstwę zaprawy systemowej PBO-MX GOLD MASONRY.

Modele badawcze zostały wykonane zgodnie z wymaganiami normy do badania wytrzymałości murów na ściskanie (12). Murki składały się z pięciu warstw elementów murowych. Modele miały wymiary 1180x1212x180 mm b×h×t, co oznacza długość x wysokość x grubość. W części modeli wzmocnienie nałożono na całą powierzchnię boczną, z jednej lub z dwóch stron.

Program badań obejmował 18 modeli badawczych. Seria pierwsza obejmowała 6 modeli referencyjnych, bez wzmocnienia, i została oznaczona jako RL-S-N. Seria druga oznaczona jako RL-S-F1 obejmowała 6 modeli wzmocnionych z jednej strony, a seria ostatnia oznaczona jako RL-S-F2 obejmowała kolejnych 6 modeli wzmocnionych z dwóch stron. Modele badawcze przedstawiono na rysunku 1.

3. Badania

Po minimum 28 dniach od wykonania murów modele serii pierwszej – bez wzmocnienia, poddano badaniu, a na powierzchnie boczne pozostałych modeli badawczych nałożono wzmocnienie powierzchniowe. Po kolejnych, co najmniej 28 dniach, elementy próbne poddano badaniom. Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym i według metody badawczej, zgodnie z normą (13). Elementy badawcze 1 osadzono w specjalnych stalowych gniazdach 2, tak aby jedna z przekątnych była ustawiona pionowo oraz ramiona stalowego okucia obejmowały około 1/10 długości – wysokości, badanego elementu. Gniazda zaopatrzone w przeguby walcowe, eliminujące wpływy mimośrodków przypadkowych, 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. Stanowisko badawcze, służące do badań wytrzymałości muru przy ukośnym ściskaniu, przedstawiono na rysunku 3. Stanowisko badawcze, służące do badań wytrzymałości muru przy ukośnym ściskaniu, pokazano na rysunkach 2 i 3.

W trakcie badań na automatycznym stanowisku pomiarowym dokonywano pomiaru siły obciążającej za pomocą dwóch elek-

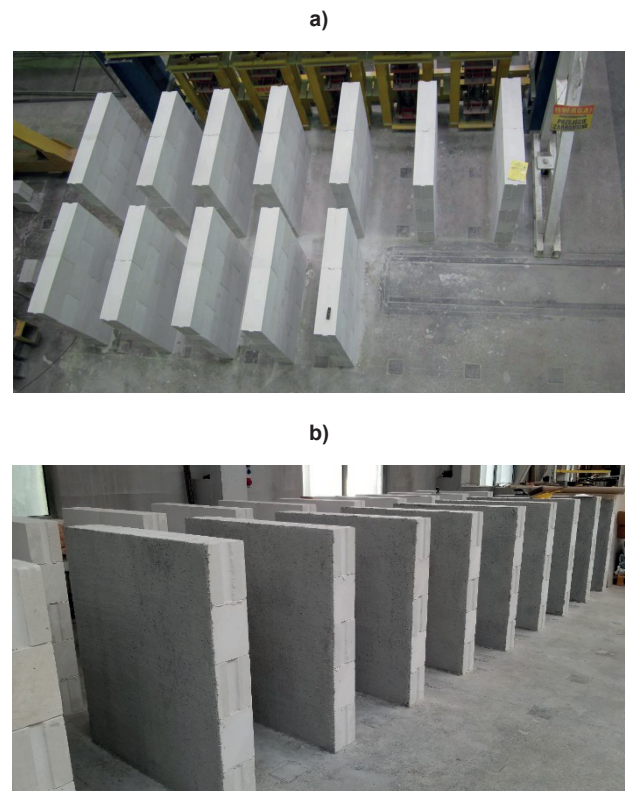
(2). Each block had tongues and grooves on faces, so vertical – head joints were not filled with mortar. The masonry walls were strengthened by applying ready-mixed mortar PBO-MX GOLD MASONRY on lateral surfaces of the models. The grid PBO-MESH GOLD 22/22 was embedded in the mortar. Then, the surface layer of ready-mixed mortar PBO-MX GOLD MASONRY was placed.

Test models were prepared in accordance with the standard requirements (12) for testing the compressive strength of walls. The walls were composed of five layers of masonry units. The models had the following dimensions: 1180 x 1212 x 180 mm b×h×t, which means width x height x thickness. Some models were strengthened on one side, and some on both sides.

The testing programme involved 18 test models. The first series included six reference models marked as RL-S-N. The second series marked as RL-S-NF1 included six models strengthened on one side and the one marked as RL-S-NF2 embraced the other six models, strengthened on both sides. Models at the test stand are shown in Fig. 1.

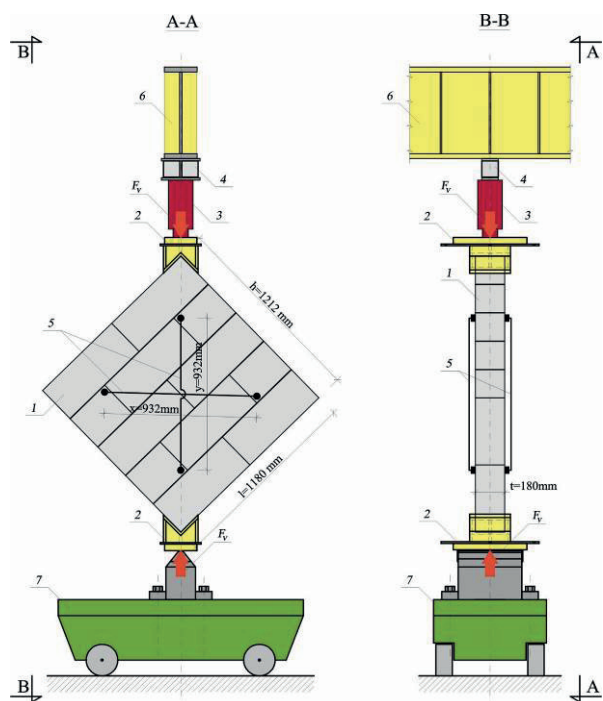
3. Testing technique

After minimum 28 days from building the masonry walls, the unstrengthened models from the first series were tested and lateral surfaces of the test models were coated with the superficial strengthening. The test elements were tested after another 28 days or later. The tests were conducted at the test stand following the test procedure in accordance with the standard (13).



Rys. 1. Modele badawcze: a) niewzmocnione, b) wzmocnione

Fig. 1. The testing models: a) unreinforced, b) reinforced



Rys. 2. Stanowisko badawcze do badań wytrzymałości muru przy ukośnym ściskaniu

Fig. 2. Test stand for testing the wall strength slanting compression

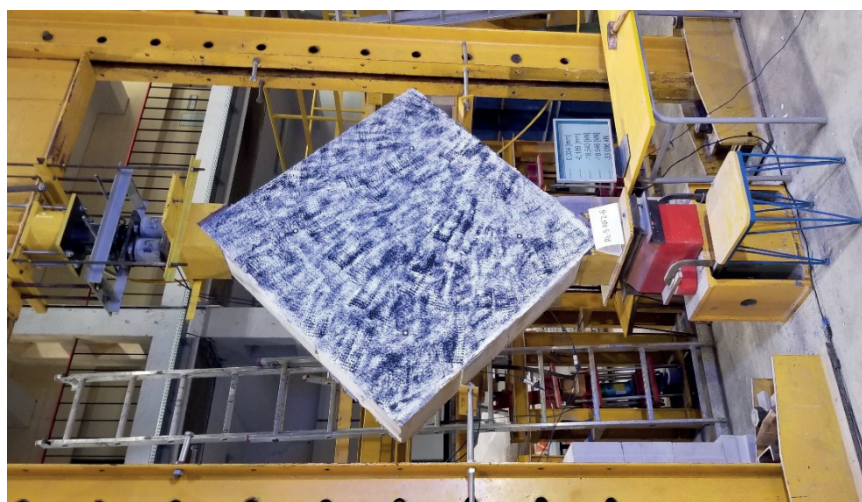
trooporowych sprzężonych siłomierzy 4 o zakresie 100 kN każdy oraz pomiaru przemieszczeń poziomych i pionowych, przy użyciu indukcyjnych przetworników przemieszczeń [LVDT] typu PJX-20 5, o zakresie pomiarowym 20 mm i dokładności 0,002 mm. Czujniki przemieszczeń zamocowano wzdłuż dwóch przekątnych, a pomiaru dokonywano na długości wynoszącej 932 mm. Długość pomiarową dobrano zgodnie z wytycznymi normy ASTM E519-81 (13), tak aby obejmowały jak największą długość przekątnej. W modelach serii pierwszej [RL-S-N] czujniki mocowano z obu stron. Natomiast w modelach serii drugiej [RL-S-F1] i trzeciej [RL-S-F2] z jednej strony zastosowano czujniki, a z drugiej na wzmocnioną powierzchnię modelu naniesiono nieregularny kontrastowy wzór do pomiaru bezdotykową metodą optyczną Aramis – rysunek 3. Na wzorze zaznaczono ponadto punkty w miejscach mocowania tradycyjnych baz pomiarowych, aby móc porównać wyniki z obu stron modelu. Na podstawie zmian długości boków i przekątnych, obliczono, z zależności trygonometrycznych zdeformowanych baz pomiarowych, kąt odkształcenia postaciowego Θ , wydzielony ze zdeformowanego układu pomiarowego – rysunek 4. Za pomocą metody Aramis rejestrowano także przebieg zarysowania i zniszczenia modeli badawczych. Obciążenie przykładano w sposób jednostajny z prędkością 0,1 kN/s w jednym cyklu, aż do zniszczenia modeli.

Przy każdej zarejestrowanej sile F_i – przy i -tym poziomie obciążenia, obliczano wartość średnich naprężeń stycznych $\tau_{v,i}$ jako iloraz obciążenia F_i

Test elements 1 were placed in special steel sockets 2, so that one of the diagonals was set vertically and the arms of the steel fixing covered ca. 1/10 of the length – height, of the tested element. The sockets were equipped in cylindrical wrist joint which eliminated the influence of eccentricities, which were formed by accident while loading. The test models equipped in steel fixing were placed on a cart 7 under the steel frame 6 and loaded by means of applying constant increment of the hydraulic jack piston 3, until the moment the element was damaged. The test stands used for testing wall strength in the presence of oblique shearing, are presented in Figs. 2 and 3.

The automated measuring stand measured a loading force during the tests using two coupled electro-resistant dynamometers, each with a measurement range of 100 kN and both horizontal and vertical displacements with linear variable differential transducers [LVDT] of PJX-20 type, having a measurement range of 20 mm and the accuracy of 0.002 mm. These displacement sensors were fixed along two diagonals and displacements were measured along with the reference frame, having the length equal to 932 mm. The length of the reference frame was selected in accordance with guidelines of the standard ASTM E519-81 (13), to cover the highest length of the diagonal. The models of the first series RL-S-N, had the sensors fixed on both sides. The models of the second - RL-S-NF1, and third series - RL-S-NF2, had sensors on one side, and their second strengthened side was painted with the irregular high-contrast pattern, to conduct non-contact measurements with the optical system Aramis – Fig. 3. Points of fixing standard reference frames were marked on the pattern to compare results for both sides of the model. The Aramis system was also recording the cracking scheme and failure of test models. The load was applied uniformly at a rate of 0.1 kN/s in one cycle, until the failure of the model.

At each registered force F_i – at the n -th level of load, the value of average contact stresses $\tau_{v,i}$ was calculated as the quotient of load F_i and area of the wall cross-section, along with the diagonal A_h from:



Rys. 3. Model RL-S-F2-4 na stanowisku badawczym

Fig. 3. Model RL-S-F2-4 at the test stand

i pola powierzchni przekroju pionowego muru, wzdłuż przekątnej A_h z zależności:

$$\tau_{v,i} = \frac{F_i}{A_h} = \frac{F_i}{t\sqrt{l^2 + h^2}} \quad (1)$$

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.

Kąt odkształcenia postaciowego Θ_i wydzielony z odkształconego układu pomiarowego obliczono z zależności trygonometrycznych, tj. odkształconych baz pomiarowych odniesienia, na podstawie zmian długości boków i przekątnych - rys. 4. Kąt odkształcenia Θ_i oraz moduł odkształcenia postaciowego G_i wyznaczono z funkcji obciążenia F_i według:

$$\Theta_i = 2\arctg\left(\frac{|\Delta x| + |\Delta y|}{x + y + |\Delta x| - |\Delta y|}\right) \rightarrow G_i = \frac{\tau_{v,i}}{\Theta_i} \quad (2)$$

gdzie x, y – długość przekątnych modelu w kierunku prostym i równoległym do siły, Θ – kąt odkształcenia, $\Delta x, \Delta y$ – przyrost długości przekątnych modelu, G – moduł odkształcenia postaciowego

4. Wyniki

Zniszczenie wszystkich niewzmocnionych modeli serii pierwszej przebiegało gwałtownie. Przy wzrastającym obciążeniu na powierzchniach muru nie były widoczne zarysowania, natomiast słyszalne były trzaski. Dopiero w chwili poprzedzającej zniszczenie stwierdzono nieznaczne zarysowania w środkowym obszarze muru, w warstwach spoin wspornych. W chwili zniszczenia pojawiała się jedna rysa przebiegająca wzdłuż pionowej przekątnej, a następnie po osiągnięciu maksymalnej siły pojawiały się kolejne zarysowania, będące wynikiem utraty przyczepności w spoinach wspornych co powodowało rozdzielanie modelu na kilka części, lub nawet wydzielenie pojedynczych, nienaruszonych elementów murowych. Powstawały także zarysowania w miejscach, w których model spoczywał w stalowych gniazdach. Przykładowy widok zniszczonego modelu serii RL-S-N przedstawiono na rysunku 5. W tabelicy 1 zestawiono wartości sił rysujących F_{cr} i odpowiadające im wartości naprężeń rysujących τ_{cr} oraz wartości sił niszczących F_u i naprężeń niszczących τ_u , wszystkich modeli. W tabelicy 1 podano również wartości średnie sił $F_{cr,mv}$, $F_{u,mv}$ i naprężeń $\tau_{cr,mv}$, $\tau_{u,mv}$. W tabelicy 2 zestawiono wartości kątów odkształcenia postaciowego Q_{cr} i modułów odkształcenia postaciowego G_{cr} oraz wartości kątów deformacji postaciowej, przy największym naprężeniu Q_u dla wszystkich modeli. W tabelicy 2 podano również wartości średnie kątów $Q_{cr,mv}$, $Q_{u,mv}$ i modułów $G_{cr,mv}$.

Na wykresach – rysunek 6, przedstawiono uzyskane wyniki badań w postaci zmian wartości kąta odkształcenia postaciowego Θ w funkcji naprężeń stycznych τ oraz zmian modułu odkształcenia postaciowego G w funkcji naprężeń stycznych τ , wszystkich zbadanych modeli. Element badawczy RL-S-N-3 uległ uszkodzeniu w trakcie transportu, a jego wyniki badań nie były brane pod uwagę.

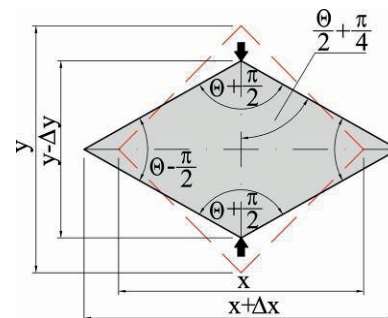
$$\tau_{v,i} = \frac{F_i}{A_h} = \frac{F_i}{t\sqrt{l^2 + h^2}} \quad (1)$$

in which F_i = vertical force at the n th level of load, $t = 180$ mm wall thickness, $l = 1180$ mm wall length, $h = 1212$ mm wall height.

Distortion angle Θ_i separated from the deformed measuring system was calculated from trigonometric relationships i.e. deformed reference frame, on the basis of changes in the length of sides and diagonals – Fig. 4. The strain angle Θ_i and shear modulus G_i was determined in the function of load F_i from

$$\Theta_i = 2\arctg\left(\frac{|\Delta x| + |\Delta y|}{x + y + |\Delta x| - |\Delta y|}\right) \rightarrow G_i = \frac{\tau_{v,i}}{\Theta_i} \quad (2)$$

where x, y – length of the model diagonals in the perpendicular and parallel direction to the force, Θ – strain angle, $\Delta x, \Delta y$ – an increment of the model diagonal lengths, G – shear modulus

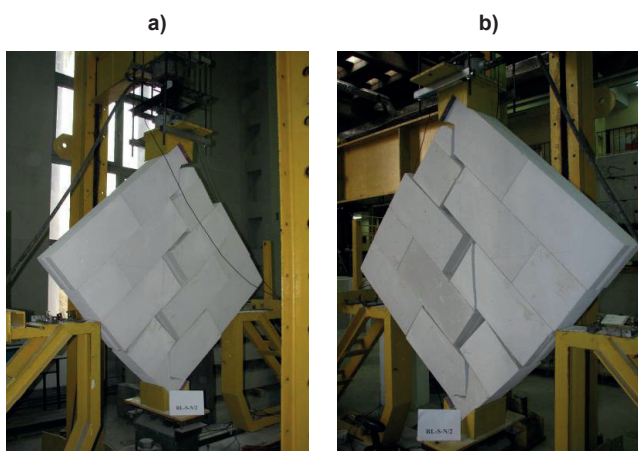


Rys. 4. Szkic ideowy metody wyznaczania kąta odkształcenia postaciowego

Fig. 4. Schematic diagram representing the method of determining distortion angle

4. Results

Failure of all models of the first series it is of unstrengthened models, was rapid. With the increasing load on the wall surfaces, no scratches were visible, but the crackling was audible. Only at the moment preceding the destruction slight scratches were seen in the central area of the wall, in the layers of support joints. One crack running along the vertical diagonal was seen at the time of failure. When the maximum force was reached, other cracks were developed, due to the loss of adherence in bed joints. As a consequence, the models were separated into a few parts; even single intact masonry units were detached. There were also scratches in places where the model rested in steel sockets. An example of the destroyed model of series RL-S-N, is shown in Fig. 5. In Table 1 the values of cracking forces F_{cr} corresponding values of cracking stresses τ_{cr} , failure forces F_u and failure stresses τ_u of all models are presented. There are also mean values of forces $F_{cr,mv}$, $F_{u,mv}$ and stresses $\tau_{cr,mv}$, $\tau_{u,mv}$. In Table 2 values of distortion angle Q_{cr} , distortion modulus G_{cr} and shape deformation angle at the greatest stress Q_u of all models are presented. There are also mean values of angles $Q_{cr,mv}$, $Q_{u,mv}$ and modulus $G_{cr,mv}$.



Rys. 5. Model RL-S-N-2: a) strona A, b) strona B

Fig. 5. Model RL-S-N-2: a) side A, b) side B

Tablica 1 / Table 1

WARTOŚCI SIŁ ORAZ NAPRĘŻEŃ RYSUJĄCYCH I NISZCZĄCYCH.

VALUES OF CRACKING AND FAILURE FORCES AND STRESSES

Lp. / No.	Model	F_{cr} , kN	$F_{cr,mv}$, kN	t_{cr} , MPa	$t_{cr,mv}$, MPa	F_u , kN	$F_{u,mv}$, kN	t_u , MPa	$t_{u,mv}$, MPa
1	RL-S-N-1	60.9	58.5	0.200	0.192	63.4	61.0	0.208	0.196
2	RL-S-N-2	64.3		0.211		64.6		0.212	
3	RL-S-N-3	--		--		--		--	
4	RL-S-N-4	58.2		0.191		59.0		0.194	
5	RL-S-N-5	58.2		0.191		59.1		0.194	
6	RL-S-N-6	51.2		0.168		59.1		0.171	

Tablica 2 / Table 2

WARTOŚCI KĄTÓW ODKSZTAŁCENIA POSTACIOWEGO I DEFORMACJI POSTACIOWEJ ORAZ MODUŁÓW ODKSZTAŁCENIA POSTACIOWEGO

VALUES OF DISTORTION ANGLE, SHAPE DEFORMATION ANGLE AND DISTORTION MODULUS

Lp. / No.	Model	Q_{cr} , mrad	$Q_{cr,mv}$, mrad	G_{cr} , MPa	$G_{cr,mv}$, MPa	Q_u , mrad	$Q_{u,mv}$, mrad
1	RL-S-N-1	0.602	0.587	332	329	0.636	0.601
2	RL-S-N-2	0.670		315		0.690	
3	RL-S-N-3	--		--		--	
4	RL-S-N-4	0.602		317		0.613	
5	RL-S-N-5	0.593		322		0.603	
6	RL-S-N-6	0.471		357		0.461	

W przypadku naprężeń rysujących uzyskano wartości $\tau_{cr} = 0,168 \div 0,211$ MPa, średnie naprężenie rysujące wynosiło $\tau_{cr,mv} = 0,192$ MPa. Wartości naprężeń niszczących wynosiły $\tau_u = 0,171 \div 0,212$ MPa, natomiast średnie naprężenie niszczące wynosiło $\tau_{u,mv} = 0,196$ MPa.

W przypadku kątów odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania uzyskano wartości z przedziału $Q_{cr} = 0,471 \div 0,670$ mrad, a średni kąt wynosił $Q_{cr,mv} = 0,587$ mrad. Określone w chwili zarysowania wartości modułów wynosiły $G_{cr} = 315 \div 357$ MPa, a średni moduł był równy $G_{cr,mv} = 329$ MPa. Największe rozrzuty wartości uzyskano w wypadku kątów deformacji postaciowej przy najwięk-

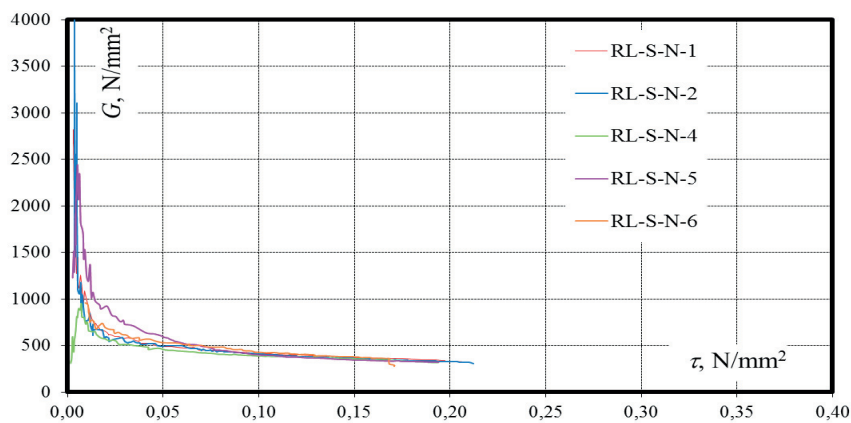
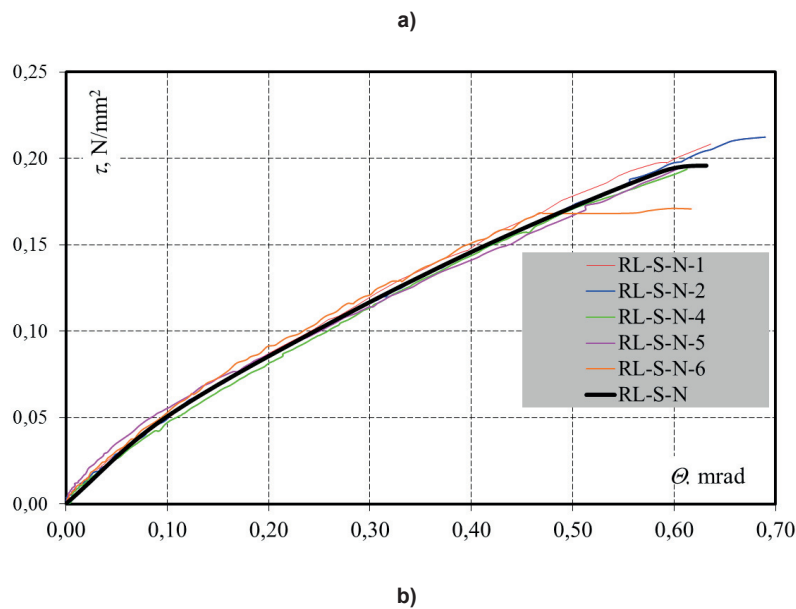
Diagrams in Fig. 6 are showing test results as changes in distortion angles Θ as a function of shear stress τ , and changes in distortion modulus G as a function of shear stress τ , of all tested models. The research element RL-S-N-3 was damaged during transport and its test results were not taken into account.

The following values were obtained for cracking stresses, $\tau_{cr} = 0.168 \div 0.211$ MPa, mean cracking stress $\tau_{cr,mv} = 0.192$ MPa. Failure stress τ_{cr} was within the range of $0.171 \div 0.212$ MPa, mean failure stress $\tau_{cr,mv}$ was equal to 0.196 MPa.

For distortion angles at the time of cracking, Q_{cr} was in the range of $0.471 \div 0.670$ mrad, and the mean angle $Q_{cr,mv}$ was equal to 0.587 mrad. Values of modulus G_{cr} at the time of cracking were in the range of $315 \div 357$ MPa and the mean modulus $G_{cr,mv}$ was equal to 329 MPa. The highest spread of values was observed for non-dilatational strain angles. Those values Q_u at the greatest force were in the range of $0.461 \div 0.690$ mrad and the mean angle

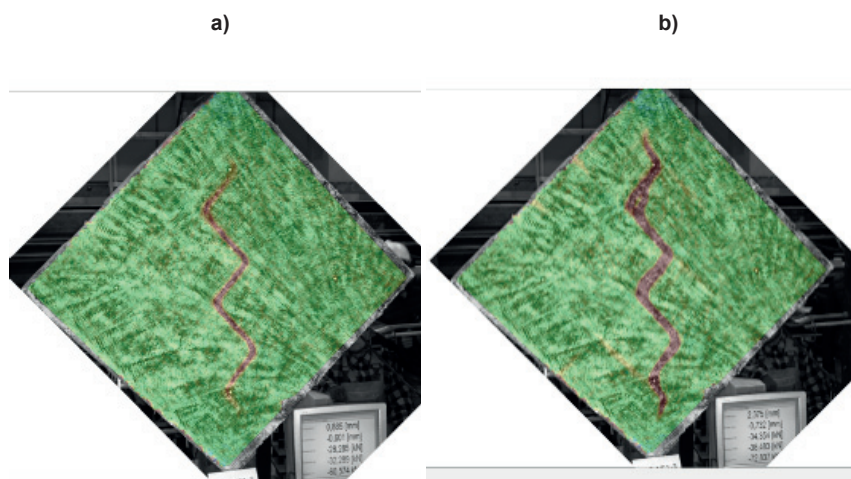
of the non-dilatational strain $Q_{u,mv}$ was equal to 0.601 mrad.

In the case of two other series of the strengthened models, the process of cracking and failure of all elements differed from the unstrengthened ones. The models with one-side strengthening had no visible cracks on their surface under an increasing loading. Minor cracks in the central part of the masonry, more specifically in layers of bed joints, were found at the time to failure Fig. 7. Cracks in bed and head joints were formed at the time of failure. Areas of models placed in steel pockets were also cracked. Fig. 8 presents an example of the destroyed test model RL-S-NF1-3, with a view of its strengthened and unstrengthened sides.



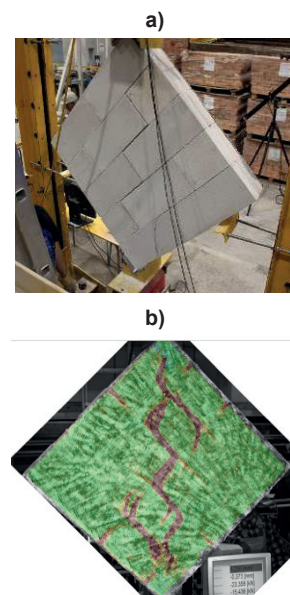
Rys. 6. Wyniki badań modeli serii RL-S-NF: a) zależność: kąt odkształcenia postaciowego ϑ – naprężenie styczne τ , b) zależność: moduł odkształcenia postaciowego G – naprężenie styczne τ .

Fig. 6. Test results for models of series RL-S-NF: a) distortion angle ϑ – shear stress τ relationship b) distortion modulus G – shear stress τ relationship



Rys. 7. Model RL-S-NF1-3 przy poziomie obciążenia: a) F_{cr} , b) F_u

Fig. 7. Model RL-S-NF1-3 at the load level: a) F_{cr} , b) F_u



Rys. 8. Zniszczony model RL-S-NF1-3: a) strona A, b) strona B

Fig. 8. Destroyed model RL-S-NF1-3: a) side A, b) side B

Test results for the models of series RL-S-NF1 are presented in Tables 3 and 4 and diagrams in Fig. 9.

The following values were obtained for cracking stresses: $\tau_{cr} = 0.164 \div 0.244$ MPa, mean cracking stress $\tau_{cr,mv}$ was equal to 0.205 MPa. Failure stresses τ_u were in the range of $0.195 \div 0.276$ MPa, and the mean failure stress $\tau_{u,mv}$ was 0.233 MPa.

At the time of cracking, values of distortion angles Q_{cr} were in the range of 0.457-2.038 mrad and the mean angle $Q_{cr,mv}$ was equal to 0.723 mrad. Values of modulus G_{cr} at the time of cracking were in the range of 267÷359 MPa and the mean modulus $G_{cr,mv}$ was equal to 305 MPa. In the case of non-dilatational strain angles Q_u at the highest force, these values were in the range of 0.728-2.513 mrad and the mean angle of non-dilatational strain $Q_{u,mv}$ was equal to 1,869 mrad.

Considering the models with two-side strengthening (series RL-S-NF2), the process of cracking and failure of all the elements was similar. There were no visible cracks on their surface, under an increasing loading. Minor cracks in the central part of the masonry representing the arrangement of bed and head joints were found at the time prior to failure (Fig. 10a). At the time of failure, cracks running along the bed and head joints and across masonry units were observed on surfaces of strengthening (Fig. 10b). Fig. 11

Tablica 3 / Table 3

WARTOŚCI SIŁ ORAZ NAPRĘŻEŃ RYSUJĄCYCH I NISZCZĄCYCH
VALUES OF CRACKING AND FAILURE FORCES AND STRESSES

Lp. / No.	Model	F_{cr} , kN	$F_{cr,mv}$, kN	τ_{cr} , MPa	$\tau_{cr,mv}$, MPa	F_u , kN	$F_{u,mv}$, kN	τ_u , MPa	$\tau_{u,mv}$, MPa
1	RL-S-NF1-1	74.3	62.4	0.244	0.205	84.2	71.0	0.276	0.233
2	RL-S-NF1-2	56.0		0.184		64.2		0.211	
3	RL-S-NF1-3	60.6		0.199		72.8		0.239	
4	RL-S-NF1-4	66.5		0.218		68.5		0.225	
5	RL-S-NF1-5	67.1		0.221		76.9		0.253	
6	RL-S-NF1-6	49.9		0.164		59.4		0.195	

Tablica 4 / Table 4

WARTOŚCI KĄTÓW ODKSZTAŁCENIA POSTACIOWEGO I DEFORMACJI POSTACIOWEJ ORAZ MODUŁÓW ODKSZTAŁCENIA POSTACIOWEGO
VALUES OF DISTORTION ANGLE, SHAPE DEFORMATION ANGLE AND DISTORTION MODULUS

Lp. / No.	Model	Q_{cr} , mrad	$Q_{cr,mv}$, mrad	G_{cr} , MPa	$G_{cr,mv}$, MPa	Q_u , mrad	$Q_{u,mv}$, mrad
1	RL-S-N1-1	0.704	0.723	347	305	2.838	1.869
2	RL-S-N1-2	0.592		311		1.892	
3	RL-S-N1-3	1.038		267		2.513	
4	RL-S-N1-4	0.746		272		0.803	
5	RL-S-N1-5	0.804		274		2.443	
6	RL-S-N1-6	0.457		359		0.728	

szej sile, wartości te wynosiły $Q_u = 0,461 \div 0,690$ mrad, a średni kąt deformacji postaciowej wynosił $Q_{u,mv} = 0,601$ mrad.

W przypadku dwóch kolejnych serii modeli wzmocnionych proces zarysowania i zniszczenia wszystkich elementów przebiegał inaczej, niż w przypadku elementów bez wzmocnienia. W modelach wzmocnionych z jednej strony, przy wzrastającym obciążeniu na powierzchniach muru nie były widoczne zarysowania, dopiero w chwili poprzedzającej zniszczenie występowały nieznaczne zarysowania w środkowym obszarze muru, w warstwach spoin wspornych – rysunek 7. W chwili zniszczenia wystąpiły zarysowania w spoinach wspornych oraz czołowych, a także zarysowania w miejscach, w których model spoczywał w stalowych gniazdach. Na rysunku 8 pokazano przykładowy zniszczony model badawczy RL-S-NF1-3, od strony niewzmocnionej oraz wzmocnionej.

Wyniki badań modeli serii RL-S-NF1 zestawiono w tablicach 3 i 4 oraz na wykresach pokazanych na rysunku 9.

W przypadku naprężeń rysujących uzyskano wartości $\tau_{cr} = 0,164 \div 0,244$ MPa, średnie naprężenie rysujące było równe $\tau_{cr,mv} = 0,205$ MPa. Wartości naprężeń niszczących wynosiły $\tau_u = 0,195 \div 0,276$ MPa, natomiast średnie, naprężenie niszczące wynosiło $\tau_{u,mv} = 0,233$ MPa.

W chwili zarysowania uzyskano wartości kątów odkształcenia postaciowego w przedziale $Q_{cr} = 0,457 \div 2,038$ mrad, a średni kąt wynosił $Q_{cr,mv} = 0,723$ mrad. Określone w chwili zarysowania wartości modułów były równe $G_{cr} = 267 \div 359$ MPa, a średni moduł wynosił $G_{cr,mv} = 305$ MPa. W przypadku kątów deformacji postaciowej

presents an example of the destroyed test model RL-S-NF2-2 with a view of its strengthened and unstrengthened sides and Fig. 12 shows a crack in details.

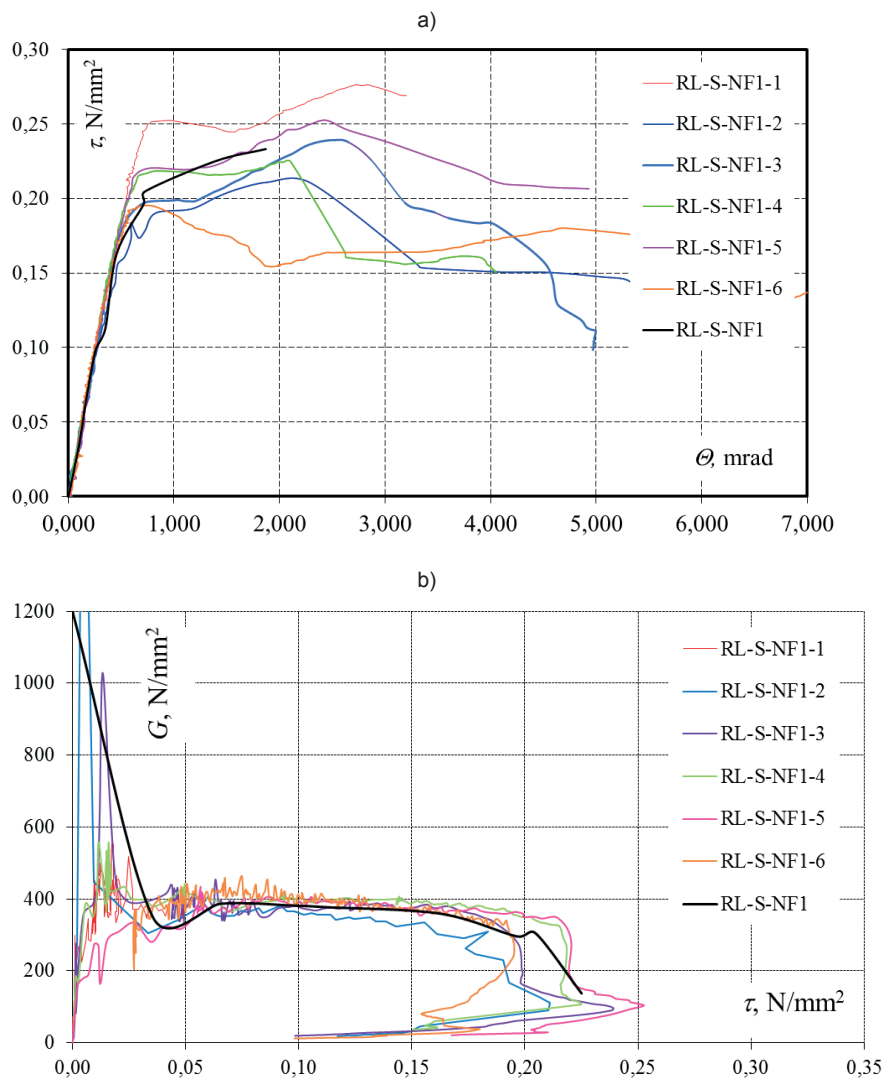
Test results for the models of series RL-S-NF2 are compared in Table 5, 6 and diagrams in Fig. 13.

The following values were obtained for cracking stresses: $\tau_{cr} = 0.312 \div 0.387$ MPa, mean cracking stress $\tau_{cr,mv}$ was equal to 0.334 MPa. Failure stresses τ_u were in the range of $0.336 \div 0.421$ MPa, and the mean failure stress $\tau_{u,mv}$ was equal 0.382 MPa.

For distortion angles at the time of cracking Q_{cr} was in the range of $0,675 \div 0,962$ mrad and the mean angle $Q_{cr,mv}$ was equal to 0.762 mrad. Values of modulus G_{cr} at the time of cracking were in the range of $356 \div 474$ MPa, and the mean modulus $G_{cr,mv}$ was equal to 428 MPa. Those values Q_u at the greatest force were in the range of $1,133 \div 3,179$ mrad, and the mean angle of non-dilatational strain $Q_{u,mv}$ was equal to 1.891 mrad.

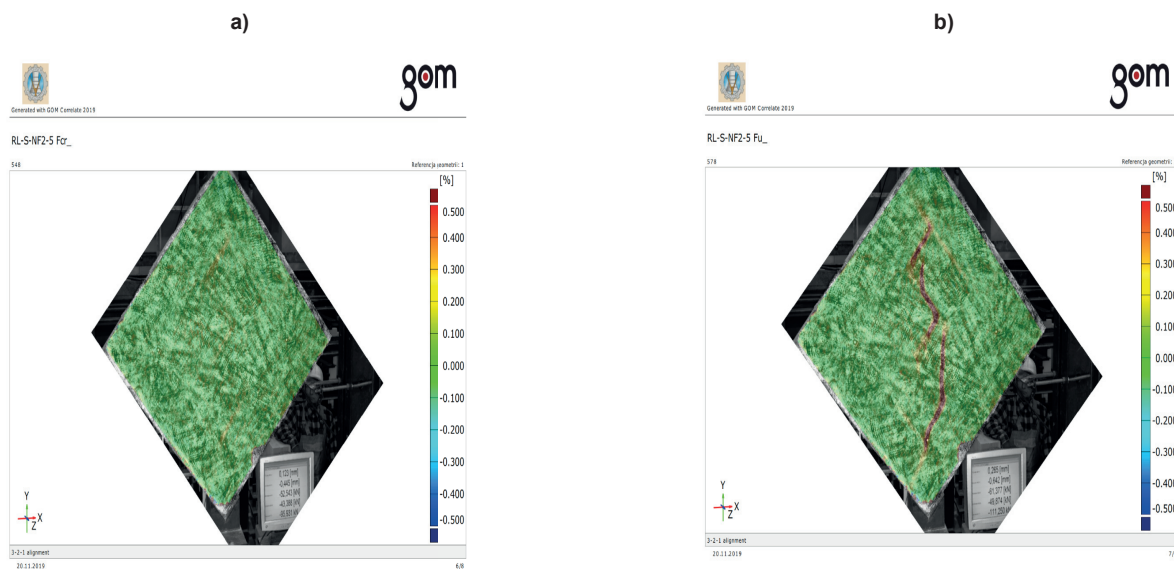
5. Analysis of results

The process of cracking and failure of unstrengthened elements was very rapid, that is, during the load, there were no scratches visible on the wall surfaces, only single and not very intense cracks were heard. The destruction of the elements consisted in the loss of adhesion between masonry elements and mortar in bed joints and the occasional cracking of masonry elements, in the central area of the wall. Mean cracking stress $\tau_{cr,mv}$ constituted 98% of failure stress $\tau_{u,mv}$.



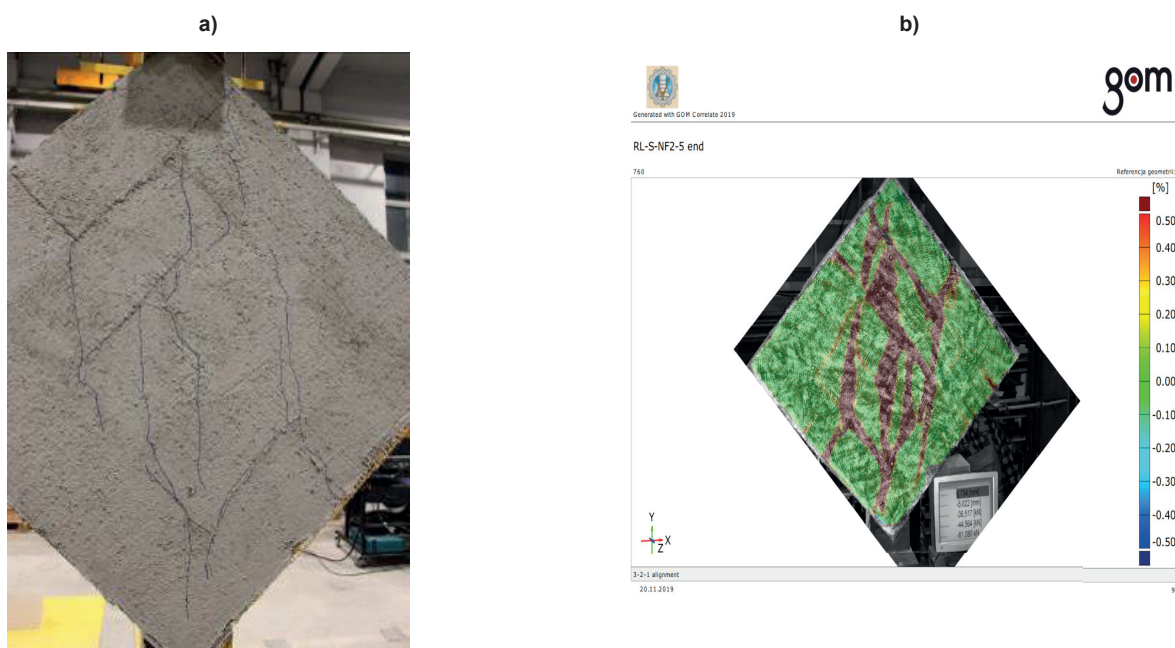
Rys. 9. Wyniki badań modeli serii RL-S-NF1: a) zależność kąta odkształcenia postaciowego Θ od naprężenia stycznego τ , b) zależność modułu odkształcenia postaciowego G od naprężenia stycznego τ

Fig. 9. Test results for models of series RL-S-NF1: a) distortion angle Θ – shear stress τ relationship b) distortion modulus G – shear stress τ relationship



Rys. 10. Zarysowany model RL-S-NF2-2 przy poziomie obciążenia: a) F_{cr} , b) F_u

Fig. 10. Cracks in model RL-S-NF2-2 at load level: a) F_{cr} , b) F_u



Rys. 11. Zniszczony model RL-S-NF2-5: a) strona A, b) strona B

Fig. 11. Destroyed model RL-S-NF2-5: a) side A, b) side B

przy największej sile, wartości te wynosiły $Q_u = 0,728 \pm 2,513$ mrad, a średni kąt deformacji postaciowej wynosił $Q_{u,mv} = 1,869$ mrad.

W przypadku modeli wzmocnionych z dwóch stron – seria RL-S-NF2, proces zarysowania i zniszczenia wszystkich elementów także przebiegał w zbliżony sposób. Przy wzrastającym obciążeniu na powierzchniach wzmocnień muru nie były widoczne zarysowania, dopiero w chwili poprzedzającej zniszczenie stwierdzono nieznaczne zarysowania w środkowym obszarze muru, odzwierciedlające układ spoin wspornych oraz czołowych [rysunek 10a]. W chwili zniszczenia na powierzchniach wzmocnień wystąpiły zarysowania przebiegające wzdłuż spoin wspornych i czołowych oraz przez elementy murowe – rysunek 10b. Na rysunku 11 pokazano przykład zniszczonego modelu badawczego RL-S-NF2-2 od strony niewzmocnionej oraz wzmocnionej, a na rysunku 12 szczegół zarysowania.

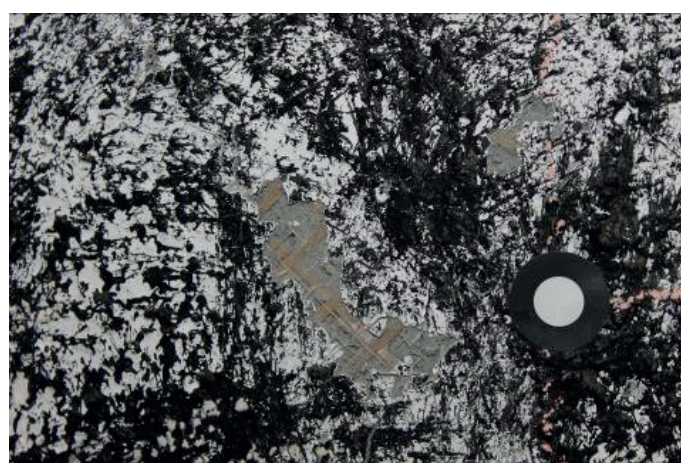
Wyniki badań modeli serii RL-S-NF2 zestawiono w tablicach 5 i 6 oraz na wykresach na rysunku 13.

Tablica 5 / Table 5

WARTOŚCI SIŁ I NAPRĘŻEŃ RYSUJĄCYCH I NISZCZĄCYCH

VALUES OF CRACKING AND FAILURE FORCES AND STRESSES

Lp. / No.	Model	F_{cr} , kN	$F_{cr,mv}$, kN	τ_{cr} , MPa	$\tau_{cr,mv}$, MPa	F_u , kN	$F_{u,mv}$, kN)	τ_u , MPa	$\tau_{u,mv}$, MPa
1	RL-S-NF2-1	98.3	101.6	0.323	0.334	102.4	113.6	0.336	0.382
2	RL-S-NF2-2	98.1		0.322		116.6		0.383	
3	RL-S-NF2-3	104.1		0.342		113.5		0.373	
4	RL-S-NF2-4	117.8		0.387		126.4		0.415	
5	RL-S-NF2-5	95.9		0.315		111.3		0.365	
6	RL-S-NF2-6	95.0		0.312		128.3		0.421	



Rys. 12. Pęknięcie w modelu RL-S-NF2-5

Fig. 12. Crack of model RL-S-NF2-5

First cracks in the elements with one- and both-side strengthening were vertical – along the vertical diagonal. At the moment of maximum loading, cracks were running across bed and head joints. In contrast to unstrengthened models, cracks were also seen in the central part of the model, running across masonry units. Further

Tablica 6 / Table 6

WARTOŚCI KĄTÓW ODKSZTAŁCENIA POSTACIOWEGO I DEFORMACJI POSTACIOWEJ ORAZ MODUŁÓW ODKSZTAŁCENIA POSTACIOWEGO
VALUES OF DISTORTION ANGLE, SHAPE DEFORMATION ANGLE AND DISTORTION MODULUS

Lp. / No.	Model	Q_{cr} , mrad	$Q_{cr,mv}$, mrad	G_{cr} , MPa	$G_{cr,mv}$, MPa	Q_u , mrad	$Q_{u,mv}$, mrad
1	RL-S-NF2-1	0.676	0.762	424	428	1.133	1.891
2	RL-S-NF2-2	0.680					
3	RL-S-NF2-3	0.962					
4	RL-S-NF2-4	0.903					
5	RL-S-NF2-5	0.675					
6	RL-S-NF2-6	0.677					

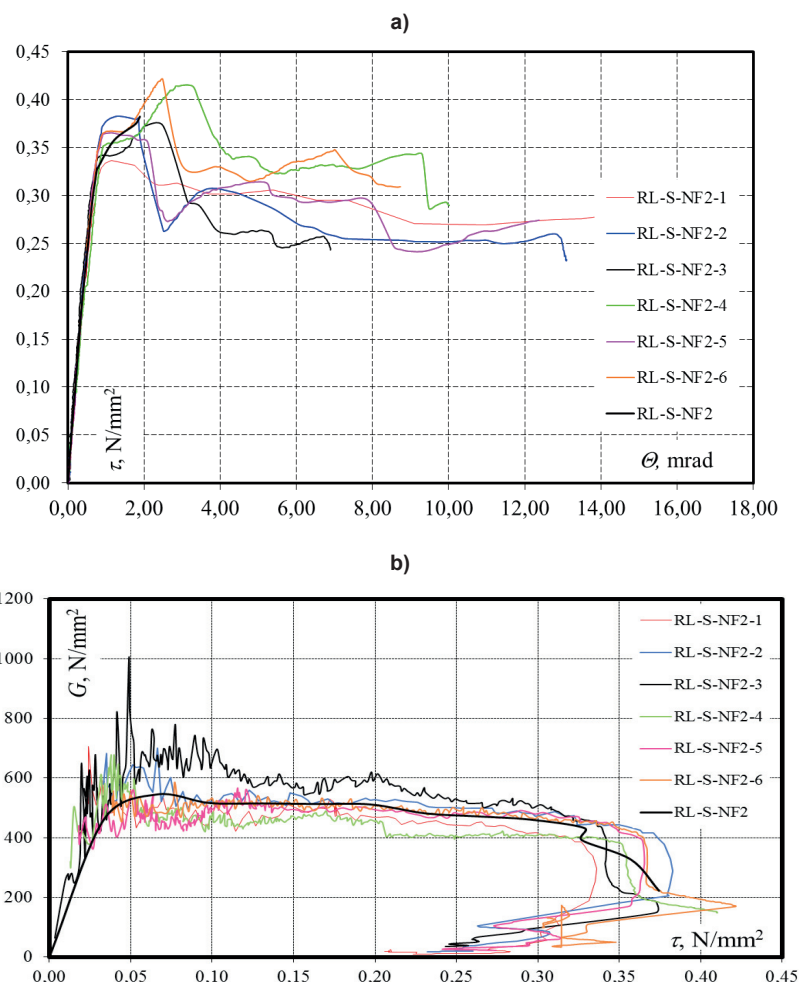
W wypadku naprężeń rysujących uzyskano wartości $\tau_{cr} = 0,312 \div 0,348$ MPa, średnie naprężenie rysujące było równe $\tau_{cr,mv} = 0,327$ MPa. Wartości naprężeń niszczących wynosiły $\tau_u = 0,336 \div 0,421$ MPa, natomiast średnie naprężenie niszczące wynosiło $\tau_{u,mv} = 0,382$ MPa.

W chwili zarysowania uzyskano wartości kątów odkształcenia postaciowego w przedziale $Q_{cr} = 0,675 \div 0,962$ mrad, a średni kąt wynosił $Q_{cr,mv} = 0,762$ mrad. Określone w chwili zarysowania wartości modułów były równe $G_{cr} = 356 \div 474$ MPa, a średni moduł $G_{cr,mv} = 428$ MPa. W przypadku kątów deformacji postaciowej przy największej sile, wartości te wynosiły $Q_u = 1,133 \div 3,179$ mrad, a średni kąt deformacji postaciowej $Q_{u,mv} = 1,891$ mrad.

5. Analiza wyników

Proces zarysowania i zniszczenia elementów bez wzmocnienia przebiegał w sposób bardzo gwałtowny, to znaczy, że podczas obciążenia nie pojawiały się rysy widoczne na powierzchniach muru, słyszalne były jedynie pojedyncze i niezbyt intensywne trzaski. Zniszczenie elementów polegało na utracie przyczepności między elementami murowymi a zaprawą w spoinach wspornych i sporadycznym zarysowaniu elementów murowych, w środkowym obszarze muru. Średnie styczne naprężenie rysujące $\tau_{cr,mv}$ stanowiło 98% średniego naprężenia niszczącego $\tau_{u,mv}$.

W elementach wzmocnionych jedno i dwustronnie pierwsze zarysowania przebiegały pionowo, wzdłuż pionowej przekątnej. W chwili wystąpienia maksymalnego poziomego obciążenia występowały zarysowania przechodzące przez spoiny wsporne i czołowe, a także zarysowania w środkowym obszarze modelu, przechodzące przez elementy murowe, czego nie stwierdzono w badaniach modeli, bez wzmocnienia. Przy dalszym przykładaniu obciążenia modele ulegały dalszemu zarysowaniu, w niewielkim stopniu. W modelach wzmocnionych z jednej strony naprężenie rysujące $\tau_{cr,mv}$ stanowiło 89% naprężenia niszczącego $\tau_{u,mv}$, a w przypadku



Rys. 13. Wyniki badań modeli serii RL-S-NF2: a) zależność kąta odkształcenia postaciowego Θ od naprężenia stycznego τ , b) zależność modułu odkształcenia postaciowego G od naprężenia stycznego τ

Fig. 13. Test results for models of series RL-S-NF2: a) distortion angle Θ – shear stress τ relationship, b) distortion modulus G – shear stress τ relationship

loading of the models resulted in the gentle development of cracks. Cracking stress $\tau_{cr,mv}$ constituted 89% of failure stress $\tau_{u,mv}$ in the models with one-side strengthening and 87% in the models with two-side strengthening. The use of reinforcement on one side of the models increased the cracking stress $\tau_{cr,mv}$ of about 7% and the failure stress $\tau_{u,mv}$ about 16%, compared to the results of testing

modeli wzmocnionych z dwóch stron 87%. Zastosowanie wzmocnienia z jednej strony modelu spowodowało wzrost naprężenia rysującego $\tau_{cr,mv}$ o 7%, a naprężenia niszczącego $\tau_{u,mv}$ o 16%, w stosunku do wyników badań elementów nie wzmocnionych. Znacznie lepsze wyniki uzyskano w przypadku modeli wzmocnionych obustronnie. Poziom naprężenia rysujących $\tau_{cr,mv}$ i niszczących $\tau_{u,mv}$ był w tym przypadku większy odpowiednio o 74% i 86%, w stosunku do modeli bez wzmocnienia.

Uzyskane wartości kątów odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania $Q_{cr,mv}$ w modelach serii RL-S-NF1 były większe o 23%, a w modelach serii RL-S-NF2 o 30%, w stosunku do modeli serii RL-S-N. Jeszcze większy wzrost uzyskano w przypadku wartości kątów odkształcenia postaciowego w chwili zniszczenia $Q_{u,mv}$, który wynosił odpowiednio 311% w modelach serii RL-S-NF1 i 315% w serii RL-S-NF2. Moduł odkształcenia postaciowego $G_{u,mv}$ w modelach wzmocnionych z jednej strony był mniejszy o 7%, a w modelach wzmocnionych obustronnie był większy o 30%, w porównaniu z modelami bez wzmocnienia.

Na rys. 14 przedstawiono porównanie zależności kąta odkształcenia postaciowego Θ od naprężenia stycznego τ , uśrednionego w ramach każdej serii.

W tabelicy 7 zestawiono wartości naprężenia rysującego $\tau_{cr,mv}$ oraz niszczącego $\tau_{u,mv}$, kątów odkształcenia postaciowego Q_{cr} , kątów deformacji postaciowej, przy największym naprężeniu Q_u w przypadku wszystkich modeli oraz modułów odkształcenia postaciowego G_{cr} , uśrednione w ramach każdej serii.

Dysponując wynikami badań 3 różnych serii elementów obliczono charakterystyczną wytrzymałość muru na ścinanie według metody podanej w Załączniku D Eurokodu PN-EN 1990:2004 (14), z ogólnej zależności:

$$X_k = f_{vk} = m_x(1 - k_n V_x) \quad (2)$$

gdzie V_x – charakterystyczna wartość badanego parametru, $V_x = \tau_{u,mv}$ – średnia, początkowa wytrzymałość na ścinanie [w tabelicy 8], k_n – współczynnik dla 5% wartości charakterystycznej i rozkładu normalnego według tabelicy D1 PN-EN 1990, wynoszący $k_n = 2,18$, w przypadku serii sześciokładnikowych, V_x – współczynnik zmienności początkowej wytrzymałości na ścinanie obliczany z zależności $V_x = s_x/\tau_{u,mv}$, w której s_x jest odchyleniem standardowym.

Zestawienie wyników podano w tabelicy 8.

Tabela 7 / Table 7

Uśrednione w ramach serii wyniki badań: wartości kątów odkształcenia postaciowego i deformacji postaciowej oraz modułów odkształcenia postaciowego

Mean values of test results of all series: distortion angle, shape deformation angle and distortion modulus

Lp. / No	Seria / Series	$\tau_{cr,mv}$, MPa	$\tau_{u,mv}$, MPa	$Q_{cr,mv}$, mrad	$Q_{u,mv}$, mrad	$G_{u,mv}$, MPa
1	RL-S-N	0,192	0,196	0,587	0,601	329
2	RL-S-NF1	0,205	0,233	0,723	1,869	305
3	RL-S-NF2	0,327	0,382	0,762	1,891	428

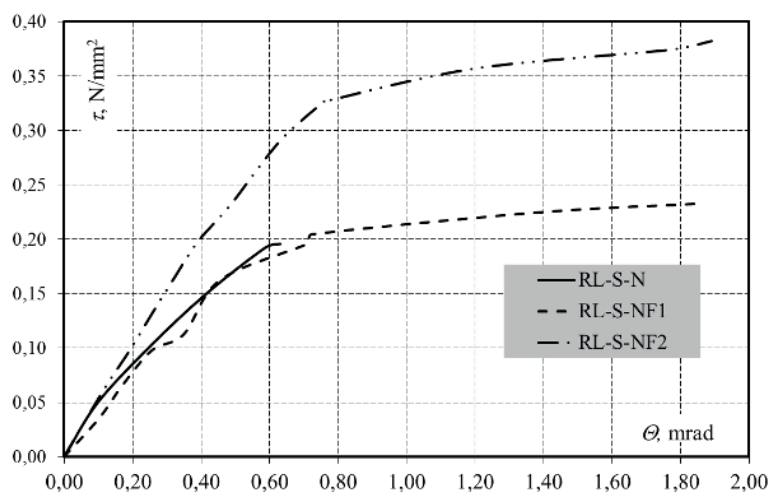


Fig. 14. Distortion angle Θ – shear stress τ relationship, averaged in experimental series

Rys. 14. Zależność – kąt odkształcenia postaciowego Θ od naprężenia stycznego τ , uśrednionego w poszczególnych seriach badawczych

of unreinforced elements. Much better results were obtained for models reinforced on both sides. The level of cracking stress $\tau_{cr,mv}$ and failure stress $\tau_{u,mv}$ were higher by about 74% and 86% respectively, compared to models without reinforcement.

The obtained values of angular deformation angles $Q_{cr,mv}$ at the time of cracking in the models of the RL-S-NF1 series were higher of about 23% and in the models of the RL-S-NF2 series of about 30%, compared to the models of the RL-S-N series.

The even greater positive influence of reinforcement was obtained for the values of the distortion angles $Q_{u,mv}$ at the time of destruction and increased to 311% of the RL-S-NF1 series models and 315% respectively, in the RL-S-NF2 series models.

Distortion modulus $G_{u,mv}$ in the models reinforced on one side was lower of about 7% and in the models reinforced on both sides was 30% higher, compared to models without reinforcement.

Diagrams in Fig. 14 average test results of all test series as changes in distortion angles Θ and as a function of shear stress τ are showing.

Table 7 presents mean values of the all test series of cracking stress $\tau_{cr,mv}$, failure stress $\tau_{u,mv}$, distortion angle $Q_{cr,mv}$, shape deformation angle at the greatest stress $Q_{u,mv}$, distortion modulus $G_{cr,mv}$.

At the disposal of the test results of 3 different series of elements, the characteristic shear strength of the wall was calculated, according to the procedure given in Annex D of the Eurocode PN-EN 1990: 2004 (14) from the general relation:

$$X_k = f_{vk} = m_x(1 - k_n V_x) \quad (2)$$

where V_x – characteristic value of the tested parameter, $V_x = \tau_{u,mv}$ – medium

Tablica 8 / Table 8

ZBIORCZE ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

SUMMARY OF THE RESULTS OF SHEAR STRENGTH TESTS

Lp. / No.	Series	Number in the series n ; (k_n)	$\tau_{u,mv}$, MPa	s_x , MPa	V_x , %	f_{vk} , MPa
1	RL-S-N	6; (2.18)	0.196	0.016	0.083	0.161
2	RL-S-NF1	6; (2.18)	0.233	0.029	0.125	0.169
3	RL-S-NF2	6; (2.18)	0.382	0.032	0.084	0.313

Uzyskana charakterystyczna wytrzymałość na ścinanie f_{vk} murów wzmocnionych była większa o 5% i 49% w przypadku odpowiednio murów wzmocnionych z jednej i z dwóch stron, w stosunku do murów bez wzmocnienia.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków ilościowych:

- w modelach niewzmocnionych - seria RL-S-N, wartości naprężeń stycznych w chwili zarysowania wynosiły $\tau_{cr,mv} = 0,192$ MPa, a wartości naprężeń stycznych w chwili zniszczenia wynosiły $\tau_{u,mv} = 0,196$ MPa.
- w modelach wzmocnionych jednostronnie - seria RL-S-NF1, wartości naprężeń stycznych w chwili zarysowania wynosiły $\tau_{cr,mv} = 0,205$ MPa, a wartości naprężeń stycznych w chwili zniszczenia wynosiły $\tau_{u,mv} = 0,233$ MPa.
- w modelach wzmocnionych obustronnie - seria RL-S-NF2, wartości naprężeń stycznych w chwili zarysowania wynosiły $\tau_{cr,mv} = 0,334$ MPa, a wartości naprężeń stycznych w chwili zniszczenia wynosiły $\tau_{u,mv} = 0,382$ MPa.
- Zastosowane wzmocnienie powierzchniowe, zarówno z jednej jak i z dwóch stron, modeli pozwoliło na wzmocnienie modeli po zarysowaniu i bezpieczniejsze ich zachowanie po zniszczeniu, w stosunku do modeli bez wzmocnienia, w których stan zarysowania był jednoznaczny ze stanem całkowitego zniszczenia modeli. Poziom naprężeń rysujących $\tau_{cr,mv}$ w modelach wzmocnionych z jednej strony i z dwóch stron był odpowiednio o 7% i 74% wyższy, w porównaniu z modelami referencyjnymi.

Znacznie lepsze wyniki uzyskano w przypadku stanu granicznego nośności, w którym poziom naprężeń niszczących $\tau_{u,mv}$ w modelach ze wzmocnieniem z jednej oraz dwóch stron był odpowiednio o 16% i aż o 86% wyższy, w porównaniu z modelami bez wzmocnienia.

Moduł odkształcenia postaciowego $G_{u,mv}$ w modelach wzmocnionych z jednej strony był mniejszy o 7% a w modelach wzmocnionych obustronnie był większy o 30% w porównaniu z modelami bez wzmocnienia.

Uzyskana charakterystyczna wytrzymałość na ścinanie f_{vk} murów wzmocnionych była większa o 5% i 49% w przypadku odpowiednio: murów wzmocnionych z jednej i z dwóch stron, w stosunku do murów bez wzmocnienia.

initial shear strength [in table 8], k_n – coefficient for 5% of the characteristic value and normal distribution according to the table D1 PN-EN 1990, equal to $k_n = 2,18$, in the case of a series of 6 elements, V_x – coefficient of variation of the initial shear strength calculated from the relationship $V_x = s_x/\tau_{u,mv}$ where s_x is the standard deviation.

The results are summarized in Table 8.

The obtained characteristic of the shear strength f_{vk} of the reinforced walls was higher by 5% and 49% in the case of reinforced walls on one and two sides respectively, compared to the walls without reinforcement.

6. Conclusions

The performed tests lead to the following conclusions:

- for the unstrengthened models – series RL-S-N, shear stress $\tau_{cr,mv}$ at the time of cracking was equal to 0.192 MPa and shear stress $\tau_{u,mv}$ at the time of failure was 0.196 MPa,
- for the one-side strengthened models – series RL-S-NF1, shear stress $\tau_{cr,mv}$ at the time of cracking was equal to 0.205 MPa and shear stress $\tau_{u,mv}$ at the time of failure was 0.233 MPa,
- for the two-side strengthened models – series RL-S-NF2, shear stress $\tau_{cr,mv}$ at the time of cracking was equal to 0.334 MPa and shear stress $\tau_{u,mv}$ at the time of failure was 0.382 MPa,
- The applied on one or both sides of the models superficial strengthening provided the additional strengthening of cracked models and their safer behaviour after failure, compared to models without reinforcement, in which the cracking state was equal with the ultimate state of complete destruction of the models.

The level of shear stress $\tau_{cr,mv}$ at the time of cracking in models reinforced on the one side and on two sides was 7% and 74% higher respectively, compared to reference models.

Much better results were obtained in the case of the ultimate limit state, in which shear stress $\tau_{u,mv}$ at the time of failure in models with reinforcement on one and two sides were of about 16% and up to 86% higher respectively, compared to the models without reinforcement.

Distortion modulus $G_{u,mv}$ in models reinforced on one side was lower about 7% and in models reinforced on both sides was 30% higher, compared to the models without reinforcement.

Zastosowane wzmocnienie powierzchniowe ograniczyło odkształcenia murów w początkowej fazie pracy do stanu zarysowania oraz pozwoliło na znaczne zwiększenie poziomu odkształceń w fazie po zarysowaniu oraz po osiągnięciu maksymalnego obciążenia.

The obtained characteristic shear strength f_{vk} of the reinforced walls was higher by 5% and 49%, in the case of reinforced walls on one and two sides respectively, compared to the walls without reinforcement

Literatura / References

1. R. Jasiński, Ł. Drobiec, Comparison Research of Bed Joints Construction and Bed Joints Reinforcement on Shear Parameters of AAC Masonry Walls, *J. Civ. Eng. Archit.* **10**(12), 1329–1343 (2016). <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2016.12.004>.
2. R. Jasiński, Ł. Drobiec, Study of Autoclaved Aerated Concrete Masonry Walls with Horizontal Reinforcement under Compression and Shear, *Proc. Eng.* **161**, 918–924 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.758>.
3. R. Jasiński, A. Piekarczyk, L. Misiewicz, Comparison research of kind of mortar influence and bed joints reinforcement on shear parameters of AAC masonry walls” *Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges*. Taylor & Francis Group, London 2016, 1659-1666.
4. M. Priestley, F. Seible, Design of seismic retrofit measures for concrete and masonry structures. *Constr. Build. Mater.* **9**(6) 365–377 (1995). [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00049-6](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00049-6).
5. G. Schwegler, Strengthening of masonry with fiber composites, PhD thesis, Federal Institute of Technology, Zurich 1994.
6. M. Valluzzi, D. Tinazzi, C. Modena, Shear behaviour of masonry panels strengthened by FRP laminates, *Constr. Build. Mater.* **16**(7) 409-416 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00043-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00043-0).
7. M. Tomazevic, Seismic strengthening of brick masonry houses by CFRP strips: a shaking table study, *Proc. of the 43rd CIB W23 Commission Meeting*, CIB Publication, Lisbon 2006.
8. Z. Al-Jaberi., J. Myers, M. Elgawdym, , Influence of Near-Surface Mounted (NSM) FRP on the Out-of-Plane Behavior of Reinforced Masonry Wall”, 12th North American Masonry Conference, Denver, Colorado, May 17-20 (2015).
9. J. Kubica, M. Kałuża, Diagonally compressed AAC Block’s masonry – effectiveness of strengthening using CRFP and GRFP laminates, *Proceedings 8th International Masonry Conference*, Masonry (11), Ed. by W. Jäger, B. Haseltine & A. Fried, Dresden, 419-428 (2010).
10. M. Kałuża, J. Kubica, Behaviour of unreinforced and reinforced masonry wallets made of ACC blocks subjected to diagonal compression, *Technical Transactions - Civil Engineering 1-B/2013*, 79-94 (2013).
11. M. Kałuża, I. Galman, J. Kubica, Ch. Agneloni. Diagonal Tensile Strength of AAC Blocks Masonry with Thin Joints Superficially Strengthened by Reinforced Using GFRP Net Plastering. *Mechanics of masonry structures strengthened with composite materials*, *Key Eng. Mater.* **624**, 1013-9826 (2015)., ISBN 978-3-03835-203-7.
12. PN-EN 1052-1:2000 Metody badań murów. Określenie wytrzymałości na ściskanie
13. ASTM E519-81 Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) of Masonry Assemblages
14. PN-EN 1990:2004 Podstawy projektowania konstrukcji

The applied superficial reinforcement reduced the deformation of the walls at the initial stage of work to the cracked state and allowed for a significant increase in the level of deformation in the post-cracked phase and after reaching the maximum load.