ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: BUDOWNICTWO z.89 Nr kol. 1482

Łukasz DROBIEC

BADANIA NOŚNOŚCI NA ŚCISKANIE MURÓW ZE ZBROJENIEM W SPOINACH WSPORNYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono wyniki badań zbrojonych murów ściskanych. Badaniu poddano elementy próbne wykonane z cegły pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej o stosunku cementu, wapna i piasku 1: 1: 6. Zbrojenie w postaci dwóch prętów gładkich o średnicy 6 mm umieszczono w co szóstej spoinie wspornej. Otrzymane wyniki badań porównano z rezultatami uzyskanymi dla modeli niezbrojonych. Badania pozwoliły na określenie wpływu zbrojenia na nośność na ściskanie oraz moduł sprężystości muru. Ponadto pomiar odkształceń za pomocą tensometrów umożliwił wyznaczenie poziomu wytężenia zbrojenia w ściskanym murze.

INVESTIGATIONS OF COMPRESSIVE STRENGTH OF MASONRY WITH BED JOINT REINFORCEMENT

Summary. The results of the investigations of compressed reinforced masonry are presented in this paper. Investigations were made on test specimens, which were executed from clay brick and cement-lime mortar on relation of cement, limes and of sand 1: 1: 6. As reinforcement two smooth roads of 6 mm in diameter in every sixth bed joint were used. Received results of investigations were compared with results obtained for models unreinforced. The investigations made it possible to determine the influence of reinforcement on compressive strength and modulus of elasticity of masonry. Besides measurement of deformations with strain gauge made it possible to delimitation the level of strain of reinforcement in compressed wall.

1. Wprowadzenie

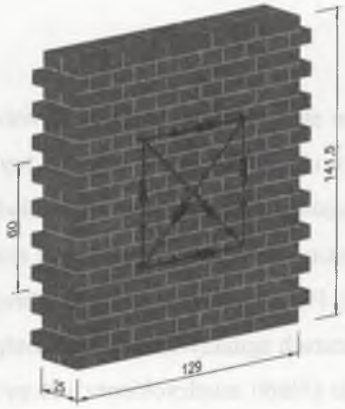
Konstrukcje murowe znane są od stuleci, a pierwsze wzmianki o zastosowaniu w nich zbrojenia pochodzą z początku ubiegłego wieku, kiedy to brytyjski inżynier Marc Brunel w 1813 r. wykonał zbrojony murowany komin pewnych zakładów przemysłowych w pobliżu Londynu [1]. W Polsce pierwsze informacje o zbrojonych murach znaleźć już można w publikacji W. Adamskiego [2] z 1949 r. Obecnie mury ze zbrojeniem w spoinach wspornych stosuje się najczęściej w elementach zginanych, takich jak nadproża [1, 3, 4, 5], w elementach ściskanych o małym przekroju (filarki międzyokienne i słupy) [6, 7] oraz w celu połączenia nieprzewiązanych ścian wzajemnie prostopadłych [3, 4, 5]. Ponadto niektórzy producenci

elementów murowych zalecają profilaktyczne stosowanie tego typu zbrojenia, szczególnie w murach nośnych obiektów narażonych na działanie wpływów sejsmicznych bądź parasejsmicznych. Zbrojenie to często wykorzystywane jest więc również w elementach obciążonych głównie pionowo. Pozytywny jego wpływ, poprzez ograniczenie odkształceń, na nośność na ściskanie elementów o małym przekroju jest niepodważalny, co znalazło swoje odzwierciedlenie w kolejnych edycjach normy murowej. Inaczej być może w ścianach murowanych, których szerokość jest znacznie większa od grubości, a odkształcenia są już często ograniczone przez prostopadłe ściany usztywniające. Ponadto wprowadzenie w spoiny karbu w postaci prętów stalowych o większej sztywności zamiast wzmacniać może również osłabiać konstrukcję.

W prezentowanych badaniach określono wpływ zbrojenia na nośność murów poddanych obciążeniom pionowym. Zastosowano możliwie największe średnice prętów przy minimalnym procencie zbrojenia. Porównano wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości elementów zbrojonych i niezbrojonych oraz wyznaczono siły rozciągające w prętach zbrojeniowych.

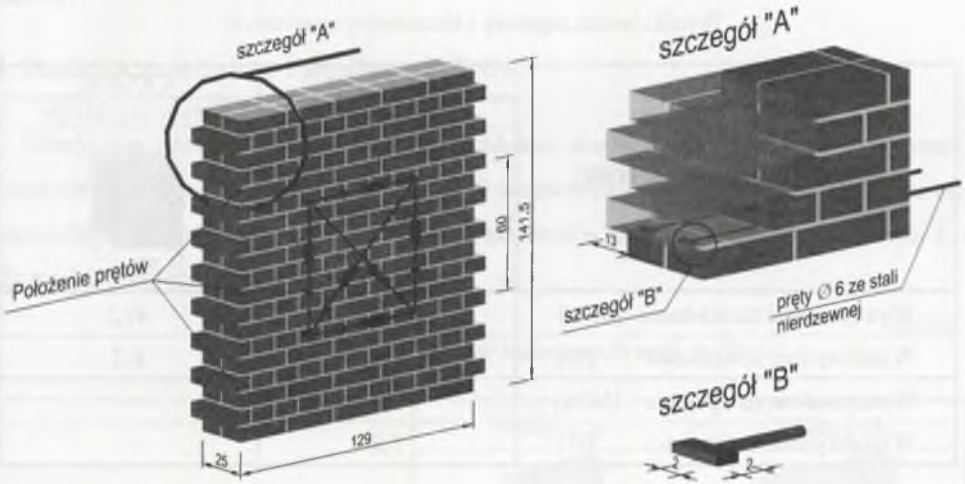
2. Elementy badawcze

Elementy badawcze wykonano z cegły pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej o stosunku cementu, wapna i piasku 1 : 1 : 6. Badaniom poddano dwie serie elementów badawczych oznaczonych jako A i B. Seria A obejmowała sześć elementów niezbrojonych, a seria B sześć elementów ze zbrojeniem w spoinach wspornych. Element badawczy serii A pokazano na rys. 1.



Rys.1. Element badawczy serii A
Fig.1. Test specimen of A series

Kształt elementów badawczych serii B, ze zbrojeniem umieszczonym w nieprzewiązanych spoinach wspornych, był identyczny jak elementów serii A. Zbrojenie wykonano w postaci dwóch prętów gładkich o średnicy 6 mm ze stali nierdzewnej 1H18N9T, układanych w co szóstej spoinie poziomej (procent zbrojenia około 0,05%). Pręty umieszczono we wzajemnym rozstawie co 13 cm. W celu zapewnienia należytego zakotwienia i uniemożliwienia poślizgu na końcach prętów przyspawano odcinki płaskownika grubości 6 mm. Widok elementu badawczego serii B i szczegóły rozmieszczenia zbrojenia pokazano na rys. 2.



Rys.2. Element badawczy serii B
Fig.2. Test specimen of B series

Wszystkie elementy badano w jednym cyklu aż do zniszczenia. Pomiaru odkształceń dokonywano co 150 kN za pomocą czujników indukcyjnych na bazie pomiarowej 60 × 60 cm (rys. 1 i 2). Pomiaru odkształceń prętów zbrojeniowych dokonano za pomocą tensometrów foliowych naklejonych w środku ich długości.

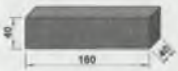
Badania materiałowe polegały na wyznaczeniu wytrzymałości na ściskanie i zginanie zaprawy wg wytycznych normy PN-85/B-04500 [8] oraz wytrzymałości na ściskanie cegły wg zaleceń dawnej normy krajowej PN-70/B-12016 [9]. Ponadto badaniu poddano również pręty zbrojeniowe. Wyznaczono siłę zrywającą, wytrzymałość na rozciąganie i granicę plastyczności stali. Dodatkowo za pomocą ekstensometru określono również moduł sprężystości stali.

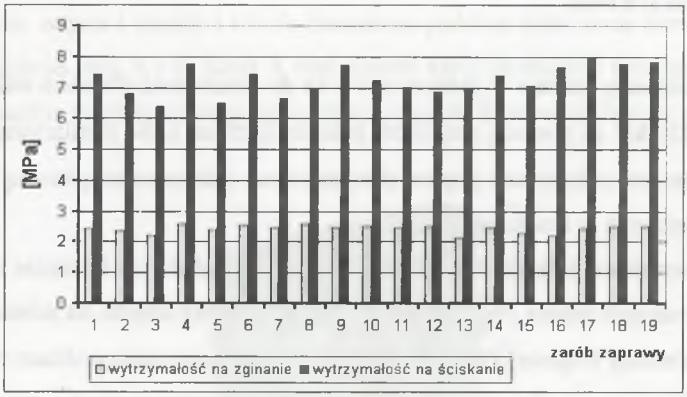
3. Badania towarzyszące

Na wykonanie wszystkich elementów badawczych potrzebnych było 19 zarobów zaprawy. Z każdego zarobu pobrano po trzy próbki do badań. Uśrednione wartości wytrzymałości na zginanie i ściskanie ze wszystkich zarobów zaprawy oraz wytrzymałości na ściskanie z sześciu próbek cegły zestawiono w tabl. 1. Dodatkowo uzyskane z poszczególnych zarobów zaprawy wartości wytrzymałości pokazano na wykresie na rys. 3.

Tablica 1

Wyniki badań zaprawy i elementów murowych

WYZNACZANA WARTOŚĆ	ZAPRAWA	CEGŁA
	PN-85/B-04500 [8]	PN-70/B-12016 [9]
		
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	7,2	47,2
Współczynnik zmienności [%]	6,6	6,2
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	2,4	-
Współczynnik zmienności [%]	5,5	-



Rys.3. Wytrzymałość na zginanie i ściskanie zaprawy
Fig.3. Mortar bending and compressive strength

Uzyskane z badań 6 prętów zbrojeniowych wartości siły zrywającej, wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności i modułu sprężystości podano w tablicy 2.

Tablica 2

Wyniki badań stali zbrojeniowej

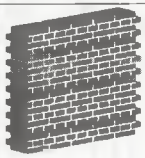
PARAMETR	Siła zrywająca	Wytrzymałość na rozciąganie	Granica plastyczności	Moduł sprężystości
WARTOŚĆ	23,1 kN	817 MPa	760 MPa	204 000 MPa
WSPÓŁCZYNNIK ZMIENNOŚCI	0,9 %	0,9 %	0,7 %	1,2 %

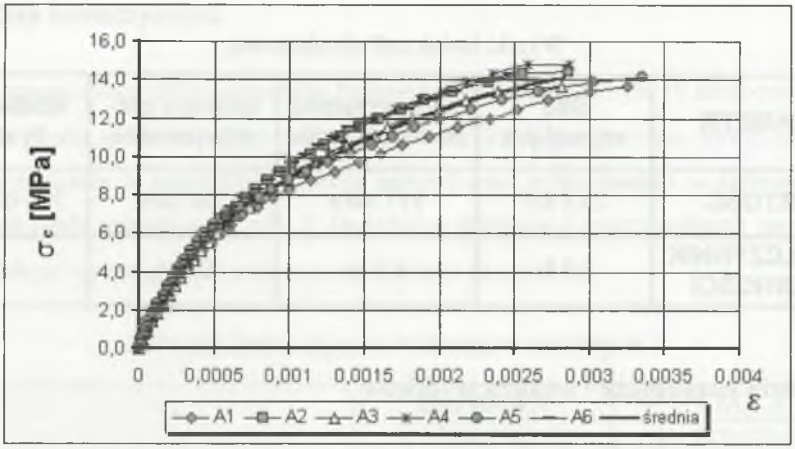
4. Badania zasadnicze i analiza wyników

Uśrednione wartości wytrzymałości na ściskanie, modułu sprężystości i współczynnika Poissona uzyskane z badań modeli serii A i B zestawiono w tablicy 3. Przebiegi zależności naprężenie – odkształcenie dla niezbrojonych elementów badawczych pokazano na rys. 4, a dla modeli zbrojonych na rys. 5.

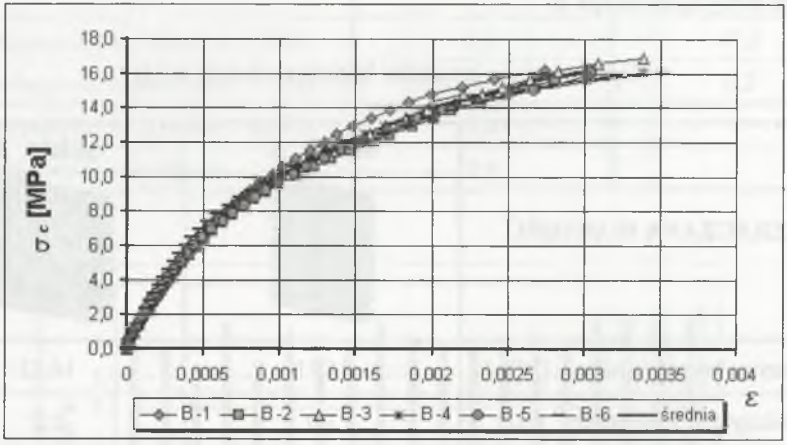
Tablica 3

Wyniki badań elementów badawczych serii A i B

WYZNACZANA WARTOŚĆ	SERIA A	SERIA B
		
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	14,11	16,22
Współczynnik zmienności [%]	3,9	2,2
Moduł sprężystości [MPa]	13 600	14 400
Współczynnik zmienności [%]	8,0	7,7
Współczynnik Poissona	0,2	0,15
Współczynnik zmienności [%]	14,5	12,5



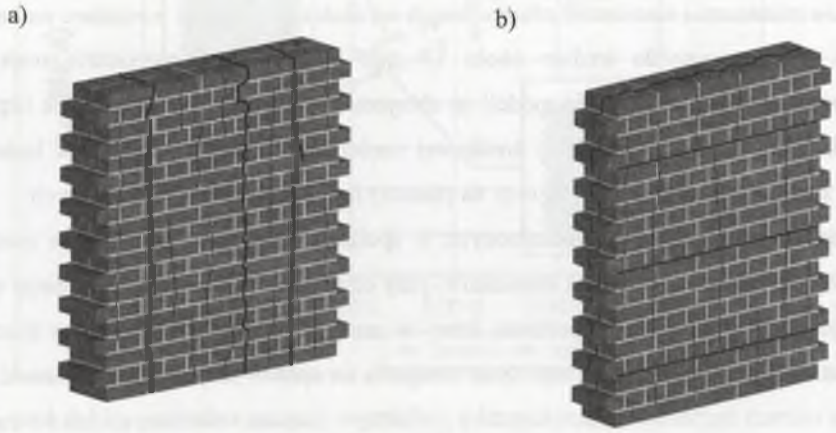
Rys.4. Zależność σ - ε dla elementów badawczych serii A
Fig.4. σ - ε relationship for A series



Rys.5. Zależność σ - ε dla elementów badawczych serii B
Fig.5. σ - ε relationship for B series

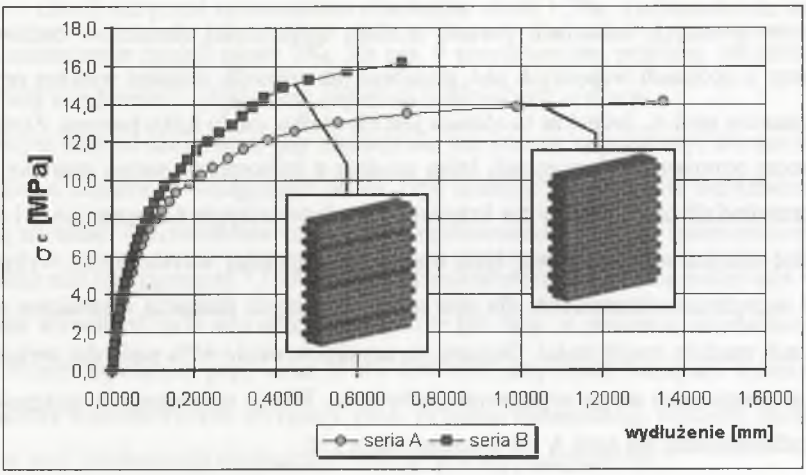
W prezentowanych w tablicy 3 oraz na rys. 4 i 5 wynikach badań serii A i B widać nieznaczne różnice. Średnia wartość nośności na ściskanie dla zbrojonych modeli serii B jest o około 15% wyższa niż nośność modeli niezbrojonych. Uzyskany wzrost związany jest ze znacznym zmniejszeniem przez stal zbrojeniową odkształceń modeli w kierunku podłużnym. Elementy niezbrojone serii A niszczyły się bowiem w sposób klasyczny poprzez podział na pionowe słupki, natomiast w modelach serii B stal zbrojeniowa istotnie ograniczyła zarysowanie na powierzchniach bocznych. W elementach ze zbrojeniem rysa niszcząca przebiegała

zawsze wzdłuż wewnętrznej pionowej spoiny nieprzewiązanej. Widok typowego zarysowania elementów obu serii pokazano na rys. 6.



Rys.6. Typowy obraz zarysowania elementów badawczych: a) niezbrojonych, b) ze zbrojeniem
Fig.6. Typical picture of scratch of investigative elements: a) un-reinforced, b) reinforced

Nieznaczne zarysowanie płaszczyzn bocznych zbrojonych elementów badawczych serii B w stosunku do zarysowania modeli niezbrojonych można zobrazować na wykresie na rys. 7, gdzie pokazano wydłużenie poziomych czujników bazy pomiarowej pod wpływem naprężeń ściskających.



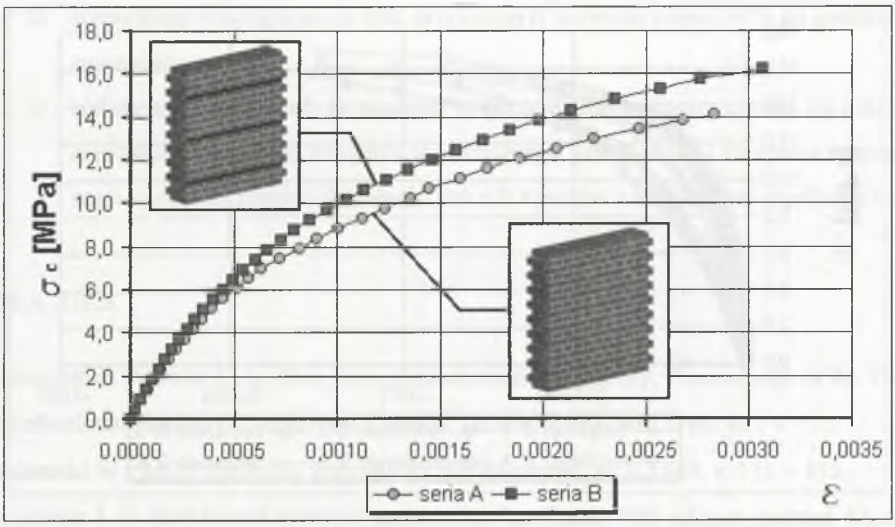
Rys.7. Wydłużenie poziome modeli serii A i B
Fig.7. Horizontal extension models of A and B series

Pierwsze rysy podczas badania modeli serii A oraz B zaobserwowano w przedziale 0,55 ÷ 0,6 maksymalnego naprężenia ściskającego. Na rys. 7 widać, że w tym właśnie przedziale następuje wyraźny wzrost wydłużeń rejestrowany przez czujniki indukcyjne. W momencie zniszczenia elementów niezbrojonych wydłużenie uzyskane z pomiaru na bazie o długości 60 cm wynosiło średnio około 1,4 mm i było ponad trzykrotnie większe od odpowiadającego mu wydłużenia modeli ze zbrojeniem przy podobnym poziomie naprężeń. Szerokość rysy, przechodzącej w środkowej części niezbrojonych elementów badawczych była średnio o 1 mm większa od rysy na płaszczyźnie bocznej murów zbrojonych.

Zbrojenie w postaci prętów umieszczonych w spoinach wspornych miało więc istotny wpływ na ograniczenie zarysowania elementów, przy czym należy pamiętać, że badanie wykonano w jednoosiowym stanie naprężenia, który w zasadzie nigdy nie występuje w rzeczywistej konstrukcji. Dlatego wpływ tego typu zbrojenia na sposób zarysowania i nośność na ściskanie w murach ograniczonych w kierunku podłużnym słupami żelbetowymi lub ścianami poprzecznymi będzie zapewne nieco inny.

Interesujące wyniki wpływu zbrojenia w spoinach wspornych na nośność muru na ściskanie uzyskano w badaniach na uniwersytecie w Karlsruhe [10]. Ściskaniu osiowemu poddano tam mury z cegły pełnej zbrojone włóknem szklanym i zbrojeniem w postaci dwóch prętów o średnicy 5 mm, połączonych poprzecznymi prętami ϕ 3 mm. Zbrojenie włóknem szklanym nie dało efektów, a w przypadku zbrojenia prętami tylko w jednej z trzech serii uzyskano wyraźny, około 20% wzrost nośności.

W prezentowanych badaniach wartość modułu sprężystości elementów badawczych ze zbrojeniem w spoinach wspornych jest, podobnie jak nośność, również większa od wartości modułu murów serii A. Jednakże tu różnica jest niewielka, rzędu kilku procent. Związane jest to miejscem poprowadzenia siecznej, która zgodnie z zaleceniami normy murowej [11] powinna przechodzić przez punkty na krzywej σ-ε odpowiadające naprężeniom 0 i 0,33 σ_{max}. Niewielkie różnice w początkowej fazie obciążenia pomiędzy uśrednionymi wykresami zależności naprężenie-odkształcenie dla obu serii badawczych tłumaczą nieznaczne różnice w wartościach modułu sprężystości. Dopiero po uzyskaniu około 40% nośności wykres σ-ε dla murów niezbrojonych ulega większemu pochyleniu. Widok uśrednionych zależności naprężenie – odkształcenie dla serii A i B pokazano na rys. 8.

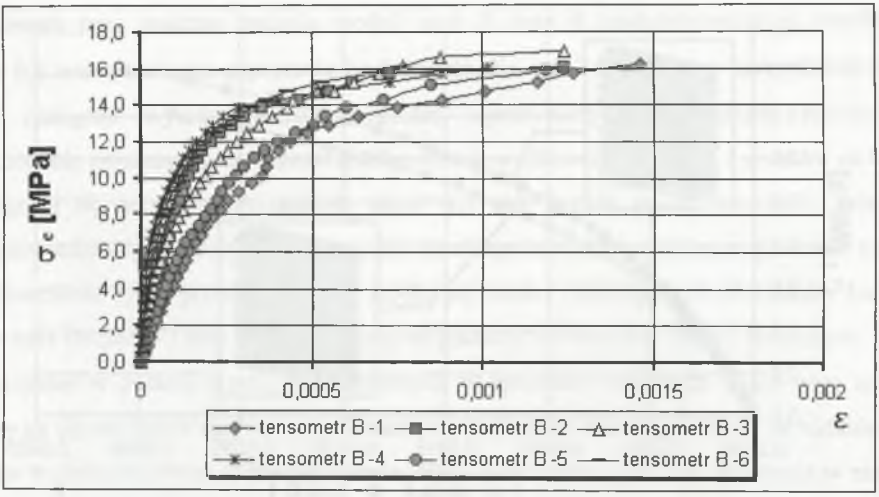


Rys.8. Uśrednione zależności naprężenie – odkształcenie dla modeli serii A i B
Fig.8. Average stress – strain relationships for A and B series

Wartość współczynnika Poissona wyznaczona dla elementów serii B jest natomiast nieznacznie mniejsza od wartości uzyskanej z badań modeli niezbrojonych, co związane jest z mniejszymi odkształceniami poziomymi murów ze zbrojeniem, jeszcze przed wystąpieniem zarysowania.

Średnie odkształcenie stali zbrojeniowej, określone za pomocą pomiaru tensometrycznego, wynosiło w chwili tuż przed zniszczeniem elementów około 1,3‰, a odkształcenie odczytane w chwili zniszczenia modeli około 2‰. Na rys. 9 przedstawiono przebieg odkształceń stali zbrojeniowej w zależności od poziomu naprężeń ściskających w murze.

W pierwszym okresie obciążenia, gdy element nie jest jeszcze zarysowany, zbrojenie pracuje nieznacznie, a dopiero po osiągnięciu około 70% nośności na ściskanie odkształcenia stali zaczynają narastać. Odkształcenia rzędu 1,3‰ rejestrowane tuż przed zniszczeniem modeli odpowiadają sile rozciągającej 7,7 kN, a wartość odkształceń równa 2‰, odczytana w chwili zniszczenia wywołana była siłą rozciągającą 11,9 kN. Siły te stanowią odpowiednio około 30% i 50% siły zrywającej pręty oraz 35% i 55% siły, przy której następuje uplastycznienie pręta. Badania tensometryczne wykazały więc, że mimo minimalnego procentu zbrojenia naprężenia w stali przekraczają nieznacznie 50% jej granicę plastyczności.



Rys.9. Odkształcenia tensometrów w zależności od poziomu naprężeń ściskających w murze
Fig.9. Steel strain in dependence on level of masonry compressive stress

Podobne wartości naprężeń w stali uzyskano podczas badań na rozciąganie murów zbrojonych, przeprowadzonych w Stanach Zjednoczonych [12]. W chwili zniszczenia próbek stal o wytrzymałości na rozciąganie 807 MPa, przy procencie zbrojenia muru 0,25%, wykazywała odkształcenie rzędu 1,7 ‰.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań trudno jest szeroko wnioskować o wpływie zbrojenia umieszczanego w spoinach wspornych na nośność na ściskanie muru z cegły pełnej. Niemniej wyniki badań pozwalają stwierdzić, że:

- Zbrojenie spoin wspornych w postaci dwóch prętów gładkich, wzajemnie niepowiązanych nie zmniejsza nośności muru na ściskanie.
- Uzyskany 15% wzrost nośności muru zbrojonego w stosunku do elementów niezbrojonych związany jest z ograniczeniem przez stal odkształceń w kierunku podłużnym.
- Zastosowanie zbrojenia znacznie ograniczyło zarysowanie płaszczyzn bocznych badanych elementów oraz spowodowało zmianę sposobu zniszczenia elementu, przez rozłupanie muru na dwie części płaszczyzną przechodzącą przez spoinę podłużną.

- Naprężenia rozciągające w stali przekroczyły niewiele ponad 50% jej granicę plastyczności.
- Należy się spodziewać, że znacznie większy wzrost nośności uzyska się przez zastosowanie typowego zbrojenia strukturalnego, jak również i zbrojenia rozproszonego w postaci siatek o drobnych oczkach ż prętów o niewielkich przekrojach.

LITERATURA

1. Timperman P., Rice J. A.: Bed joint reinforcement in masonry, Proceedings of the Fourth International Masonry Conference, London, October 1995, vol. 2, pp. 451 ÷ 453.
2. Adamski W.: Mury zbrojone, Inżynieria i Budownictwo, nr 3, 1949, s. 111 ÷ 118.
3. Amrhein J. E: Reinforced masonry engineering handbook, fifth edition updated, Masonry Institute of America, New York 1998.
4. Schneider K. J., Schubert P., Wormuth R.: Mauerwerksbau, 6 Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf 1999.
5. Bouineau A.: Maconneries armees dans les joints horizotaux. Le mur en europe du nord. L`utilisation de la Pierre Tendre en 15 cm d`epaisseur, Annales de L`institut Technique du Batiment, nr 511, 1993.
6. Dajun D., Juan Z., Xizhao L.: Experimental research on strength of brick masonry with new type transverse steel, Journal of Building Structures, vol. 9, nr 1, 1988, pp. 53 ÷ 58.
7. Dajun D.: Studies on brick masonry under compression, Materials And Structures, vol. 30, may 1997, pp. 247 ÷ 252.
8. PN-85/B-04500, Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych.
9. PN-70/B-12016, Wyroby ceramiki budowlanej. Badania techniczne.
10. Flohrer C., Hilsdorf H.K.: Enhanced ductility of masonry loaded in compression, Proceedings of 6th International Brick/Block Masonry Conference, Rome 1982, pp. 1129 ÷ 1141.
11. PN-99/B-03002, Niezbrojone konstrukcje murowe. Projektowanie i obliczanie konstrukcji.
12. Atkinson R.H., Hammons M.I.: Tension stiffening behavior of reinforced masonry, Journal of Structural Engineering, vol. 123, no. 5, 1997, pp. 597 ÷ 603.

Recenzent: Prof.zw.dr inż. Bohdan Lewicki

Abstract

Researches of compressive strength, modulus of elasticity and Poison's ratio of masonry with bed joint reinforcement are presented in this paper. Test samples was made from clay bricks and cement-lime mortar. As reinforcement two smooth rods of 6 mm in diameter, made from stainless steel, in every 6 bed joint was used (percentage of reinforcement about 0,05%). Elements were tested in hydraulic press. Readings of load and displacement were made every 150 kN by means of a dynamometer and inductive sensors with an accuracy of 0,002 mm. Additionally strain gauge measurement of reinforced bars deformations were made. All samples were loaded continuously until their complete destruction. Results of investigations were compared with results of unreinforced samples.

It appeared that bed joint reinforcement with big stiffness does not diminish masonry compressive stress. Obtained 15% increase of compressive stress connected is with limitation by steel of deformations in oblong direction. Reinforcements are limited scratch of surface side of investigative elements. Appointed level of tensile stress in reinforced bars carried out about 50% tensile stress answering of yield point of steel.