ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: BUDOWNICTWO z. 93 Nr kol. 1514

Łukasz DROBIEC*
Politechnika Śląska

BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE MURÓW Z PODŁUŻNYM ZBROJENIEM UMIESZCZONYM W SPOINACH WSPORNYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono wyniki badań ściskanych murów ze zbrojeniem podłużnym ułożonym w spoinach wspornych. 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 i dwóch prętów spiralnych o średnicach 6 mm umieszczono w co trzeciej lub co szóstej spoinie wspornej. Otrzymane wyniki badań porównano z rezultatami uzyskanymi dla modeli niezbrojonych. Przy niskim stopniu zbrojenia stwierdzono niewielki wzrost nośności na ściskanie muru, zaś elementy badawcze z większą ilością zbrojenia wykazały spadek wytrzymałości na ściskanie. Pomiar odkształceń za pomocą tensometrów umożliwił wyznaczenie poziomu wytężenia zbrojenia w ściskanym murze wynoszącego około 0,5 granicy plastyczności dla murów o mniejszym procencie zbrojenia i 0,35 granicy plastyczności dla murów zbrojonych co 3 spoinę wsporną.

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

Zbrojenie w konstrukcjach murowych zastosowano po raz pierwszy na początku XIX wieku (rok 1813 M. Brunel – murowany komin zbrojony usytuowany w pobliżu Londynu [1]), a więc około 50 lat przed powstaniem pierwszych konstrukcji żelbetowych. W drugiej połowie XIX wieku dynamiczny rozwój konstrukcji z betonu i stali spowodował jednakże znaczny spadek zainteresowania murem zbrojonym. Dopiero w latach trzydziestych ubiegłego stulecia zaczęto ponownie na szeroką skalę stosować zbrojenie w murach. Jednym z pierwszych zaj-

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

mujących się w Polsce tą tematyką był W. Adamski. Pod jego kierownictwem przeprowadzono w latach 1937 ÷ 1939 na Politechnice Warszawskiej badania zbrojonych słupów ściskanych o wymiarach 27 × 27 cm [2, 3]. Na podstawie uzyskanych wyników badań i doświadczeń prowadzonych w Związku Radzieckim w wielu publikacjach [2, 3, 4] podano, że wpływ podłużnego zbrojenia układanego w murze w odstępach większych niż co 5 warstw jest pomijalny. Zamieszczono ponadto minimalne i maksymalne procenty podłużnego zbrojenia muru wynoszące odpowiednio 0,1% i 1,0%. Zalecenia te dotyczyły jednak tylko elementów murowanych o małym przekroju, takich jak filary międzyokienne i słupy, w których wpływ zbrojenia na wartość wytrzymałości na ściskanie poprzez ograniczenie odkształceń jest niezaprzeczalny. Intuicyjnie należy się spodziewać, że wpływ takiego zbrojenia na wytrzymałość na ściskanie w ścianach, gdzie odkształcenia podłużne ograniczone są zazwyczaj przez ściany usztywniające lub szkielet żelbetowy, będzie znacznie mniejszy. Mimo licznych starań autor nie znalazł w literaturze przedmiotu wytycznych dotyczących stosowania poziomego podłużnego zbrojenia w ścianach murowanych. A przecież zbrojenie to jest obecnie coraz częściej wykorzystywane, nawet jako profilaktyka w rejonach zagrożeń obciążeniami sejsmicznymi czy parasejsmicznymi.

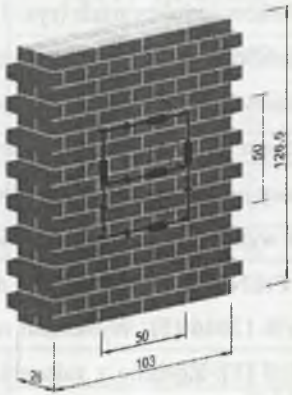
W referacie przedstawiono wyniki własnych badań odcinków muru z podłużnym zbrojeniem układanym w spoinach wspornych. W celu określenia wpływu prętów zbrojeniowych na wytrzymałość i odkształcalność muru zastosowano pręty okrągłe i spiralne o maksymalnie dużej średnicy - 6 mm, przy niewielkim poprzecznym procencie zbrojenia modeli wynoszącym około 0,05% i 0,1%.

2. Opis modeli badawczych i przebiegu badań

Badania prowadzono na elementach badawczych o wymiarach 126,5 × 103 × 25 cm. Wszystkie elementy wykonane zostały z cegły pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej w proporcji cementu, wapna i piasku 1 : 1 : 6.

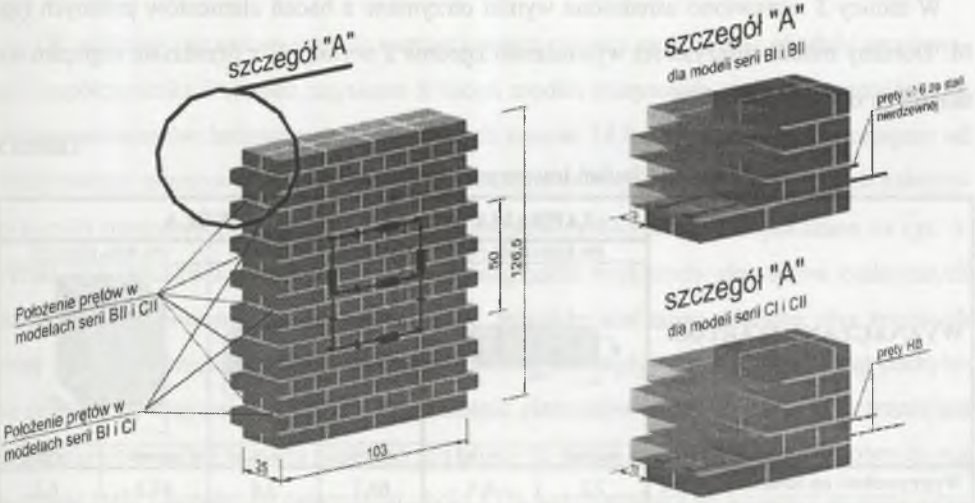
Badania obejmowały serię 8 murów niezbrojonych (rys. 1), oznaczoną symbolem A, oraz 12 modeli ze zbrojeniem w 4 seriach (BI, BII, CI, CII). Jako zbrojenie w seriach BI i BII zastosowano pręty gładkie ϕ 6 mm z nierdzewnej stali 1H18N9T. W serii BI zbrojenie układano co 6 spoinę wsporną ($\rho \approx 0{,}05\%$), zaś w serii BII co 3 spoinę ($\rho \approx 0{,}1\%$). Seria BI liczyła 6 ele-

mentów i ze względu na uzyskanie powtarzających się wyników (niewielki współczynnik zmienności), liczbę próbek w kolejnych seriach zmniejszono do dwóch.



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

Zbrojenie w seriach CI i CII stanowiły specjalne pręty jednego z brytyjskich systemów stosowanych do zbrojenia konstrukcji murowych. Przyjęto pręty spiralne HB o średnicy zastępczej 6 mm, wykonane ze stali austenitycznej. Podobnie jak w modelach serii BI i BII zbrojenie umieszczano w co 6 (seria CI) i co 3 (seria CII) warstwie muru. W celu zapewnienia należytego zakotwienia na końcach wszystkich prętów przyspawano odcinki płaskownika o grubości 6 mm i szerokości 40 mm. Miejsce i sposób ułożenia zbrojenia w elementach serii B i C pokazano na rys. 2.



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

Modele wszystkich serii obciążano doraźnie pionowym obciążeniem równomiernie rozłożonym, w jednym cyklu, aż do zniszczenia. Odczyt siły i przemieszczeń prowadzono co 150 kN za pomocą siłomierza i czujników indukcyjnych (rys. 1 i 2) o dokładności odczytu 0,002 mm. W modelach serii B i C dokonywano ponadto pomiaru odkształceń prętów zbrojeniowych za pomocą tensometrów foliowych naklejanych w środku ich długości.

Równolegle prowadzone badania towarzyszące obejmowały wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie oraz zginanie zaprawy na próbkach prostopadłościennych wg zaleceń normy PN-85/B-04500 [5] oraz oznaczenie wytrzymałości na ściskanie cegły na całych elementach murowych wg normy europejskiej PrEN 772-1:1995 [6] i na dwóch zespolonych połówkach cegieł wg normy krajowej PN-70/B-12016 [7]. Wykonano również próby rozciągania stali na podstawie normy PN-91/H-04310 [8]. Zgodnie z zaleceniami normy PN/B-03002:1999 [9] wykonano dodatkowo oznaczenie wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości muru na 6 elementach próbnych typu M o wymiarach 66,5 × 51 × 12 cm.

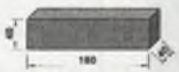
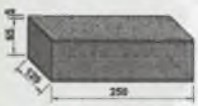
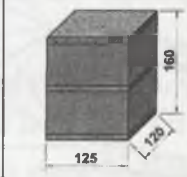
3. Wyniki badań towarzyszących

Wartości wytrzymałości na ściskanie i zginanie zaprawy oraz wytrzymałości na ściskanie cegły zestawiono w tablicy 1. W tablicy 2 podano natomiast wartości siły zrywającej, wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności i modułu sprężystości uzyskane z próby rozciągania prętów gładkich i spiralnych.

W tablicy 3 zestawiono uśrednione wyniki otrzymane z badań elementów próbnych typu M. Doraźny moduł sprężystości wyznaczono zgodnie z normą [9] z przedziału naprężeń ściskających $\sigma = 0 \div \sigma = 0{,}33$ f.

Tablica 1

Wyniki badań towarzyszących zaprawy i cegły

WYZNACZANA WARTOŚĆ	ZAPRAWA		CEGŁA			
	PN-85/B-04500 [5]		PrEN 772-1:1995 [6]		PN-70/B-12016 [7]	
						
	wartość	v [%]	wartość	v [%]	wartość	v [%]
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	7,2	6,6	69,7	3,8	47,2	6,2
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	2,4	5,5	-	-	-	-

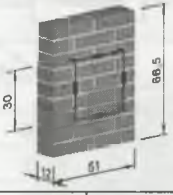
Tablica 2

Wyniki badań towarzyszących stali zbrojeniowej

WYZNACZANA WARTOŚĆ	PRĘTY GŁADKIE PN-91/H-04310 [8]		PRĘTY SPIRALNE PN-91/H-04310 [8]	
	wartość	v [%]	wartość	v [%]
Siła zrywająca [kN]	23,1	0,9	8,4	0,8
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	817	0,9	970	0,8
Granica plastyczności [MPa]	760	0,7	910	0,7
Moduł sprężystości [MPa]	204 000	1,2	-	-

Tablica 3

Wyniki badań muru

WYZNACZANA WARTOŚĆ	ELEMENTY PRÓBNE TYPU M PN-B-03002:1999 [9]	
		
	wartość	v [%]
Wytrzymałość muru na ściskanie [MPa]	15,4	6,9
Moduł sprężystości [MPa]	12 135	9,4
Współczynnik Poissona	0,23	6,8

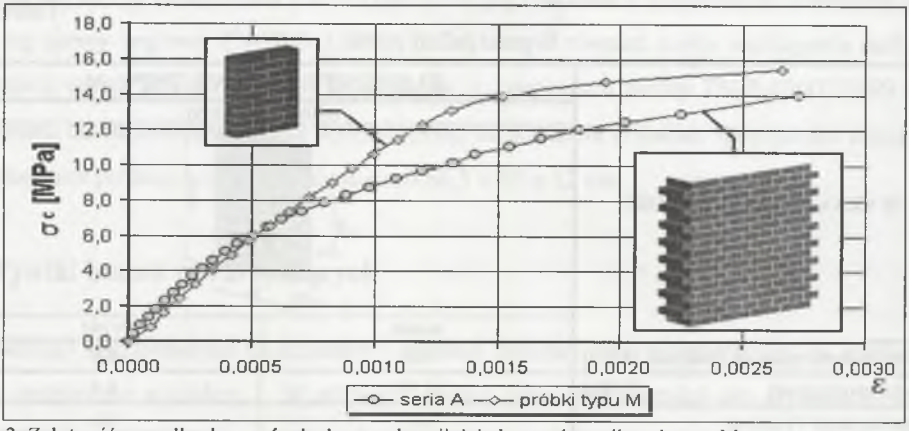
4. Wyniki i analiza badań zasadniczych

W tablicy 4 zestawiono średnie wartości wytrzymałości na ściskanie, modułu sprężystości i współczynnika Poissona uzyskane z badań modeli wszystkich serii. Wytrzymałość na ściskanie elementów badawczych niezbrojonych wynosi 14,0 MPa i jest o 10% mniejsza od wytrzymałości normowych elementów próbnych typu M. Porównanie uśrednionych zależności σ-ε dla modeli niezbrojonych serii A i elementów próbnych typu M pokazano na rys. 3. Wzrost wytrzymałości elementów próbnych względem większych elementów badawczych można zapewne tłumaczyć wpływem kształtu, jednakże analizując przebieg obu krzywych widać znaczne różnice w zachowaniu się obu murów pod wpływem obciążenia. Kąt pochylenia stycznej do krzywej naprężenie-odkształcenie elementów badawczych serii A zmniejsza się stopniowo w miarę wzrostu naprężeń ściskających, natomiast dla elementów próbnych jest on prawie stały i dopiero po osiągnięciu około 85% wytrzymałości na ściskanie styczna ulega gwałtownemu pochyleniu.

Tablica 4

Wyniki badań zasadniczych

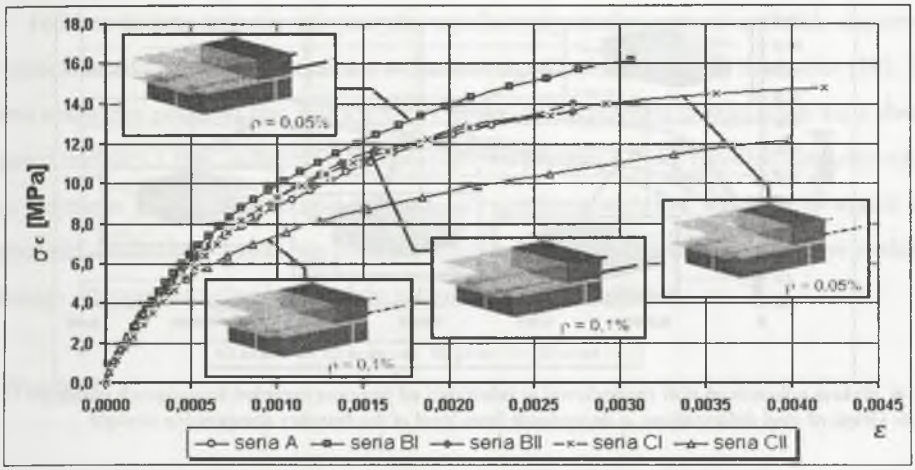
PARAMETR	SERIA A	SERIA BI	SERIA BII	SERIA CI	SERIA CII
Stal	-	okrągła	okrągła	spiralna	spiralna
Procent zbrojenia [%]	-	~0,05	~0,1	~0,05	~0,1
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	14,0	16,2	13,6	14,8	12,2
Współczynnik zmienności [%]	3,6	2,2	-	-	-
Moduł sprężystości [MPa]	13 940	14 440	14 610	12 040	13 330
Współczynnik zmienności [%]	10,0	7,7	-	-	-
Współczynnik Poissona	0,2	0,15	0,26	0,14	0,19
Współczynnik zmienności [%]	9,3	12,5	-	-	-



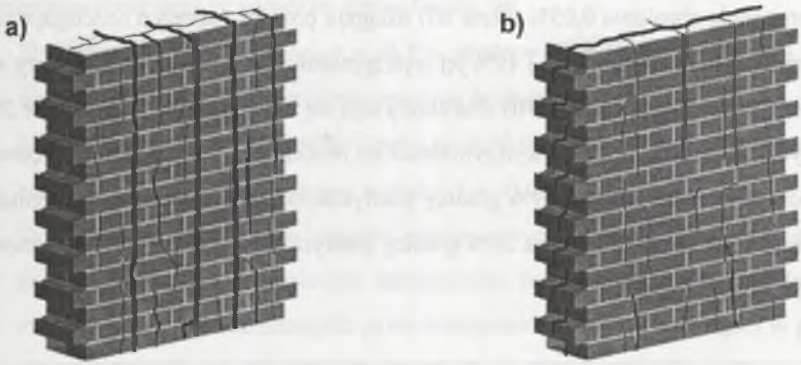
Rys. 3. Zależność σ - ε dla elementów badawczych serii A i elementów próbnych typu M
Fig. 3. σ - ε relationship for A series and models of M type

Porównując zestawione w tablicy 4 wartości wytrzymałości na ściskanie elementów zbrojonych i niezbrojonych należy stwierdzić, że jedynie w wypadku małego procentu zbrojenia (modele BI i CI) uzyskano niewielki wzrost wytrzymałości sięgający 16% i 6%. W wypadku modeli BII i CII (większy procent zbrojenia) odnotowano spadek wytrzymałości muru. Przebieg uśrednionych zależności σ-ε dla modeli wszystkich serii pokazano na rys. 4.

Zmniejszenie wytrzymałości elementów silniej zbrojonych związane jest ze zmianą sposobu ich zniszczenia. Mury niezbrojone niszczyły się bowiem klasycznie, poprzez rysy prostopadłe do spoin wspornych, które podzieliły element na kilka pionowych słupków (rys. 5a). Elementy zbrojone niszczyły się zaś przez zarysowanie podłużne, równoległe do płaszczyzny licowej, które dzieliło badany element na dwie niezależne tarcze (rys. 5b). Zmiana sposobu zniszczenia świadczy o ograniczeniu przez stal zbrojeniową odkształceń muru w kierunku podłużnym. Spadek wytrzymałości elementów silniej zbrojonych związany jest z wystąpieniem efektu karbu w postaci sztywnych prętów w odkształcalnym murze.

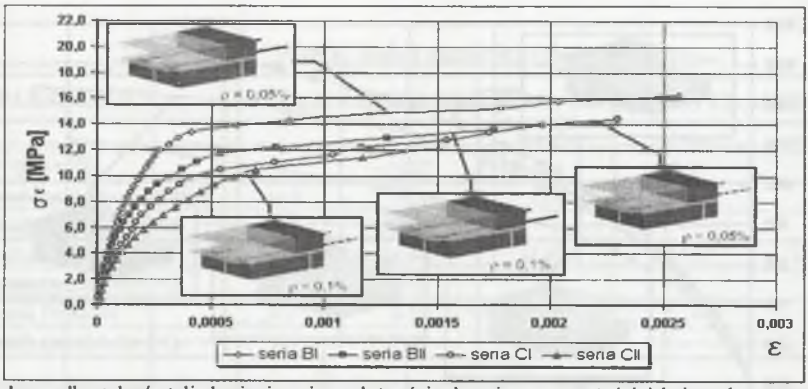


Rys. 4. Uśrednione zależności σ - ε dla elementów badawczych wszystkich serii
Fig. 4. Average σ - ε relationship for models of all series



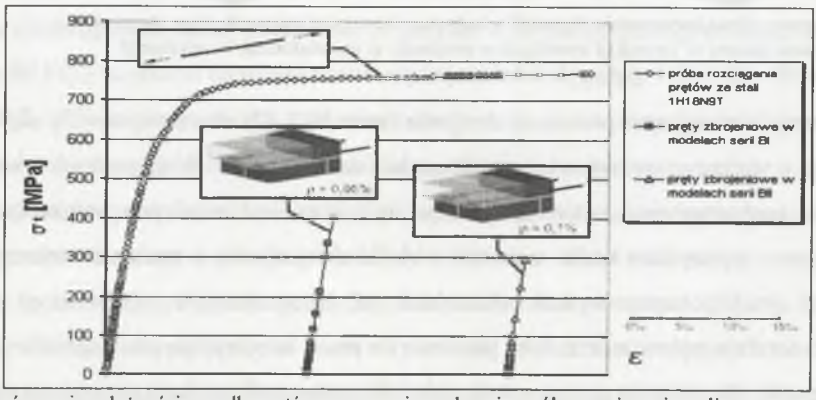
Rys. 5. Typowy obraz zarysowania elementów badawczych: a) niezbrojonych, b) ze zbrojeniem
Fig. 5. Typical picture of scratch of investigative elements: a) un-reinforced, b) reinforced

Elementy o mniejszym procencie zbrojenia (serie BI i CI) charakteryzowały się większą liczbą rys o większych rozwartościach niż modele serii BII i CII. W elementach o większym zbrojeniu zaobserwowano natomiast lokalne wykruszenia w okolicach położenia prętów, świadczące o wystąpieniu karbu w postaci wkładki zbrojeniowej o znacznie większej sztywności. Na rys. 6 pokazano wykres odkształceń stali zbrojeniowej w zależności od poziomu naprężeń ściskających w murze. Jako pierwsze do pracy włączają się pręty spiralne (większa przyczepność zbrojenia do zaprawy w spoinie). Wcześniej odkształcają się pręty w murach o większym procencie zbrojenia (ρ = 0,1%).



Rys. 6. Wykres odkształceń stali zbrojeniowej w zależności od poziomu naprężeń ściskających w murze
Fig. 6. Graph of steel deformations in dependence from level of the masonry compressive strength

Porównanie wytężenia rozciąganych prętów zbrojeniowych znajdujących się w murze z zależnością σ_t-ε uzyskaną z próby rozciągania pręta okrągłego pokazano na rys. 7. Pręty w murze o procencie zbrojenia 0,05% (seria BI) osiągają poziom naprężeń rozciągających równy 53% granicy plastyczności stali i 49% jej wytrzymałości na rozciąganie, zaś pręty w murze o procencie zbrojenia 0,1% (seria BII) charakteryzują się naprężeniami na poziomie 39% granicy plastyczności stali i 36% jej wytrzymałości na rozciąganie. W przypadku prętów spiralnych poziom wytężenia wynosi 49% granicy plastyczności stali i 44% jej wytrzymałości na rozciąganie dla modeli serii CI oraz 30% granicy plastyczności stali i 26% jej wytrzymałości na rozciąganie dla modeli serii CII.



Rys. 7. Porównanie zależności σ_t-ε dla prętów w murze i uzyskanej z próby rozciągania stali
Fig. 7. Comparison of σ_t-ε dependence for rods located in masonry with σ_t-ε obtained from rod tensile tests

Podobne do przedstawionych powyżej 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 ze zbrojeniem składającym się z dwóch prętów o średnicy 5 mm, połączonych poprzecznymi prętami $\phi 3$ mm (procent zbrojenia około 3%). Jedynie w jednej z trzech serii badawczych uzyskano wyraźny, około 20% wzrost wytrzymałości. Dodatkowo badaniom poddano modele ze zbrojeniem w postaci prętów z włókna szklanego. Zbrojenie to również nie dało zadowalających rezultatów.

5. Wnioski

Prezentowane badania pozwoliły jedynie sondażowo określić wpływ zbrojenia podłużnego, układanego w spoinach wspornych, na nośność i odkształcalność muru. Na podstawie przedstawionej analizy wyników stwierdza się, że:

- Zbrojenie podłużne w ilości $\rho = \sim 0{,}1\%$, ułożone w spoinach wspornych spowodowało zmniejszenie wytrzymałości muru na ściskanie.
- Niewielki wzrost wytrzymałości muru na ściskanie uzyskano w elementach badawczych ze zbrojeniem podłużnym w ilości $\rho = \sim 0{,}05\%$.
- Zastosowanie podłużnych prętów zbrojeniowych wpłynęło na zmianę sposobu zniszczenia modeli: ograniczyło zarysowanie licowych płaszczyzn badanych elementów, a zniszczenie nastąpiło przez rozłupanie muru na dwie części w płaszczyźnie przechodzącej przez spoinę podłużną.
- Naprężenia rozciągające w prętach zbrojeniowych murów o mniejszym procencie zbrojenia osiągnęło poziom równy około 50% granicy plastyczności stali.
- Ze względu na zmianę sposobu niszczenia muru ewentualne stosowanie zbrojenia podłużnego o dużym procencie nasycenia powinno być uzależnione od równoczesnego zastosowania prętów poprzecznych.

LITERATURA

1. Timperman P., Rice J. A.: Bed joint reinforcement in masonry. Proceedings of the Fourth International Masonry Conference, London, October 1995, vol. 2, s. 451 ÷ 453.
2. Adamski W.: Mury zbrojone. Inżynieria i Budownictwo, nr 3, 1949, s. 111 ÷ 118.

3. Danielecki W.: Konstrukcje zespolone murowe zbrojone i ceglano-żelbetowe, BiA, Warszawa 1954.
4. Żenczykowski W.: Rozprawy inżynierskie XIV. Podstawy wytrzymałościowe obliczeń statycznych konstrukcji murowanych z cegły. PWN, Warszawa 1954.
5. PN-85/B-04500, Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych.
6. PrEN 772-1:1995, Methods of test for masonry units – part 1: Determination of compersive strength. CEN/TC125 N 305, July 1995.
7. PN-70/B-12016, Wyroby ceramiki budowlanej. Badania techniczne.
8. PN-91/H-04310, Próba statyczna rozciągania metali.
9. PN-B-03002:1999, Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie.
10. Flohrer C., Hilsdorf H.K.: Enhanced ductility of masonry loaded in compression. Proceedings of 6th International Brick/Block Masonry Conference, Rome, 1982, s. 1129-1141.

Recenzent: Prof. dr inż. Bohdan Lewicki

Abstract

Researches of compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio of masonry with oblong bed joint reinforcement are presented in this paper. Test samples were made from clay bricks and cement-lime mortar. As reinforcement two smooth and two helical rods of 6 mm in diameter and made of stainless steel were used. They were put in every 3 and 6 bed joint (percentage of reinforcement about 0,1% and 0,05%). Elements were tested in hydraulic press. Additionally strain gauge measurement of reinforced bars deformations were made. All samples were loaded continuously until their complete destruction. The results of investigations were compared with the results of un-reinforced samples.

It was proved that small bed joint reinforcement (0,05%) increase the value of masonry compressive stress. Samples with bigger percentage of reinforcement (0,1%) had less value of the compressive stress. Moreover, the reinforcement was changing the manner of failure of the test samples.

Appointed level of tensile stress in reinforced bars (samples with smooth bars - 0,05% percentage of reinforcement) is about 50% of yield point of steel.