

Adam PIEKARCZYK*
Politechnika Śląska

BADANIA PORÓWNAWCZE NIEZBROJONYCH I ZBROJONYCH ŚCIAN MUROWYCH PODDANYCH PIONOWEMU ŚCINANIU

Streszczenie. W artykule prezentowane są wyniki porównawczych badań zbrojonych i niezbrojonych murów ceglanych poddanych ścinaniu w kierunku prostopadłym do spoin wspornych. Celem badań była próba określenia wpływu zastosowania gładkiego zbrojenia umieszczanego w spoinach wspornych na poziom stycznych naprężeń w chwili zarysowania, naprężeń stycznych maksymalnych w momencie zniszczenia muru oraz odkształcalność postaciową ścinanych pionowo ścian murowych. Rezultaty badań wykazały, że tego typu zbrojenie przy przyjętym stopniu nasycenia nie wpływa bądź ma niewielki wpływ na wyżej wymienione parametry mechaniczne murów ceglanych.

COMPARATIVE RESEARCH OF UNREINFORCED AND REINFORCED MASONRY WALLS SUBJECTED TO VERTICAL SHEAR

Summary. This paper presents results of comparative research of reinforced and unreinforced masonry walls subjected to shearing perpendicular to the bed joints. The main aim of tests was the attempt at determination of influence of smooth reinforcement, placed in horizontal bed joints, on cracking tangential stresses level, maximum shearing stresses at the moment of masonry failure and Kirchhoff modulus of vertically sheared masonry walls. Investigations results has been showed, that applied reinforcement, with tested reinforcement ratio, hasn't effect or has insignificant effect on mentioned above mechanical parameters of vertically sheared masonry walls.

1. Wprowadzenie

Drobnowymiarowe elementy murowe znajdujące się na polskim rynku nie pozwalają na umieszczanie zbrojenia w inny sposób niż w poziomych spoinach wspornych. W naszym kraju nie są dostępne na szerszą skalę, przeciwnie niż w krajach zachodnioeuropejskich i USA, elementy murowe z odpowiednimi pionowymi otworami, w których umieszcza się zbrojenie i wypełnia zaprawą. Wszelkie konstrukcje murowe z pionowymi rdzeniami żelbetowymi pomiędzy elementami murowymi traktować należy raczej jako zespolone konstrukcje murowo-żelbetowe.

*Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Starosolski.

Wpływ umieszczenia zbrojenia w murze na kierunku prostopadłym do kierunku działania sił poprzecznych nie został, jak do tej pory, zbadany. Pozostają więc bez odpowiedzi następujące pytania:

- Czy istnieje wpływ zbrojenia umieszczanego w spoinach wspornych na poziom naprężeń stycznych w momencie zarysowania muru?
- W jaki sposób zbrojenie to wpływa na odkształcalność postaciową murowanej ściany przed zarysowaniem?
- Czy poziome zbrojenie ma związek z wielkością stycznych naprężeń niszczących mur?

W kilku ośrodkach badawczych na świecie przeprowadzono testy ścinanych ścian murowych wykonanych z różnych elementów murowych, które miały jednak możliwość umieszczenia w przeznaczonych do tego otworach zbrojenia pionowego. Badane ściany murowe posiadały więc zbrojenie zarówno poziome, jak i pionowe. Kolejną różnicą polegała na tym, że analizowane ściany były obciążane siłami poprzecznymi równoległymi do warstw muru. Pomimo występowania zbrojenia równoległego i prostopadłego do kierunku obciążenia w omawianych badaniach skupiono się jedynie na określeniu wpływu zbrojenia równoległego do kierunku obciążenia i pozostałych czynników oddziałujących na nośność muru po jego zarysowaniu, lecz bez szczegółowej analizy każdego z nich. Wyniki tych badań opublikowano np. w pracy [1]. Również nowa polska norma [2], z wymienionych wyżej przyczyn, nie mówi nic o zbrojonych ścianach murowych poddanych ścinaniu.

Specyfika elementów murowych dostępnych w naszym kraju i murów z nich wykonywanych oraz brak rezultatów badań ścian murowych ze zbrojeniem w spoinach spornych poddanych pionowemu ścinaniu stanowią powody, które przyczyniły się do rozpoczęcia przez autora badań w opisanym kierunku w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej, gdzie do tej pory prowadzono już badania niezbrojonych murów ścinanych pionowo [3, 4].

2. Elementy i stanowisko badawcze oraz przebieg badań

Badania porównawcze przeprowadzono na modelach wykonanych z cegły pełnej klasy 20 na zaprawie cementowo-wapiennej o objętościowym stosunku cementu do wapna do piasku 1:1:6. Podstawowe parametry użytej cegły, zaprawy i stali zbrojeniowej przedstawiono w tabl. 1. W tabl. 2 zawarte są wyniki towarzyszących badań podstawowych parametrów mechanicznych muru ściskanego wykonanego z materiałów użytych do wykonania modeli do

badan zasadniczych. Badania towarzyszące muru na ściskanie przeprowadzono na 3 modelach (co nie pozwala na określenie współczynnika zmienności) wykonanych i przebadanych zgodnie z zaleceniami załącznika A nowej polskiej normy [5].

Tablica 1

Podstawowe parametry mechaniczne cegły, zaprawy i stali zbrojeniowej użytej do wykonania modeli

	Średnia wytrzymałość na ściskanie f_n [MPa]		Współczynnik zmienności v [%]	
Cegła	27,5		8,2	
Zaprawa	6,75		12,0	
	średnia wytrzymałość na rozciąganie f_t [MPa]	średnie naprężenia graniczne przy przyroście nieproporcjonalnym 0,2% f_y [MPa]	średnie odkształcenia całkowite odpowiadające naprężeniom f_y $\times 10^{-4}$	średni moduł sprężystości podłużnej E [GPa]
Stal	809	720	33	204

Tablica 2

Średnia wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości podłużnej modeli badawczych

Średnia wytrzymałość na ściskanie f_{mean} [MPa]	Moduł sprężystości podłużnej E [MPa]
10,6	3251

Kształt oraz podstawowe wymiary modeli do badań zasadniczych pokazano na rys. 1.

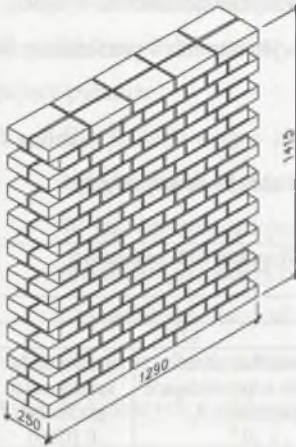
Elementy zbrojone posiadały zbrojenie w postaci gładkich prętów $\phi 6$ ze stali nierdzewnej 1H18N9T-1.4541. Stopień nasycenia muru zbrojeniem ρ wynosił 0,05%. Zbrojenie zostało odpowiednio zakotwione w betonie monolityzującym modele w stanowisku badawczym. W celu pomiaru odkształceń zbrojenia umieszczonego w murze, na prętach zbrojeniowych znajdujących się w okolicach środka wysokości modelu zostały naklejone po trzy foliowe tensometry elektrooporowe o bazie pomiarowej 6 mm.

Sposób rozmieszczenia zbrojenia w elemencie badawczym oraz miejsca pomiarów odkształceń zbrojenia znajdującego się w środkowej części modelu pokazano na rys. 2.

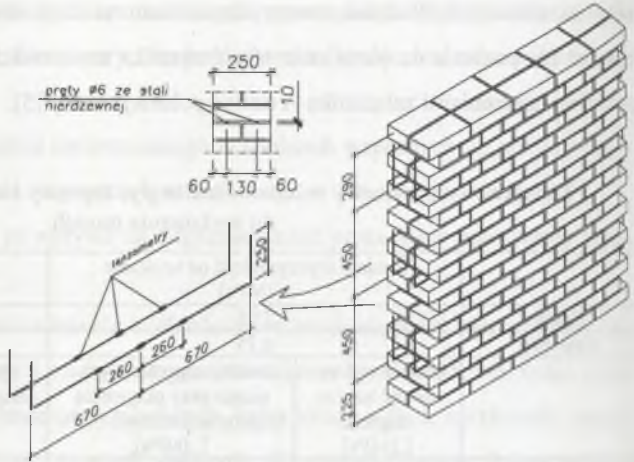
W ramach programu badań zasadniczych przebadane zostały 4 zestawy elementów niezbrojonych VC (po dwa modele badawcze w zestawie) i 4 zestawy modeli zbrojonych VCz1. Badania na ścinanie w kierunku prostopadłym do spoin wspornych przeprowadzono przy trzech poziomach naprężeń ścisających σ_c - 0,6; 1,2; 1,8 MPa oraz bez ich udziału.

Schemat stanowiska badawczego i sposób realizacji obciążeń przedstawiono na rys. 3.

Opis stanowiska badawczego przedstawiono w pracach [3, 4].



Rys. 1. Element badawczy
Fig. 1. Test element



Rys. 2. Rozmieszczenie zbrojenia oraz tensometrów na prętach zbrojonych w modelach zbrojonych

Fig. 2. Reinforced specimens: reinforcement and strain gauges arrangement

3. Rezultaty badań i ich analiza

Wszystkie zestawy badawcze obciążane były do momentu ich zniszczenia, za który uznawano chwilę, kiedy nie było możliwe uzyskanie większej siły pionowej P . Dokonywano również obserwacji momentu zarysowania modeli i rejestracji siły je wywołującej. W tabelicy 3 przedstawiono podstawowe rezultaty badań dla modeli niezbrojonych i zbrojonych przy różnych poziomach naprężeń ściskających.

Średnie naprężenia styczne τ wyznaczano następująco:

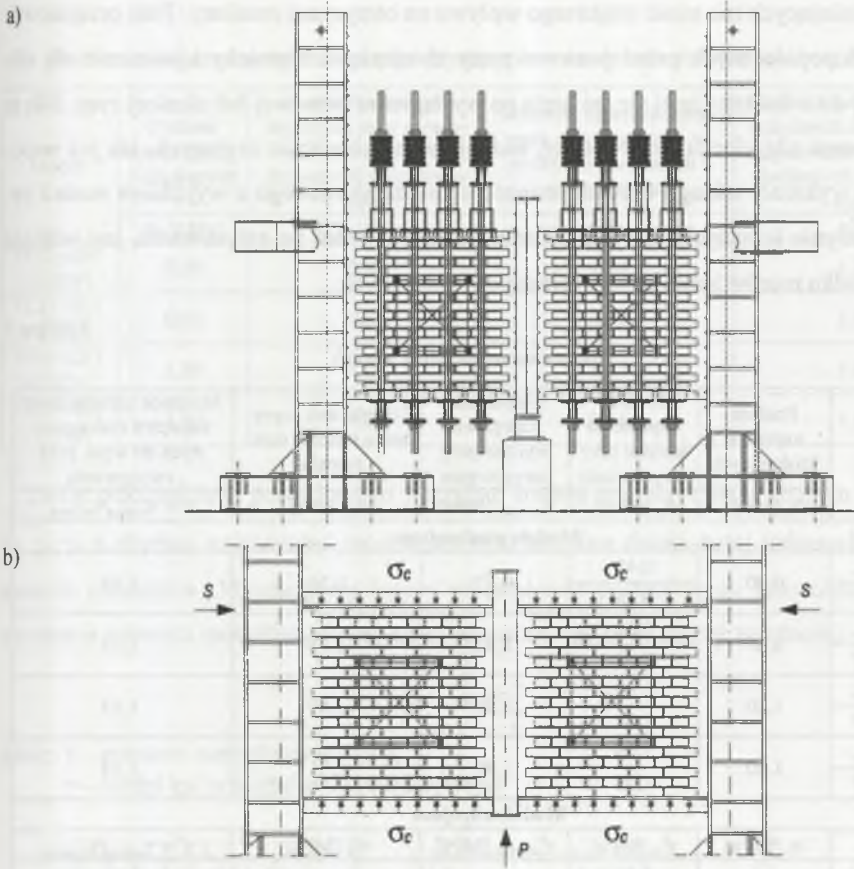
$$\tau = \frac{P}{2 \cdot t \cdot h} \quad (1)$$

gdzie: P – siła pionowa przekazywana na słup środkowy,

t – grubość modelu,

h – wysokość modelu.

W tabelicy 4 zaprezentowano natomiast porównanie naprężeń stycznych w momencie zarysowania i do stycznych maksymalnych w chwili zniszczenia oraz stosunku tych naprężeń dla modeli niezbrojonych i zbrojonych.



Rys. 3. Stanowisko badawcze: a) ogólny szkic stanowiska; b) sposób realizacji obciążeń
 Fig. 3. Test set-up: a) general sketch; b) load realization manner

Wyniki porównań zawartych w tabl. 4 wskazują na to, że zastosowanie zbrojenia w postaci prętów gładkich $\phi 6$ przy bardzo małym stopniu nasycenia muru zbrojeniem $\rho = 0,05\%$ nie wpływa pozytywnie na poziom stycznych naprężeń w momencie zarysowania i naprężeń maksymalnych w chwili zniszczenia muru. Należy jedynie zauważyć, że nastąpił 22% wzrost stosunku naprężeń stycznych $\tau_{cr,mean}$ do τ_u dla modeli zbrojonych i niezbrojonych ścinanych bez udziału naprężeń ściskających. Nie zaobserwowano natomiast większego wzrostu tej proporcji dla modeli jednocześnie ścinanych i ściskanych.

Rezultaty testów przeprowadzonych na uniwersytecie w Padwie [6] wykazały, że nośność dwóch prętów $\phi 6$ umieszczonych w poziomej spoinie wspornej obciążonej siłami ścinającymi prostopadłymi do osi podłużnej prętów zbrojeniowych wynosi około 30 kN przy wzajemnym przemieszczeniu pionowym elementów murowych w granicach 1 mm, przy czym wartość

naprężeń ściskających nie miała większego wpływu na otrzymane rezultaty. Fakt przejmowania obciążeń poprzecznych przez poziome pręty zbrojeniowe tłumaczy ujawnienie się siły prostopadłej do odkształcającej się osi pręta po wystąpieniu pionowej lub ukośnej rysy. Siła ta została nazwana siłą klockującą. Niestety, badania wycinków ścian ceglanych, jak już wspomniano, nie wykazały takiego wzrostu nośności muru zarysowanego z wyjątkiem modeli badawczych jedynie ścinanych, których odkształcalność, również po zarysowaniu, jest większa niż w przypadku murów jednocześnie ścinanych i ściskanych.

Tablica 3

Podstawowe wyniki badań

Model	Poziom naprężeń ściskających	Srednie naprężenia styczne przy zarysowaniu	Uśrednione naprężenia styczne przy zarysowaniu	Uśrednione naprężenia styczne maksymalne	Stosunek uśrednionych naprężeń maksymalnych do wyst. przy zarysowaniu
	σ_c [MPa]	τ_{cr} [MPa]	$\tau_{cr,mean}$ [MPa]	τ_u [MPa]	$n = \tau_{u,mean}/\tau_{cr,mean}$
Modele niezbrojone					
VC-00/1-L	0,00	0,48	0,47	0,54	1,15
VC-00/1-P		0,46			
VC-06/1-L	0,60	1,04	1,02	1,13	1,11
VC-06/1-P		0,99			
VC-12/1-L	1,20	1,38	1,40	1,57	1,13
VC-12/1-P		1,41			
VC-18/1-L	1,80	1,96	1,96	2,31	1,18
VC-18/1-P		1,96			
Modele zbrojone					
	σ_c [MPa]	τ'_{cr} [MPa]	$\tau'_{cr,mean}$ [MPa]	τ'_u [MPa]	$n' = \tau'_{u,mean}/\tau'_{cr,mean}$
VCz1-00/1-L	0,00	0,35	0,39	0,54	1,40
VCz1-00/1-P		0,42			
VCz1-06/1-L	0,60	0,90	0,90	1,01	1,12
VCz1-06/1-P		0,90			
VCz1-12/1-L	1,20	1,42	1,42	1,60	1,13
VCz1-12/1-P		1,42			
VCz1-18/1-L	1,80	1,61	1,70	2,16	1,27
VCz1-18/1-P		1,79			

Wzrost naprężeń ściskających powoduje, oczywiście, zwiększenie poziomu naprężeń stycznych, przy których następuje zarysowanie i zniszczenie modeli, jednak przyrosty te nie są większe dla modeli zbrojonych. Więcej informacji związanych z tym zagadnieniem, dotyczących jednak murów niezbrojonych, można znaleźć w pracach [3, 4].

Dzięki pomiarom odkształceń postaciowych za pomocą układu baz przedstawionych na rys. 4 możliwe było wyznaczenie kątów odkształceń postaciowych wg schematu pokazanego na rys. 5.

Tablica 4

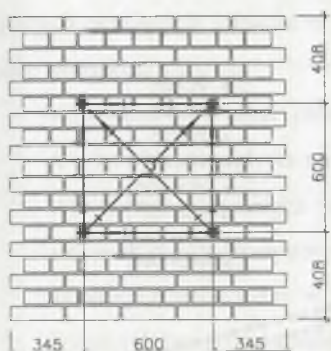
Porównanie uśrednionych naprężeń stycznych w modelach zbrojonych i niezbrojonych

Model	Poziom naprężeń ściskających	Stosunek naprężeń stycznych przy zarysowaniu w modelach zbrojonych i niezbrojonych	Stosunek naprężeń stycznych maksymalnych w modelach zbrojonych i niezbrojonych	Stosunek naprężeń maksymalnych do wyst. przy zarysowaniu w modelach zbrojonych i niezbrojonych
	σ_c [MPa]	$\tau'_{cr,mean}/\tau_{cr,mean}$	τ'_y/τ_y	n^i/n
VCz1-00/1 VC-00/1	0,00	0,82	1,00	1,22
VCz1-06/1 VC-06/1	0,60	0,88	0,89	1,01
VCz1-12/1 VC-12/1	1,20	1,02	1,02	1,00
VCz1-18/1 VC-18/1	1,80	0,87	0,94	1,08

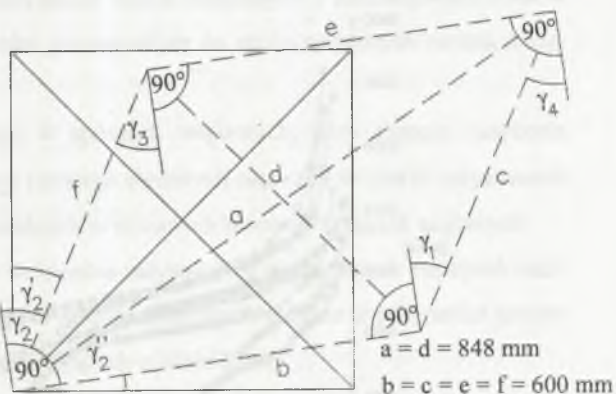
Za kąt odkształcenia postaciowego γ przyjęto średnią arytmetyczną z czterech wartości γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ_4 z obydwu powierzchni modelu, co było możliwe dzięki dużej jednorodności otrzymanych rezultatów. Wyznaczenie kątów odkształcenia postaciowego pozwoliło z kolei na uzyskanie wartości modułów odkształcenia postaciowego G ze znanej zależności:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

gdzie: τ – pionowe naprężenia styczne,
 γ – średni kąt odkształcenia postaciowego.



Rys. 4. Układ baz pomiarowych do wyznaczenia odkształceń postaciowych muru
 Fig. 4. Scheme of gauges location for non-dilatational strains measurement

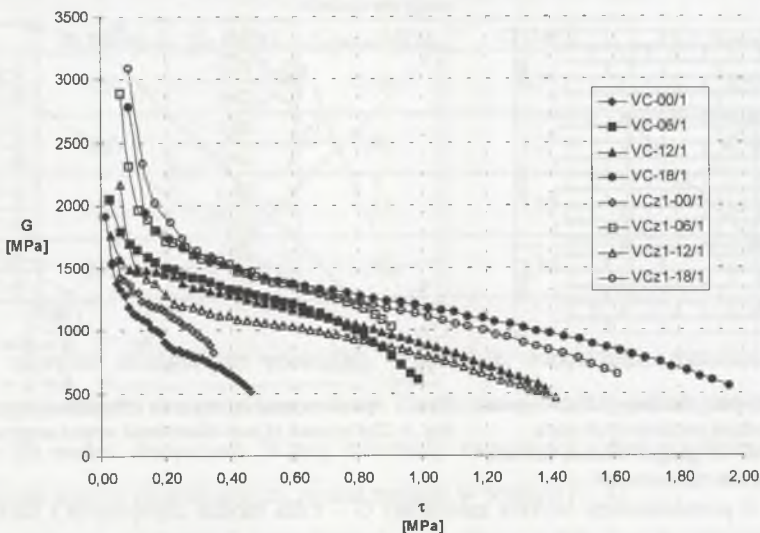


Rys. 5. Sposób wyznaczenia kątów odkształcenia postaciowego
 Fig. 5. The manner of non-dilatational strains angles determination

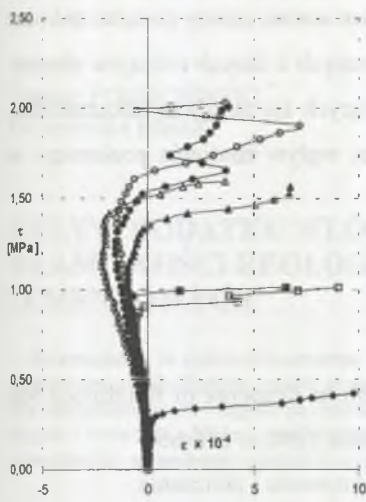
Na rys. 6 przedstawiono wykres zależności $G - \tau$ dla modeli zbrojonych i niezbrojonych przy poszczególnych poziomach naprężeń ściskających w zakresie naprężeń $0 - \tau_{cr}$.

Analizując przedstawioną zależność można zaobserwować niewielki, około 17%, wzrost modułu Kirchhoffa modeli zbrojonych w stosunku do muru niezbrojonego jedynie dla zestawów badawczych ścinanych pionowo bez udziału naprężeń ściskających lub przy udziale tych naprężeń na poziomie 0,60 MPa. Podobnie więc jak w przypadku stosunków naprężeń stycznych, tak tutaj również pozytywny wpływ niewielkiej ilości zbrojenia uwidacznia się w przypadku murów o większej swobodzie odkształceń w płaszczyźnie muru.

Fakt braku wpływu zbrojenia na parametry mechaniczne murów ceglanych ścinanych pionowo przy udziale większych naprężeń ściskających wydaje się potwierdzać pomiar odkształceń prętów zbrojeniowych. Jak to widać na rys. 7 i 8 (oznaczenia „l” i „p” dotyczą modelu umownie lewego i prawego), w przypadku modeli jedynie ścinanych lub ścinanych z małym ściskaniem, większe odkształcenia wykazują tensometry umieszczone na środku pręta zbrojeniowego, czyli w miejscu teoretycznie największych głównych naprężeń rozciągających, niż te w odległości 260 mm od środka w kierunku słupa wewnętrznego. W przypadku zestawów badawczych ścinanych przy udziale dużych naprężeń ściskających, największe odkształcenia zbrojenia rejestrowane są bliżej wewnętrznego słupa stanowiska badawczego, poprzez który realizowane jest obciążenie, stąd tam występują największe przemieszczenia pionowe i co za tym idzie, odkształcenia prętów zbrojeniowych. W tym przypadku większe naprężenia ściskające nie pozwalają na duże odkształcenia części centralnych modeli.

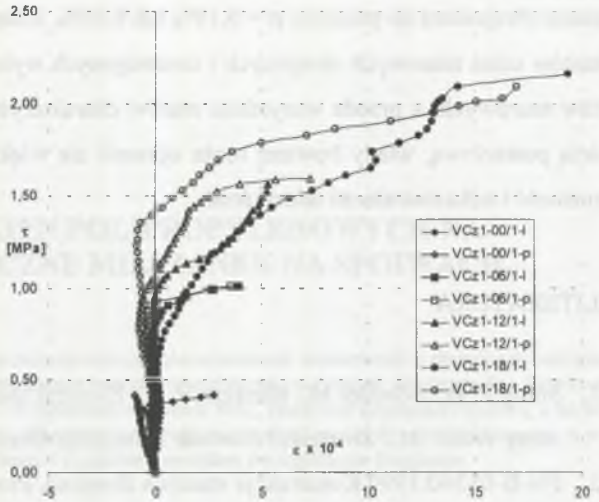


Rys. 6. Zależność $G - \tau$ dla modeli zbrojonych i niezbrojonych w zakresie naprężeń $0 - \tau_{cr}$
 Fig. 6. $G - \tau$ relationship for reinforced and unreinforced specimens in stress range $0 - \tau_{cr}$



Rys. 7. Odształcenia środka prętów zbrojeniowych w funkcji naprężeń stycznych

Fig. 7. The $\sigma - \epsilon$ relationship in the middle of reinforcement bars placed in centre of specimen



Rys. 8. Odształcenia zbrojenia w odległości 260 mm od środka modelu w kierunku wewnętrznego słupa stanowiska badawczego

Fig. 8. The $\sigma - \epsilon$ relationship at a distance of 260 mm towards the centre column from the middle of reinforcement bars placed in centre of specimen

4. Wnioski i podsumowanie

Na podstawie analizy uzyskanych rezultatów badań zbrojonych i niezbrojonych murów ceglanych poddanych ścinaniu w kierunku prostym do spoin wspornych można następujące wnioski:

- stosowanie zbrojenia układanego w spoinach wspornych, przy stopniu nasycenia $\rho = 0,05\%$, nie wpływa na wzrost poziomu stycznych naprężeń w chwili zarysowania oraz naprężeń stycznych maksymalnych w ścinanych pionowo ścianach ceglanych,
- stosunek naprężeń stycznych w momencie zarysowania do stycznych naprężeń maksymalnych jest wyższy w przypadku murów zbrojonych jedynie w przypadku murów ścinanych bez udziału naprężeń ściskających o około 22%,
- moduł odkształcalności poprzecznej G ścian ceglanych zbrojonych jest wyższy o średnio 17% wyłącznie dla murów ścinanych pionowo bez ściskania lub przy stosunkowo niskim poziomie naprężeń ściskających (w prezentowanych badaniach – dla poziomu 0,60 MPa)

Rezultaty przeprowadzonych testów wydają się wskazywać jednocześnie na potrzebę przeprowadzenia podobnych badań ścian ceglanych przy zwiększonym stopniu nasycenia

murów zbrojeniem do poziomu $\rho = 0,10\%$ lub $0,15\%$. Zdaniem autora, należy ponadto dokonać testów ścian murowych zbrojonych i niezbrojonych wykonanych z innych rodzajów elementów murowych, a przede wszystkim murów charakteryzujących się mniejszą odkształcalnością postaciową, wtedy bowiem może ujawnić się większy wpływ zbrojenia poziomego na nośność i odkształcalność takich ścian.

LITERATURA

1. Shing P. B., Schuller M., Hoskere V. S.: Flexural and Shear Response of Reinforced Masonry Walls. *ACI Structural Journal*. November-December 1990, s. 646-656.
2. PN-B-03340:1999 Konstrukcje murowe zbrojone. Projektowanie i obliczanie.
3. Kubica J.: The Effect of Compressive Loads on the Load Capacity and Deformation of Brick Walls Subjected to Vertical Shear. *Proc. of the Fourth International Masonry Conference*. Proc. of the British Masonry Society: Masonry (7), London 1995, Vol. 1, s. 130-134.
4. Kubica J.: Ściany z cegły w złożonym stanie naprężenia. Praca doktorska. Katedra Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska, Gliwice 1995.
5. PN-B-03002:1999 Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie.
6. Valluzzi M. R., Bernardini A., Modena C.: Local Transfer Mechanisms in Reinforced Masonry Walls. *Proc. of the 12th International Brick/Block Masonry Conference*. Madrid, 25-28 June 2000, Vol. 2, s. 1283-1296.

Recenzent: Prof. dr inż. Bohdan Lewicki

Abstract

Tests results, dealing with influence of reinforcement, placed in bed joints, on cracking shear stress level, maximum shearing stresses at the moment of masonry failure and non-dilatational strain modulus of vertically sheared masonry walls. Investigations results has been showed, that application of horizontal reinforcement, with tested reinforcement ratio, hasn't effect or has insignificant effect on basic mechanical parameters of vertically sheared masonry walls.