

Radosław JASIŃSKI\*

Politechnika Śląska

## BADANIA WPLYWU ZBROJENIA UMIESZCZANEGO W SPOINACH WSPORNYCH NA NOŚNOŚĆ I ODKSZTAŁCALNOŚĆ MURÓW CEGLANYCH ŚCINANYCH POZIOMO

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono wyniki badań na ścinanie poziome dwóch serii murów: zbrojonych stalowymi gładkimi prętami umieszczonymi w spoinach wspornych. Pręty stalowe (po 2) umieszczano w co 6 (seria HC-ZPI) i w co 3 (seria HC-ZPII) spoinie wspornej uzyskując stopień zbrojenia odpowiednio  $\rho=0,05\%$  i  $\rho=0,08\%$ . Ścinanie poziome przeprowadzono przy różnych poziomach wstępnych naprężeń ściskających w przedziale  $0\div 1,5$  MPa. Przeanalizowano wpływ zastosowanego zbrojenia na mechanizm zniszczenia, poziom naprężeń rysujących i niszczących oraz odkształcalność murów zbrojonych. Wyniki badań obu serii porównano z rezultatami badań murów niezbrojonych serii HC („świadców”) wykonanych z tych samych materiałów i badanych w tych samych warunkach.

## RESEARCH ON INFLUENCE OF BED JOINTS REINFORCEMENT ON STRENGTH AND DEFORMABILITY OF CLAY BRICK MASONRY SHEARED HORIZONTALLY

**Summary.** Results of investigations on horizontal shearing of two series reinforced tests' specimens are presented in this paper. Steel bars (two bars per bed joint) were placed in every sixth (HC-ZPI series) and in three (series HC-ZPII) bed joint got reinforced ratio suitably  $\rho=0,05\%$  and  $\rho=0,08\%$ . Main investigations were made for different level of initial compressive stress in the range of  $0\div 1,5$  MPa. The influence of applied reinforcement on failure mechanism, level of cracking and maximal shear stress and deformability-reinforced masonry was analysed. Results of both reinforced models series was compared results of unreinforced models HC series („witness”) made from this same materials and researched in similar conditions.

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

## 1. Wprowadzenie

Zagadnienia nośności i odkształcalności niezbrojonych konstrukcji murowych poddanych ścinaniu w kierunku równoległym do spoin wspornych są dość dobrze rozeznane pod względem doświadczalnym, a także teoretycznym. W niektórych pracach, np. [2, 4] rozpatrywano szczegółowo mechanizm zniszczenia, odkształcalność oraz wytrzymałość muru ścinanego poziomo.

Znacznie mniej udokumentowane są prace teoretyczne i badawcze dotyczące zbrojonych murów ścinanych poziomo, a występujące tam zjawiska są znacznie bardziej złożone niż w przypadku murów niezbrojonych. Badania murów zbrojonych [1, 5] dotyczyły głównie murów wykonanych z drążonych elementów murowych, w których zastosowano mieszane (pionowe i poziome) zbrojenie w postaci prętów. Brak badań krajowych opisujących mechanizm zniszczenia, wytrzymałość na ścinanie oraz odkształcalność zbrojonych konstrukcji murowych ścinanych poziomo skłonił autora do prowadzenia prac w tym właśnie zakresie.

Zasadniczym celem wykonanych badań była próba jakościowego porównania wpływu zastosowanego zbrojenia na niektóre istotne parametry mechaniczne muru, takie jak mechanizm zniszczenia, wytrzymałość na ścinanie, moduł odkształcenia postaciowego oraz kąta odkształcenia postaciowego w momencie zarysowania.

## 2. Modele badawcze i opis badań

Badania zasadnicze obejmowały dwie serie modeli zbrojonych i jedną serię modeli niezbrojonych o wymiarach  $1,68 \times 1,42 \times 0,25$  m. Każda seria składała się z  $4 \times 2$  elementów badawczych. Wszystkie modele wykonano z cegły pełnej (klasy 15) na zaprawie cementowo : wapiennej (klasy M5) 1:1:6 (cement : wapno : piasek). Modele oznaczone jako HC - ZPI (por. rys.1) posiadały zbrojenie w postaci gładkich prętów umieszczonych w co 6 poziomej spoinie wspornej, natomiast w modelach serii HC – ZPII zbrojenie w postaci prętów umieszczono w co 3 spoinie. Do zbrojenia modeli użyto prętów gładkich  $\phi$  6mm wykonanych ze stali nierdzewnej znaku 1H18N95T-1.4541. W przypadku modeli serii HC-ZPI pręty umieszczano (po 2) w co 6 spoinie wspornej co 450 mm (w trzech warstwach -  $\rho=0,05\%$ ), w

modelach serii HC-ZPII pręty umieszczono w co 3 spoinie (w pięciu warstwach -  $\rho=0,08\%$ ). Układ prętów zbrojeniowych przedstawiono na rys. 1.

Celem pomiaru odkształceń stali zbrojeniowej na prętach w środkowej warstwie umieszczonych w połowie wysokości modelu naklejono tensometry foliowe w układzie przedstawionym na rys. 1. Aby zabezpieczyć pręty przed poślizgiem, w zaprawie spoin zastosowano specjalny układ kotwiący składający się z obustronnie przyspawanych płaskowników stalowych do końców wszystkich prętów. Aby porównać wpływ zastosowanego zbrojenia na analizowane parametry muru, wykonano również serię modeli oznaczoną jako HC o tych samych wymiarach, lecz nie posiadających zbrojenia.

W ramach badań towarzyszących zbadano 6 modeli oznaczonych jako „A” będących standardowymi elementami do określania podstawowych parametrów muru (wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości) wg zaleceń norm PN-EN 1052-1:2000 i PN-B-03002:1999. Rezultaty badań towarzyszących zaprawy (wg PN-85/B-04500), cegły (wg EN 772-1:1995), stali zbrojeniowej (wg PN – EN 10002-1+AC1) i muru przedstawiono w tablicy 1.

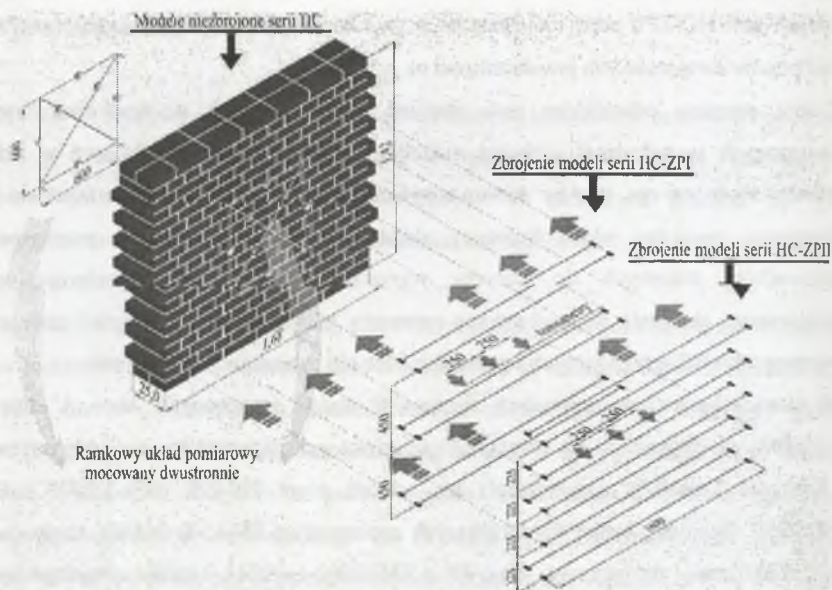
Wyniki badań towarzyszących

Tablica 1

Material	$f_{mv}$ [MPa]	Współczynnik zmienności		$E_{cm}^{test}$ [MPa]
Cegła	27,5	8,2		-
Zaprawa	6,42	14,66		-
Modele „A”	8,99	20,7		3128
Stal	$f_t$ [MPa]	$f_y$ [MPa]	$\epsilon_y$	$E_s$ [MPa]
	809,50	720,40	$33,00 \times 10^{-4}$	204000

Badania zasadnicze przeprowadzono w specjalnie do tego celu wykonanym stanowisku badawczym, które szczegółowo opisano w pracy [3], pozwalającym na jednoczesną realizację obciążeń poziomych i pionowych.

Badania wykonywane były w jednym cyklu aż do zniszczenia, stopniując siłę poziomą co 10 kN w 5-minutowych przedziałach czasowych. W trakcie badań dokonywano pomiaru przemieszczeń czujnikami indukcyjnymi umieszczonymi w specjalnym układzie ramkowym o bazie pomiarowej 600 mm (por. rys. 1) przymocowanym po obu stronach modelu oraz tensometrycznego pomiaru odkształceń prętów zbrojeniowych. Program badań wszystkich serii modeli obejmował przeprowadzenie ścinania przy różnych poziomach naprężeń ściskających ( $\sigma_c$ ) wynoszących 0; 0,5; 1,0; 1,5 MPa.



Rys. 1. Modele badawcze HC, HC-ZPI ( $\rho=0,05\%$ ) i HC-ZPII ( $\rho=0,08\%$ ) – rozmieszczenie zbrojenia  
 Fig. 1. Test specimens: HC, HC-ZPI and HC-ZPII series – place of reinforcement

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Mechanizm zniszczenia

Podobnie jak w przypadku murów niezbrojonych, opisanych w [2, 3], mechanizm zniszczenia uzależniony był od poziomu wstępnych naprężeń ściskających. Zdecydowanie najprostszym mechanizmem charakteryzowały się modele serii HC - ZPI-00 i HC - ZPII - 00 ( $\sigma_c = 0$  MPa) objawiającym się utratą przyczepności pomiędzy zaprawą a cegłą i wydzieleniem się dwóch niezarysowanych brył muru. Wraz ze wzrostem poziomu wstępnych naprężeń ściskających charakter zniszczenia ulegał znacznej zmianie. Rysy przebiegały ukośnie nie tylko przez warstwy zaprawy, ale również przez elementy murowe zgodnie z kierunkami głównych naprężeń rozciągających. Taki układ zarysowań zaobserwowano również dla poziomu wstępnych naprężeń ściskających - 0,5 MPa. Przy większych wartościach naprężeń ściskających, rzędu 1,0 i 1,5 MPa, obserwowano co najmniej kilka rys, szczególnie w obszarze środkowym muru. W przypadku murów zbrojonych serii HC - ZPI-15 ( $\sigma_c = 1,5$  MPa) rysy ukośnie biegły równolegle do siebie, zachowując stały dystans wzdłuż

całej przekątnej modelu badawczego, podobne rezultaty uzyskano w badaniach [1, 5]. Odmienne obrazy zarysowań zaobserwowano w analogicznych modelach serii HC – ZPII – 15 ( $\sigma_c = 1,5 \text{ MPa}$ ), rysy ukośne nie biegnęły do siebie równoległe, ale występowały w znacznym zagęszczeniu wzdłuż przekątnej. W momencie zniszczenia występowało dość silne zarysowanie, a nawet zmiążdżenie muru w miejscach lokalnych docisków. Obrazy zarysowania w stadium zniszczenia modeli badawczych serii HC - ZPI i HC - ZPII dla wybranych poziomów wstępnych naprężeń ściskających przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Zestawienie obrazów zarysowań

$\sigma_c$ [MPa]	HC – ZPI	HC – ZPII
0		
1,5		

$P_v$  – pionowe reakcje wywołane obciążeniem poziomym ( $\tau$ ) utrzymujące model w równowadze

### 3.2. Naprężenia rysujące i niszczące

Wpływ zastosowanego zbrojenia w sposób znaczący podniósł poziom naprężeń  $\tau_{cr,obs}$ , przy których obserwowano rysy o rozwartości 0,1 mm. Naprężenia rysujące  $\tau_{cr,obs}$  murów ze zbrojeniem w trzech spoinach ( $\rho=0,05\%$ ) były o ok. 10% większe w stosunku do analogicznych modeli serii niezbrojonych (HC) (por. rys. 2a). Taką tendencję zaobserwowano w całym przedziale naprężeń ściskających. Podobną zależność prezentują mury zbrojone w sześciu spoinach serii HC-ZPII, chociaż liczba modeli była niewielka. Na rysunku 2a przedstawiono uzyskane rezultaty badań w postaci zależności  $\tau_{cr,obs} - \sigma_c$ . Uzyskane relacje były nieliniowe zarówno dla murów niezbrojonych, jak i zbrojonych.

Zastosowane zbrojenie wpłynęło również na wartość naprężeń niszczących  $\tau_{u,obs}$ . Dało się to zauważyć szczególnie w przypadku modeli serii HC-ZPI, wzrost wartości  $\tau_{u,obs}$  (ok.30%) był wyraźny dla naprężeń ściskających 0,0÷1,0 MPa, a w przypadku murów maksymalnie ściskanych ( $\sigma_c = 1,5$  MPa) odpowiednio ok. 10% (por. rys. 2b). Podobną zależność stwierdzono w przypadku modeli HC – ZPII. Wzrost wartości  $\tau_{u,obs}$  był istotny w tym samym przedziale naprężeń ściskających, a niższe wartości  $\tau_{u,obs}$  uzyskano w przypadku modeli maksymalnie ściskanych ( $\sigma_c = 1,5$  MPa). Na rysunku 2b zilustrowano wyniki badań w funkcji poziomu wstępnych naprężeń ściskających  $\sigma_c$ . W stadium zniszczenia zależność  $\tau_{u,obs} - \sigma_c$  była zbliżona do liniowej dla murów niezbrojonych i nieliniowa dla zbrojonych obu serii. Uzyskane rezultaty badań w postaci naprężeń stycznych przy zarysowaniu  $\tau_{cr,obs}$  i zniszczeniu  $\tau_{u,obs}$  przedstawiono w tabelicy 3.

W tabelicy 3 przedstawiono zależności  $\tau_{cr,obs} / \tau_{u,obs}$  będące zdolnością muru do przyjmowania obciążeń po zarysowaniu aż do momentu zniszczenia. Wpływ zastosowanego zbrojenia w modelach serii HC-ZPI powodował wzrost nośności muru po zarysowaniu. Wzrost ten zmienił się od ok. 25% w przypadku murów tylko ścinanych do ok. 30%, kiedy  $\sigma_c = 1,5$  MPa. W murach zbrojonych w co trzeciej spoinie serii HC-ZPII wzrost nośności po zarysowaniu wahał się w granicach od ok. 10% do 30%. W przypadku murów niezbrojonych wzrost ten zmienił się odpowiednio w granicach od ok. 10% do ok. 30%.

Z przedstawionych zależności wynika, że wpływ zastosowanego zbrojenia miał najmniejszy wpływ przy najwyższym poziomie naprężeń ściskających rzędu 1,5 MPa, a największy w przypadku murów wyłącznie ścinanych. (bez dodatkowego udziału naprężeń ściskających  $\sigma_c$ ).

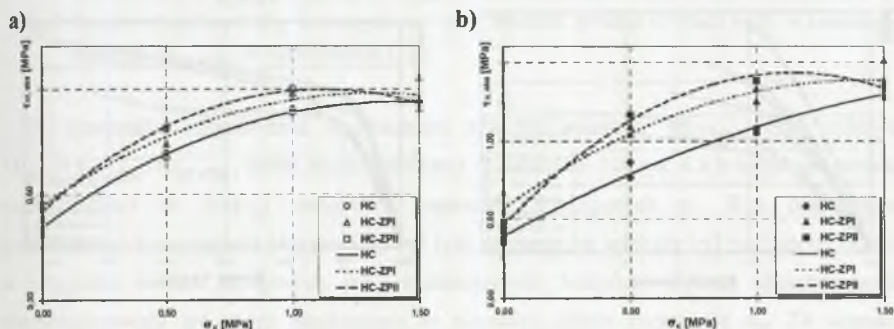
Zestawienie rezultatów badań zasadniczych

Tabela 3

Seria	Model	$\sigma_c$ [MPa]	$\tau_{cr,obs}$ [MPa]	$\Theta_{cr,obs}$ [miliadian]	$G_{obs}$ [MPa]	$\tau_{u,obs}$ [MPa]	$\frac{\tau_{cr,obs}}{\tau_{u,obs}}$
HC (niezbrojone)	HC-00/1	0,0	0,310	0,597	519,350	0,356	0,871
	HC-00/2	0,0	0,383	0,791	484,479	0,429	0,893
	HC-00/3	0,0	0,336	0,818	410,709	0,379	0,887
	HC-05/1	0,5	0,672	0,934	719,130	0,763	0,881
	HC-05/2	0,5	0,696	1,108	628,130	0,861	0,808
	HC-10/1	1,0	0,882	1,060	832,390	1,047	0,842
	HC-10/2	1,0	0,903	1,023	882,917	1,078	0,838
	HC-15/2	1,5	0,935	1,218	767,400	1,327	0,705
	HC-15/3	1,5	0,927	1,304	710,887	1,277	0,726

cd. tablicy 3

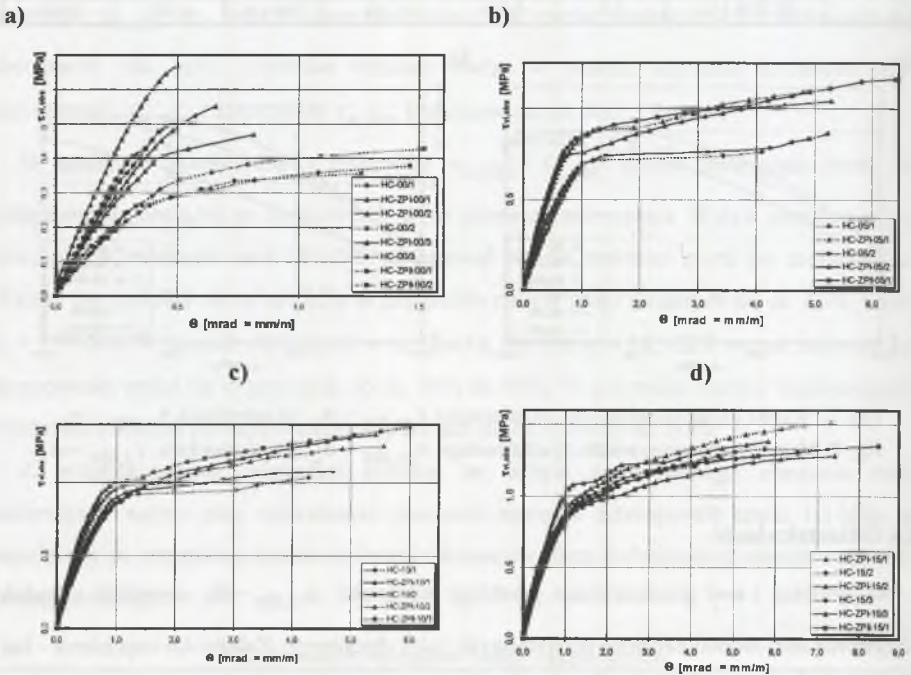
HC-ZPI zbrojone $\rho=0,05\%$	HC-ZPI-00/1	0,0	0,385	0,400	963,700	0,469	0,821
	HC-ZPI-00/2	0,0	0,433	0,408	1061,941	0,551	0,786
	HC-ZPI-00/3	0,0	0,508	0,312	1629,757	0,672	0,756
	HC-ZPI-05/1	0,5	0,813	0,910	893,662	1,090	0,746
	HC-ZPI-05/2	0,5	0,737	0,722	1020,209	1,041	0,708
	HC-ZPI-10/1	1,0	0,906	1,164	778,177	1,331	0,681
	HC-ZPI-10/2	1,0	0,977	1,118	873,611	1,251	0,781
	HC-ZPI-15/1	1,5	0,954	1,158	823,587	1,511	0,631
	HC-ZPI-15/2	1,5	0,905	1,259	719,081	1,280	0,707
HC-ZPI-15/3	1,5	1,052	1,091	964,648	1,379	0,763	
HC-ZPII zbrojone $\rho=0,08\%$	HC-ZPI-00/1	0,0	0,384	0,289	1327,29	0,430	0,893
	HC-ZPI-00/2	0,0	0,453	0,394	1149,207	0,480	0,943
	HC-ZPI-05/1	0,5	0,810	0,823	984,731	1,163	0,696
	HC-ZPI-10/1	1,0	0,999	0,985	1014,296	1,38	0,724
	HC-ZPI-15/1	1,5	0,929	1,326	700,408	1,349	0,689

Rys. 2. Wyniki badań zasadniczych: a) zależności  $\tau_{cr,obs} - \sigma_c$ , b) zależności  $\tau_{u,obs} - \sigma_c$ Fig. 2. Main investigations results a) relationships  $\tau_{cr,obs} - \sigma_c$ , b) relationships  $\tau_{u,obs} - \sigma_c$ 

### 3.3. Odształcalność

Na rysunku 3 a-d przedstawiono przebiegi zależności  $\tau_{vi,obs} - \Theta_i$  uzyskane z badań wszystkich serii modeli zarówno niezbrojonych, jak i zbrojonych. Zależności naprężenie - kąt odkształcenia postaciowego były niemalże liniowe do momentu zarysowania. Po zarysowaniu obserwowano znaczną różnicę w zachowaniu się modeli zbrojonych w stosunku do murów niezbrojonych. W niezbrojonych murach po zarysowaniu następował „poślizg” (pozioma linia na wykresach), a następnie wzmocnienie i zniszczenie. Charakterystyczne było, że długość „linii” była, jak się wydaje, odwrotnie proporcjonalna do poziomemu wstępnym naprężen ściskających. W przypadku modeli zbrojonych serii HC-ZPI i HC-ZPII po zarysowaniu następował znaczny wzrost wartości kąta odkształcenia postaciowego ( $\Theta_i$ ) w funkcji poziomu naprężeń stycznych ( $\tau_{vi,obs}$ ). Nie zaobserwowano w tym przypadku zjawiska

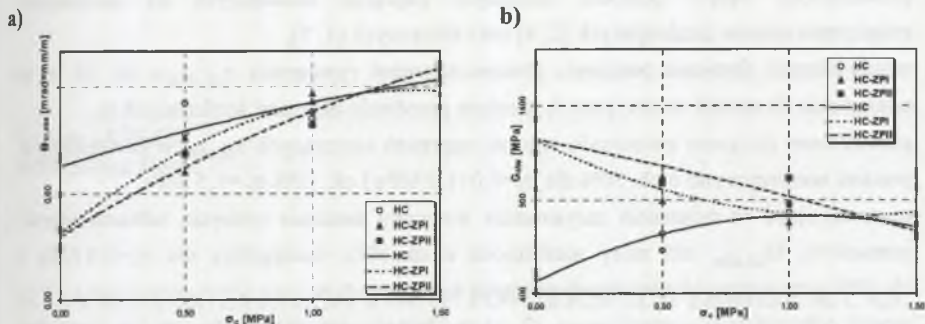
charakterystycznego dla modeli niezbrojonych, czyli wzrostu odkształceń postaciowych przy stałych naprężeniach stycznych w momencie zarysowania. Zależność zmieniła charakter z niemalże wprost proporcjonalnej na nieliniową. Aż do momentu zniszczenia modele ze zbrojeniem serii HC-ZPI charakteryzowały się znacznie większą odkształcalnością niż niezbrojone, ale tylko w przypadku murów jednocześnie ściskanych i ścinanych. Wyraźne odmienności w przebiegu ( $\tau_{vi,obs} - \Theta_i$ ) zaobserwowano w przypadku modeli tylko ścinanych (por. rys. 3a). Największą odkształcalność w tym przypadku reprezentują mury serii HC (niezbrojone).



Rys. 3. Zależność  $\tau_{vi,obs}-\Theta$ , wszystkich serii modeli badawczych a)  $\sigma_c=0,0$  MPa, b)  $\sigma_c=0,5$  MPa, c)  $\sigma_c=1,0$  MPa, d)  $\sigma_c=1,5$  MPa

Fig. 3. Relationships of  $\tau_{vi,obs}-\Theta$ , for all series of test specimens a)  $\sigma_c=0,0$  MPa, b)  $\sigma_c=0,5$  MPa, c)  $\sigma_c=1,0$  MPa, d)  $\sigma_c=1,5$  MPa





Rys.4. Wyniki badań odkształcalności : a) wartości kąta odkształcenia postaciowego w momencie zarysowania  $\Theta_{cr,obs}$ , b) zależności  $G_{obs}$

Fig.4. Results of deformability investigations - in  $\sigma_c$  function a) value of strain angle in cracking moment  $\Theta_{cr,obs}$ , b) relationships  $G_{obs}$

W momencie zarysowania wyznaczono również wartości  $\Theta_{cr,obs}$  oraz zależność  $G_{obs} = \tau_{cr,obs} / \Theta_{cr,obs}$ , które zaprezentowano w tabelicy 3. Na rys. 4 a,b uzyskane rezultaty przedstawiono w funkcji wstępnych naprężeń ściskających -  $\sigma_c$ . Kąt odkształcenia postaciowego w momencie zarysowania był tym większy, im większy był poziom  $\sigma_c$  zarówno w przypadku murów zbrojonych, jak i niezbrojonych. Jednakże większą odkształcalnością charakteryzowały się mury niezbrojone w niemalże całym przedziale  $\sigma_c$ . Ze wzrostem poziomu  $\sigma_c$  do wartości maksymalnej ( $\sigma_c = 1,5$  MPa) odkształcalność modeli wszystkich serii była zbliżona (rys. 4a). Zależność  $G_{obs}$  w przypadku murów niezbrojonych rosła ze wzrostem naprężeń ściskających (rys. 4b), podobną zależność uzyskano w badaniach [5]. Zupełnie odmienną relację prezentowały mury zbrojone serii HC - ZPI i HC - ZPII, w przypadku których moduł odkształcenia postaciowego ( $G_{obs}$ ) maleł ze wzrostem poziomu  $\sigma_c$ . Przy maksymalnych wartościach naprężeń ściskających  $\sigma_c = 1,5$  MPa wartości  $G_{obs}$  murów zbrojonych i niezbrojonych były zbliżone.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Analizując uzyskane rezultaty badań murów niezbrojonych i zbrojonych, nie można wyciągać daleko idących wniosków, szczególnie w przypadku wstępnych badań murów serii HC - ZPII, gdyż liczba modeli była niewielka. Można jednakże dokonać oceny rezultatów badań modeli serii HC (niezbrojonych) i HC-ZPI (zbrojonych w co 6 spoinie wspornej). Po analizie przedstawionych rezultatów badań nasuwają się następujące wnioski:

- potwierdzono wpływ poziomu wstępnych naprężeń ściskających na mechanizm zniszczenia murów niezbrojonych [2, 4] oraz zbrojonych [1, 5],
- wprowadzenie zbrojenia podniosło poziom naprężeń rysujących  $\tau_{cr,obs}$  o ok. 10 % w odniesieniu do modeli niezbrojonych w całym przedziale naprężeń ściskających  $\sigma_c$ ,
- zastosowane zbrojenie zwiększyło wartość naprężeń niszczących  $\tau_{u,obs}$  w porównaniu z murami niezbrojonymi o ok. 30% dla  $\sigma_c=0,0\pm 1,0$  MPa i ok. 10%  $\sigma_c=1,5$  MPa,
- mury zbrojone w momencie zarysowania wykazały znacznie mniejszą odkształcalność postaciową  $\Theta_{cr,obs}$  niż mury niezbrojone o ok. 50%, szczególnie dla  $\sigma_c=0,0$  MPa i ok. 10% przy wyższych poziomach naprężeń ściskających  $\sigma_c$ ,
- moduł odkształcenia postaciowego  $G_{obs}$  murów zbrojonych malał wraz ze wzrostem naprężeń ściskających, odmienną zależnością charakteryzowały się natomiast mury niezbrojone, w przypadku których zaobserwowano tendencję wzrostową.

## LITERATURA

1. Brunner J.D., Shing P. B.: Shear strength of reinforced masonry walls. The Masonry Society Journal. Vol. 14, No 1, August 1996 str. 65-77.
2. Dialer Ch., Some remarks on the strength and deformation behaviour on shear stressed masonry panels under static monotonic loading. Proc. of 9<sup>th</sup> International Brick/Block Masonry Conference Berlin 1991. Vol. 1 str. 276-283.
3. Jasiński R.: Badania murów ceglanych ścinanych poziomo zbrojonych stalowymi gładkimi prętami. II Konf. Naukowa Doktorantów Wydż. Budownictwa - Wiśła 11. 2001 r., str. 155-164.
4. Müller H.: Untersuchungen zum Tragverhalten von querkraftbeanspruchtem Mauerwerk. Dissertation. Technischen Hochschule Darmstadt 1974.
5. Shing P. B., Schuller M., Hoskere V. S., Carter E.: Flexural and shear response of reinforced masonry walls. ACI Journal, vol. 87 No. 6 Nov. – Dec. 1990 str. 646-656.

Recenzent: Prof. dr inż. Bohdan Lewicki

## Abstract

The influence of bed joint reinforcement on behaviour and main mechanical properties of horizontally sheared masonry was analysed. Among others, the influence of such reinforcement on increasing of cracking  $\tau_{cr}^{test}$  and ultimate  $\tau_u^{test}$  stress was confirmed. The reinforcement masonry specimens were characterised by more significant deformability (represented by  $\Theta_{cr}^{test}$ ) than unreinforced for all compressive stress level  $\sigma_c$ . For  $\sigma_1 - G^{test}$  relationships a quite different tendencies were observed. Shear modulus value growth was corresponding with increasing of  $\sigma_c$  level (except  $\sigma_c = 1,5$  MPa) for unreinforced masonry, but for reinforced specimens the situations was quite inverted. It should be necessary to carry out more tests for reinforced models HC – ZPII series.