

Radostaw JASIŃSKI*
Politechnika Śląska

BADANIA MURÓW CEGLANYCH ŚCINANYCH POZIOMO ZBROJONYCH STAŁOWYMI GŁADKIMI PRĘTAMI

Streszczenie. W referacie przedstawiono wyniki badań na ścianie poziome dwóch serii murów: niezbrojonych oznaczonych jako HC oraz zbrojonych gładkimi prętami stalowymi oznaczonych jako HC - ZPI. Ścianie przeprowadzono przy różnych poziomach wstępnych naprężeń ściskających w przedziale 0+1,5 MPa. Przeanalizowano wpływ zastosowanego zbrojenia na nośność oraz mechanizm zniszczenia muru.

RESEARCH OF HORIZONTALLY SHEARED CLAY BRICK MASONRY WALLS REINFORCED BY STEEL SMOOTH BARS

Summary. Results of investigations horizontal shear of two series test specimens are presents in this paper. Unreinforced models unreinforced marked as HC and reinforced one with smooth steel bars as HC - ZPI. Main investigations made for different level of initial compressive stress in the range of 0+1,5 MPa. The influence of applied reinforcement on load capacity and face of cracking.

1. Wprowadzenie

Zjawisko ścinania poziomego w konstrukcjach murowych występuje powszechnie np. we wszystkich wiatrowych ścianach usztywniających, w dodatku siły poziome działające w płaszczyźnie muru występują zazwyczaj w interakcji z obciążeniem pionowym wywołując złożony stan naprężenia. Techniczne podejście do obliczania tych ścian jest rozeznane i opisane chociażby w przepisach normowych [1] i literaturze [3,4,5,6]. W niniejszym opracowaniu przedstawione zostaną rezultaty i analiza badań murów niezbrojonych oraz zbrojonych poddanych jednoczesnemu ścinaniu ze ściskaniem.

Zasadniczym celem badań była próba określenia wpływu zastosowanego zbrojenia na mechanizm zniszczenia, charakter powstawania rys oraz nośność ścian murowych ścinanych poziomo.

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

2. Modele badawcze i opis badań zasadniczych

Badania zasadnicze obejmowały dwie serie modeli o wymiarach 1,68×1,42×0,25 m po 4 elementy w serii. Gabaryty modeli dobrano tak, aby ograniczyć wpływy zaburzeń brzegowych w obszarze pomiarowym wywołanych obciążeniem czynnym (poziomym wymuszeniem) oraz biernym (pionową parą sił utrzymującą model badawczy w równowadze), a także aby ograniczyć wpływ kształtu, co jak wykazały badania, np. [2], ma wpływ na jakość uzyskiwanych wyników i mechanizm zniszczenia. Modelami badawczymi podobnych gabarytów posługiwali się inni autorzy, jak chociażby [2,6]. Elementy badawcze obu serii z wykonano z cegły pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej 1:1:6 (cement : wapno : piasek). Modele oznaczone jako HC (por. rys.1a) wykonane były bez zbrojenia, natomiast modele HC – ZPI (por. rys.1b) posiadały zbrojenie w postaci gładkich prętów umieszczonych w poziomych spoinach muru. Do zbrojenia modeli użyto pręty szlifowane $\phi 6$ mm wykonane ze stali nierdzewnej znaku 1H18N95T-1.4541. Pręty umieszczano (po 2) w co 6 spoinie wspornej co 450 mm (w trzech warstwach - $\rho=0,05\%$). Układ prętów zbrojeniowych przedstawiono na rys.1b. Celem pomiaru odkształceń stali zbrojeniowej na prętach w środkowej warstwie naklejono tensometry foliowe w układzie przedstawionym na rys 1b. Aby zabezpieczyć pręty przed poślizgiem w zaprawie spoin zastosowano specjalny układ kotwiący (por rys. 2) składający się z obustronnie przyspawanych płaskowników stalowych do końców wszystkich prętów. W ramach badań towarzyszących wykonano także 3 modele oznaczone jako „A” będące standardowymi elementami do określania podstawowych parametrów muru (f_k , E_{cm}) wg zaleceń normy PN-B-03002:1999 [1]. 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 (wg [1]) przedstawiono w tablicy 1.

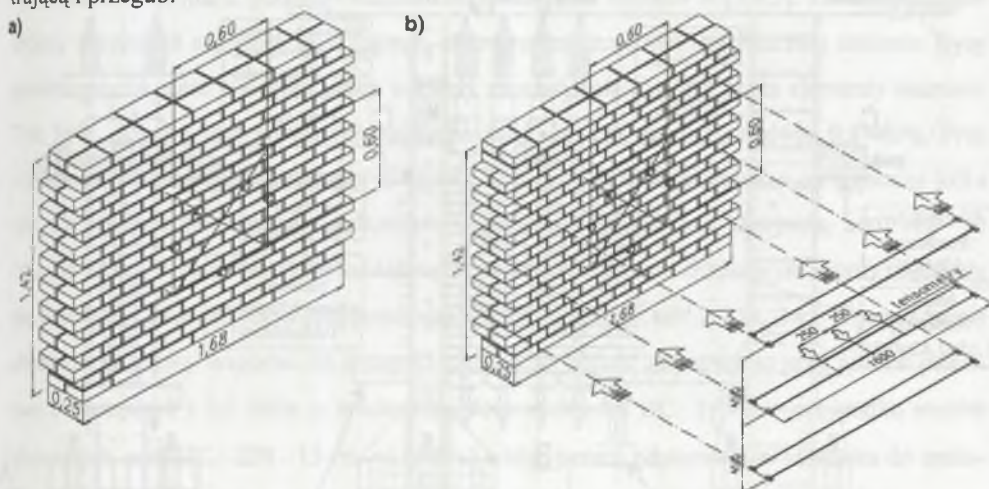
Tablica 1

Wyniki badań towarzyszących

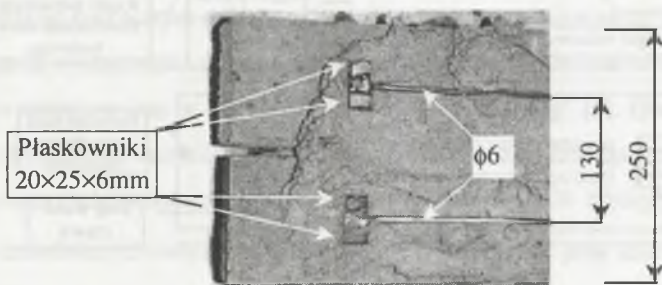
Material	f_k^{test} [N/mm ²]	v_f [%]	E_{cm}^{test} [N/mm ²]
Cegła	27,5	8,2	
Zaprawa*	6,42	14,66	-
Modele „A”*	10,62	-	3251
Stal*	f_t [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	ϵ_y
	809,50	720,40	$33,00 \times 10^{-4}$
			E_s [N/mm ²]
			204000

*-Badania wykonano na trzech elementach próbnych.

Badania zasadnicze przeprowadzono w specjalnie do tego celu wykonanym stanowisku badawczym (por rys.3), pozwalającym na jednoczesną realizację obciążeń poziomych i pionowych. Model badawczy umieszczono pomiędzy dwoma poziomymi stalowymi ryglami, górnym ruchomym i dolnym nieruchomym, na kilkucentymetrowej warstwie betonu. Kształt rygli umożliwił realizację naprężeń ściskających za pomocą specjalnego ciągnowego układu sprężającego. Układ ten zaopatrzony był w komplet sprężyn kompensujących wpływ relaksacji stali rozciąganych cięgien oraz pionowego przemieszczenia rygla górnego. W ryglu tym wykonane było łożysko walcowe, poprzez które na model badawczy przekazywane było obciążenie poziome ze specjalnej stalowej ruchomej ramy, zaopatrzonej w siłomierz o zakresie 1000 kN. Siłę poziomą wywoływano siłownikiem hydraulicznym (przymocowanym do słupa utwierdzonego - por.rys.3 C-C) o zakresie 1000 kN, zaopatrzonym dodatkowo w płytkę centrującą i przegub.

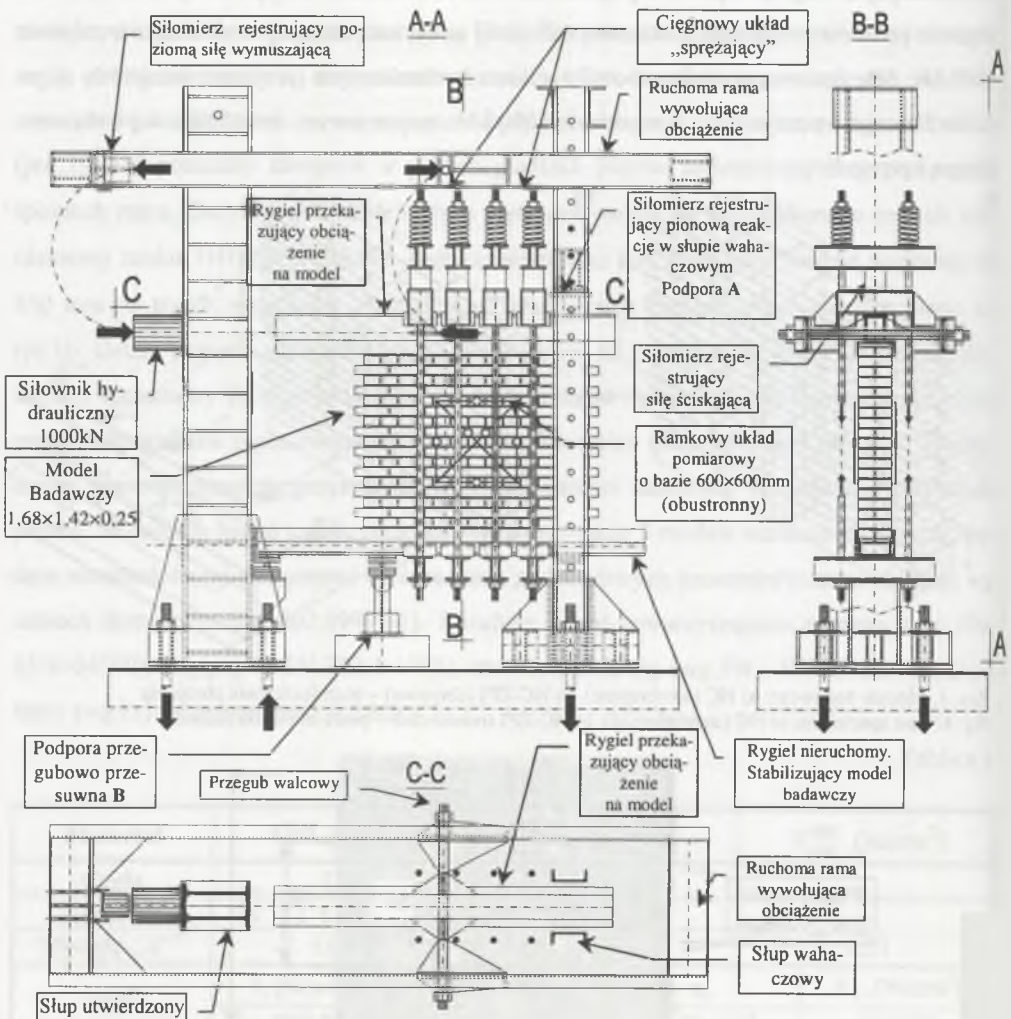


Rys. 1. Modele badawcze: a) HC (niezbrojone), b) HC-ZPI (zbrojone) – rozmieszczenie zbrojenia
 Fig. 1. Test specimens: a) HC (unreinforced), b) HC-ZPI (reinforced) – place of reinforcement



Rys. 2. Zbrojenie modeli serii HC - ZPI:- szczegół zakotwienia
 Fig. 2. Reinforcement of models HC - ZPI series – anchor detail

Siła wymuszająca przekazywana była na stalową ramę (na rys.3 w widoku A-A przesu- nięta do góry), a następnie na ruchomy rygiel górny – monolitycznie połączony z modelem badawczym. Pionowe reakcje, będące efektem oddziaływania poziomego, przekazywane były - jedna poprzez siłomierz w osi słupa wahaczowego (A), a druga symetrycznie w osi podpory (B) (por. rys.3). Taki układ podpór zapewniał również stały docisk rygla do górnej powierzchni modelu. Badania wykonywane były w jednym cyklu aż do zniszczenia, stopniując siłę poziomą co 10 kN w 5-minutowych interwałach czasowych.



Rys. 3. Stanowisko badawcze
Fig. 3. The test stand

W trakcie badań dokonywano pomiaru przemieszczeń czujnikami indukcyjnymi mocowanymi do specjalnego układu ramkowego o bazie pomiarowej 600 mm (rys 1a,b) mocowanego po obu stronach modelu oraz tensometrycznego pomiaru odkształceń prętów zbrojeniowych. Program badań obu serii modeli HC oraz HC – ZPI obejmował wykonanie badań przy różnych poziomach naprężeń ściskających σ_c wynoszących 0; 0,5; 1,0; 1,5 Mpa.

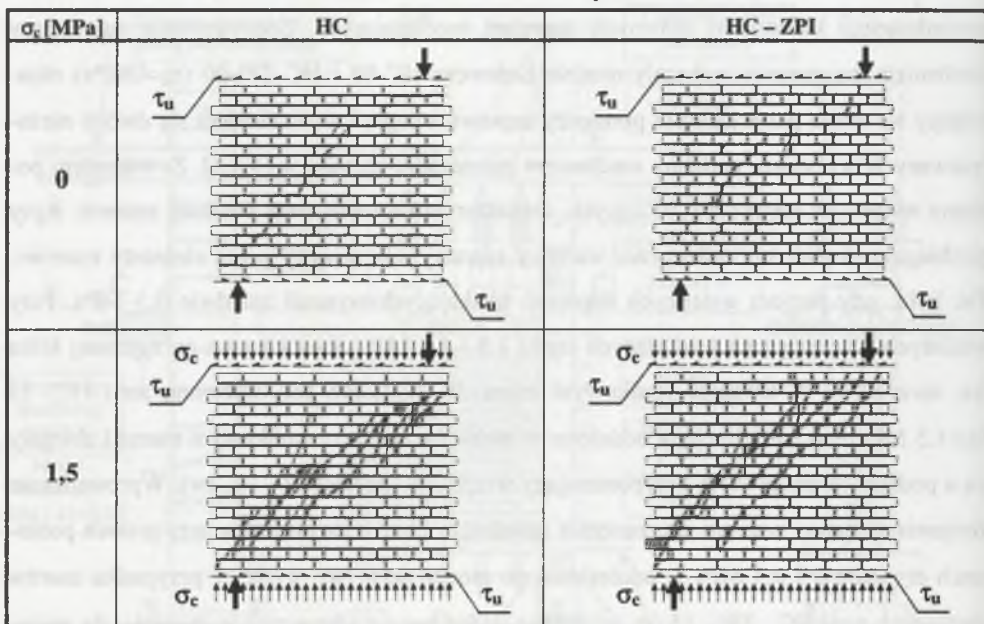
3. Wyniki badań zasadniczych

Generalnie wszystkie modele niszczyły się poprzez powstanie ukośnego zarysowania odpowiadającego kierunkowi głównych naprężeń rozciągających. Zdecydowanie najprostszym mechanizmem zniszczenia wykazały modele badawcze HC-00 i HC-ZPI-00 ($\sigma_c=0\text{MPa}$) objawiający się utratą przyczepności pomiędzy zaprawą a cegłą i wydzieleniem się dwóch niezarysowanych brył muru, podobny mechanizm zniszczenia opisano w [3,4,5]. Ze wzrostem poziomu wstępnych naprężeń ściskających, charakter zniszczenia uległ znacznej zmianie. Rysy przebiegały ukośnie nie tylko przez warstwy zaprawy, ale również przez elementy murowe. Tak było, gdy poziom wstępnych naprężeń ściskających wynosił zaledwie 0,5 MPa. Przy większych naprężeniach ściskających rzędu 1,0 i 1,5 MPa obserwowano co najmniej kilka rys, szczególnie w obszarze środkowym muru. W modelach bez zbrojenia, serii HC - 15 ($\sigma_c=1.5\text{ MPa}$), rysy ukośne były oddalone od siebie (w obszarze środkowym muru) i zbiegały się u podstaw tworząc obrys przypominający wrzeciono (por. tabl.2 - 1k, 2w). Wprowadzenie zbrojenia w spoiny wsporne nie zmieniło zasadniczo obrazu zarysowania przy niskich poziomach σ_c rzędu 0 i 0,5 MPa w odniesieniu do modeli serii HC. Tylko w przypadku murów zbrojonych serii HC - ZPI - 15 ($\sigma_c =1,5\text{MPa}$) widać pewne odstępstwo w stosunku do analogicznych modeli niezbrojonych (HC-15). Ukośne rysy biegły równolegle do siebie zachowując stały dystans przez całą wysokość modelu badawczego i nie łączyły się u góry i dołu modelu wydzielając tym samym „ściskany krzyżulec” („compression strut” wg [6]). W momencie zniszczenia występowało dość silne zarysowanie, a nawet zmiążdżenie muru w miejscach docisku, co określane jest w literaturze mianem „toe crushing” [6]. Obrazy zarysowania w momencie zniszczenia modeli badawczych serii HC i HC - ZPI dla wybranych poziomów wstępnych naprężeń ściskających przedstawiono w tablicy 2. W tablicy 3 zestawiono rezultaty badań zasadniczych: uzyskane średnie naprężenie styczne przy zniszczeniu τ_u^{test} i zarysowaniu $\tau_{\text{cr}}^{\text{test}}$ oraz wartość granicznego kąta odkształcenia postaciowego $\Theta_{\text{cr}}^{\text{test}}$ i modułu Kir-

choffa G_{cr}^{test} dla modeli niezbrojonych i zbrojonych. Z zależności przedstawionych na rys. 4a wynika, jak znaczny wpływ na przebieg zależności $\tau_1 - \Theta_1$ ma poziom wstępnych naprężeń ściskających. Można stwierdzić, że do poziomu naprężeń stycznych τ_{cr}^{test} odpowiadających powstaniu widocznych rys (szerokości ok. 0,1 mm), odkształcenia postaciowe narastają niemalże liniowo. Po zarysowaniu następuje „poślizg” (pozioma półka na wykresach), a następnie wzmocnienie i zniszczenie.

Tablica 2

Zestawienie obrazów zarysowań



Charakterystyczne jest, że długość „półki” jest odwrotnie proporcjonalna do poziomemu wstępnych naprężeń ściskających. Wynika stąd, że wartość granicznego naprężenia stycznego w momencie zniszczenia jest tym większa, im większe jest wywołane wstępne naprężenie ściskające. Pewne odmienności w zależności $\tau_1 - \Theta_1$ przedstawione na rys.4b wykazują modele ze zbrojeniem w spoinach wspornych serii HC - ZPI. Nie zaobserwowano w tym przypadku zjawiska charakterystycznego dla modeli serii HC, czyli wzrostu odkształceń postaciowych przy stałych naprężeniach stycznych po zarysowaniu, ale zależność ta zmieniła charakter z niemalże wprost proporcjonalnej na nieliniową. Jak wykazują badania [6], po zarysowaniu do współpracy włącza się zbrojenie poziome, słuszność tej tezy potwierdza zależność przedstawiona na rys. 5.

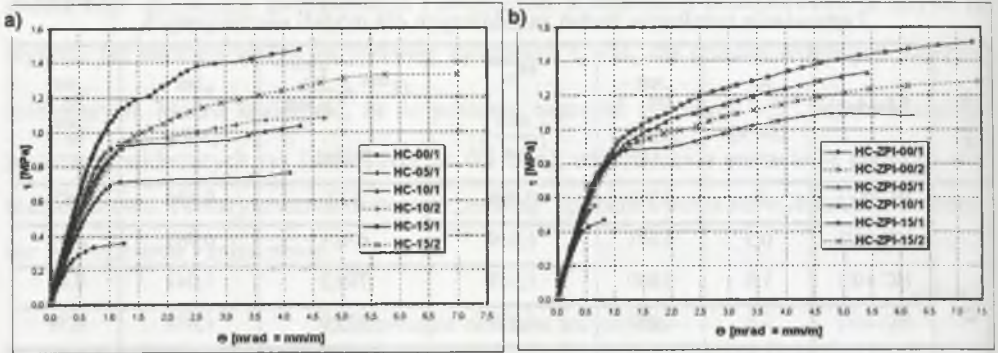
Tablica 3

Zestawienie rezultatów badań zasadniczych dla modeli niezbrojonych

seria	Model	σ_c [MPa]	τ_{cr}^{test} [MPa]	Θ_{cr}^{test} $\left[\frac{mm}{m} \right]$	$G^{test} = \frac{\tau_{cr}^{test}}{\Theta_{cr}^{test}}$ [MPa]	τ_u^{test} [MPa]	$\frac{\tau_{cr}^{test}}{\tau_u^{test}}$
HC	HC-00/1	0	0,310	0,596	520	0,356	0,871
	HC-05/1	0,5	0,691	1,019	678,1	0,763	0,91
	HC-10/1	1,0	0,880	1,115	789,2	1,047	0,84
	HC-10/2	1,0	0,857	0,879	975,0	1,078	0,79
	HC-15/1	1,5	1,139	1,226	929,0	1,486	0,77
	HC-15/2	1,5	0,935	1,218	767,7	1,327	0,70
HC-ZPI	HC-ZPI-00/1	0	0,385	0,400	962,5	0,469	0,82
	HC-ZPI-00/2	0	0,450	0,432	1041,7	0,551	0,82
	HC-ZPI-05/1	0,5	0,813	0,910	893,4	1,079	0,75
	HC-ZPI-10/1	1,0	0,906	1,164	778,3	1,331	0,68
	HC-ZPI-15/1	1,5	0,954	1,158	823,8	1,511	0,63
	HC-ZPI-15/2	1,5	0,833	0,984	846,5	1,280	0,65

* Naprężenia styczne τ wyznaczone poprzez podzielenie siły poziomej (rysującej lub niszczącej) przez pole górnej powierzchni modelu równego $A=0,25 \cdot 1,68=0,42m^2$.

Widać wyraźnie gwałtowny wzrost odkształceń stali zbrojeniowej, mierzonej w środkowej części prętów. Zauważyć w tym miejscu należy, że wyężenie prętów zbrojeniowych zależy od poziomu wstępnych naprężeń ściskających. Maksymalne wyężenie prętów zbrojeniowych w środkowej strefie prętów umieszczonych w połowie wysokości modelu wynosiło ok.83% granicy plastyczności stali i mało wraz z obniżeniem poziomu σ_c . Najmniejsze odkształcenia rzędu 4% granicy plastyczności stali wykazały pręty w modelu serii HC-ZPI-00 ($\sigma_c =0$ MPa). Na rys.6a przedstawiono porównanie uzyskanych naprężeń stycznych τ_{cr}^{test} , przy których powstaje widoczna rysa (szerokości ok. 0,1 mm) w odniesieniu do niszczących naprężeń stycznych τ_u^{test} . Porównania dokonano w funkcji wstępnych naprężeń σ_c dla obydwu serii modeli (niezbrojonych i zbrojonych). Wydaje się, że wpływ zastosowanego zbrojenia na wartość obciążenia wywołującego powstanie rys i dalszą możliwość przenoszenia obciążenia poziomego przez mur jest najmniejszy przy niewielkich poziomach ($\sigma_c =0$ MPa). Ze wzrostem σ_c widać tendencję spadkową zależności $\tau_{cr}^{test} / \tau_u^{test}$. Z tym, że mury zbrojone serii HC-ZPI (zbrojone) wykazały większe zapasy nośności w stosunku do modeli serii HC (niezbrojonych).



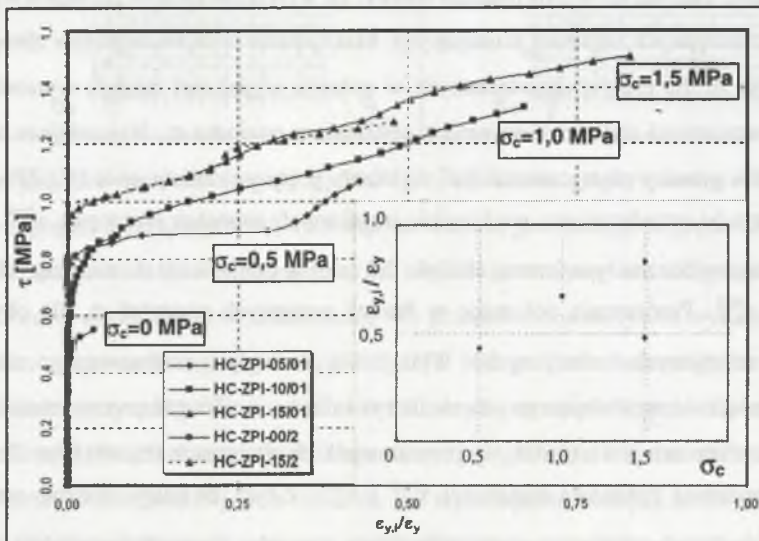
Rys. 4. Zależność $\tau-\Theta$ dla wszystkich poziomów σ_c , a) modele niezbrojone serii HC, b) modele zbrojone serii HC-ZPI
 Fig. 4. Relationships of $\tau-\Theta$ for all levels of compressive stress σ_c - a) unreinforced models HC series, b) reinforced models HC-ZPI series

Na rys. 6b zestawiono uzyskane wytrzymałości na ścinanie pochodzące z badań murów serii HC i HC - ZPI. Zależność pomiędzy $\tau-\sigma$ dla muru niezbrojonego opisana w normie [1] oparta jest na kryterium wyężenia materiału, opisanym zmodyfikowaną hipotezą Coulomba - Mohra przez zależności (1).

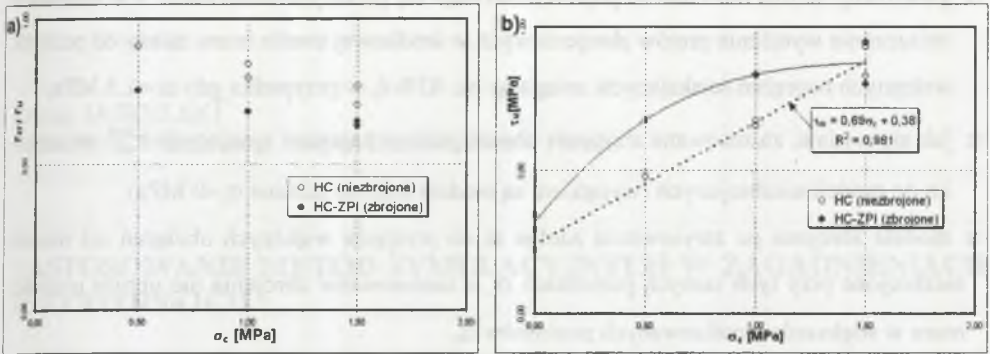
$$f_{vk} = f_{vko} + 0,4 \cdot \sigma_c \quad (1)$$

gdzie:

f_{vko} – wytrzymałość muru na ścinanie przy zerowym naprężeniu ściskającym ($\sigma_c=0$ MPa),
 σ_c – wartość naprężeń ściskających w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ścinania.



Rys. 5. Odształcenia w stali zbrojeniowej w funkcji naprężeń stycznych
 Fig. 5. Deformations of reinforcement steel bars at function of shear stress



Rys. 6. a) Porównanie poziomów naprężeń rysujących w modelach serii HC-ZPI, b) zestawienie uzyskanej wytrzymałości na ścinanie modeli zbrojonych i niezbrojonych
Fig. 6. a) Comparison of results of cracking shear stress for models HC-ZPI and HC series, b) comparison of results of shear strength reinforced and unreinforced models

Podobny, liniowy charakter zależności $\tau-\sigma$ uzyskano z badań dla modeli niezbrojonych serii HC (por. rys.6b linia przerywana). Krzywoliniową zależnością wiążącą zależność $\tau-\sigma$ wykazują natomiast modele zbrojone HC-ZPI (por. rys.6b linia ciągła). Nadmienić przy tym należy, że większą nośność na ścinanie miały modele zbrojone serii HC – ZPI. Wpływ zastosowanego zbrojenia był największy w przypadku niskich poziomów wstępnych naprężeń ściskających i malał ze wzrostem σ_c . Podsumowując stwierdzić należy, że badania traktować należy jako wstępne o charakterze rozpoznawczym. Uzyskane rezultaty są zbliżone z wynikami badań [3+6] i stanowią punkt wyjścia do dalszych prac w tym zakresie.

4. Wnioski

Pomimo że badania objęły niewielką ilość modeli badawczych i nie są jednoznaczne, można podjąć próbę oceny ich rezultatów pod względem jakościowym. W przypadku modeli niezbrojonych badania wykazały, że:

- mechanizm zniszczenia muru jest zależny od poziomu wstępnych naprężeń ściskających,
- wytrzymałość muru na ścinanie w funkcji poziomu wstępnych naprężeń ściskających dobrze opisuje zależność liniowa (rys.6b).

Podobną jakościową ocenę wyciągnąć można z rezultatów badań modeli zbrojonych. Choć badania wymagają uzupełnienia, wynikają z nich następujące wnioski:

- mechanizm zniszczenia murów ze zbrojeniem nie odbiega zasadniczo od murów niezbrojonych, szczególnie obserwuje się to dla niskich poziomów σ_c ,

- gwałtowny wzrost odkształceń prętów obserwuje się po zarysowaniu muru, a w momencie zniszczenia wyężenie prętów zbrojeniowych w środkowej strefie muru zależy od poziomu wstępnych naprężeń ściskających, osiągając ok. 83% f_y w przypadku gdy $\sigma_c=1,5$ MPa,
- jak się wydaje, zastosowane zbrojenie obniża poziom naprężeń rysujących τ_{cr}^{test} w stosunku do modeli niezbrojonych (wyjątkiem są modele jedynie ścinane $\sigma_c=0$ MPa),
- modele zbrojone po zarysowaniu zdolne są do przejścia większych obciążeń niż modele niezbrojone przy tych samych poziomach σ_c , a zastosowanie zbrojenia nie obniża nośności muru w większości analizowanych poziomów σ_c .

LITERATURA

1. PN-B-03002:1999 Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie.
2. Brunner J.D., Shing P. B. Shear strength of reinforced masonry walls. The Masonry Society Journal. Vol. 14, No 1, August 1996, s. 65-77.
3. Dialer Ch., Some remarks on the strength and deformation behaviour on shear stressed masonry panels under static monotonic loading. Proc. of 9th International Brick/Block Masonry Conference Berlin 1991, vol. 1 s. 276-283.
4. Guiqiu L., Chuxian S., Jinlin B. The shear strength of unreinforced masonry wall. Proc. of 11th International Brick/Block Masonry Conf. Shanghai 1997, vol.1 s. 135-140.
5. Mann W., Müller H. Schubtragfähigkeit von gemauerten Wänden und Voraussetzungen für das Entfallen des Windnachweises. Mauerwerk Kal. 1985, s.95-113.
6. Shing P. B., Schuller M., Hoskere V. S., Carter E. Flexural and shear response of reinforced masonry walls. ACI Jou., vol.87 No.6 Nov. – Dec.1990, s.646-656.

Recenzent: Prof. dr inż. Bohdan Lewicki

Abstract

Research of investigations of horizontally sheared clay brick masonry wallets were presented in this work. Two series of masonry models have been tested with different levels of initial compressive stresses up to 1,5 MPa. Series marked as HC – unreinforced and HC-ZPI reinforced with smooth steel bars. Tests carried out that horizontal shear strength of models with level of compressive stresses was characterized by linear relationship (1) was similar like in [1] code. Investigations were of confirmed the thesis of good influence of reinforcement on load capacity. The growing up of capacity of reinforcement masonry walls was observed in all range of compressive stress. Applied reinforcement gave influence on mechanism of failure. Extreme tension of steel bars in the middle zone of models amounted about 83% of steel yield limit.