

# Badania zbrojonych ścian ceglanych ściananych poziomo

Dr inż. Radosław Jasiński, Politechnika Śląska

## 1. Wprowadzenie

Sztywność przestrzenną budynku murowanego zapewniają ściany usztywniające, na które, oprócz obciążeń poziomych (wiatr, wstrząsy sejsmiczne, temperatura i odkształcenia reologiczne), oddziałują także pionowe obciążenia stałe i eksploatacyjne. W przypadku ścian niezbrojonych, wymienione czynniki prowadzić mogą do znacznych uszkodzeń utrudniających, a nawet wykluczających dalsze użytkowanie obiektu. Te części konstrukcji wykonuje się zazwyczaj jako murowane niezbrojone, a kiedy zachodzi potrzeba zwiększenia rysoodporności i nośności – stosuje się zbrojenie, które umieszczone może być w spoinach wspornych lub dodatkowo w wypełnionych betonem pionowych rdzeniach.

Wyniki badań Scrivenera [1] zbrojonych ścian ściananych poziomo wskazywały, że zbrojenie mieszane – poziome i pionowe, zwiększa rysoodporność, nośność i sztywność w fazie przed i po zarysowaniu. Realizacja muru w takiej technologii wymaga – oprócz stosowania koszy zbrojeniowych – używania również specjalnych typów elementów murowych z pionowymi drążeniami wypełnianymi na budowie betonem, co niewątpliwie zwiększa pracochłonność i koszty realizacji obiektu. Wpływ prostszego w realizacji zbrojenia umieszczonego wyłącznie w spoinach wspornych (ze względu na obciążenia pionowe) pozostaje dotychczas mało rozreznany. Wyniki badań [2, 3, 4] ściananych poziomo ścian zbrojonych w ten sposób, nie pozwalają jednoznacznie stwierdzić czy stosowanie

takiego zbrojenia (szczególnie przy niskich procentach zbrojenia  $\rho < 0,1\%$ ), wpływa korzystnie na zachowanie się muru. Nie sposób odpowiedzieć na pytanie, jaki wpływ będzie miało zbrojenie poprzeczne umieszczone w spoinach wspornych w postaci niepowiązanych ze sobą prętów lub „kratowniczek” zgrzewanych ze stalowych prętów (wg PN-EN-845-3:2003 [9]), stosowane w minimalnym procencie wynoszącym 0,1% (wg PN-B-03340:1999 [10]) i 0,05% (wg EN 1996-1-1 [11] i PN-B-03002:2007 [12]).

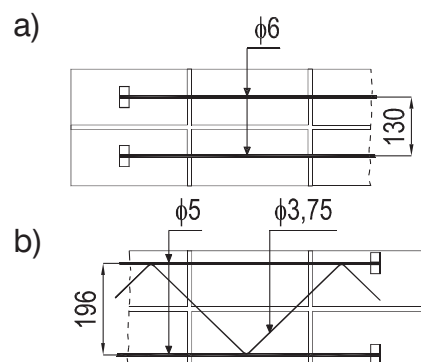
Odpowiedź na postawione pytanie była zasadniczym celem przeprowadzonych przez autora prac badawczych [5]. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań w zakresie rysoodporności, nośności i odkształcalności postaciowej (również w odniesieniu do ścian niezbrojonych), ścian ceglanych, zbrojonych poprzecznie dwoma typami zbrojenia. Praca stanowi rozszerzoną wersję publikacji autora [6], prezentowanej podczas konferencji krynickiej w roku 2007.

## 2. Modele i program badań

Ściany o wymiarach  $l \times h \times t = 1,68 \times 1,42 \times 0,25$  m wykonano z najczęściej używanych w naszym kraju materiałów, to znaczy cegły pełnej klasy 20 ( $f_b = 28,8$  MPa) i zaprawy cementowo-wapiennej klasy 10 ( $f_m = 9,67$  MPa) o proporcji składników cementu : wapna : piasku równym 1 : 1 : 6. Uzyskano w ten sposób mur o wytrzymałości na ściskanie  $f_c = 8,17$  MPa (współczynnik zmienności –  $\nu = 8,9\%$ ), współczynnika

sprężystości  $E = 3110$  MPa (współczynnik zmienności –  $\nu = 10,9\%$ ) oraz współczynnika odkształcalności poprzecznej  $\nu_{xy} = 0,122$ . Do zbrojenia użyto gładkich prętów średnicy 6 mm (ze stali stal nierdzewnej znaku 1H18N95T-1.4541,  $f_y = 592$  MPa) – rys. 1a i zgrzewanych stalowych i ocynkowanych „kratowniczek” (o pasach z prętów średnicy 5 mm –  $f_y = 701$  MPa i krzyżulcach z prętów średnicy 3,75 mm –  $f_y = 625$  MPa) typu MURFOR® RND/Z/200 – rys. 1b.

Zasadnicze badania (tabela 1) obejmujące 51 ścian podzielono na pięć serii. Seria HC obejmowała modele bez zbrojenia, serie HC-Z-PI i HC-Z-PII ściany zbrojone prętami, a w seriach HC-ZKI i HC-ZKII w spoinach wspornych zastosowano „kratowniczeki” stalowe. Ściany ścianano poziomo bez udziału  $\sigma_c = 0$  lub przy udziale naprężeń ściskających (prostokątnych do spoin wspornych) o wartościach  $\sigma_c = 0,5, 1,0, 1,5$  MPa. Przy danej wartości wstępnych naprężeń ściskających  $\sigma_c$ , zbadano po 2 lub 3 modele. Oprócz badań ścian, wykona-



**Rys. 1.** Zbrojenie wykorzystane w badaniach: a) stalowe pręty gładkie, b) „kratowniczeki” stalowe

**Tabela 1.** Program zasadniczych badań doświadczalnych

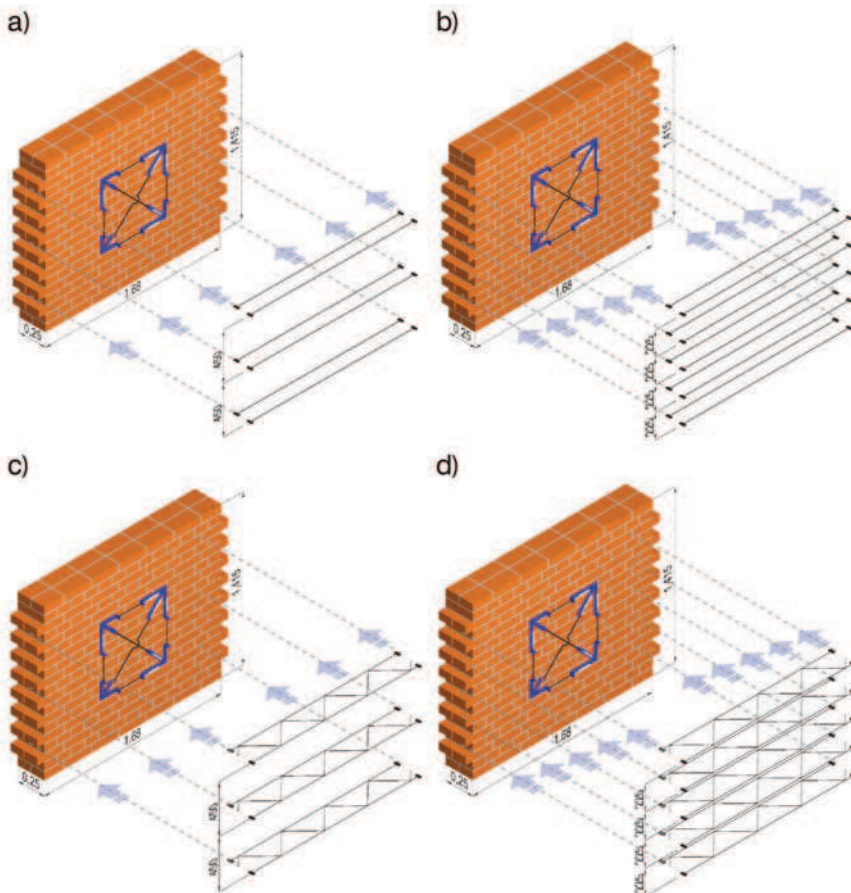
Oznaczenie serii	Rodzaj Zbrojenia	Procent zbrojenia		$\sigma_c$ [MPa]	Liczebność elementów badawczych	
		w kierunku długości $l$	w kierunku grubości $t$		przy $\sigma_c$	suma
HC	Bez zbrojenia	–	–	0	3	11
				0,5	2	
				1,0	2	
				1,5	4	
HC-ZPI	Pręty gładkie $\varnothing$ 6 mm	0,05	0	0	3	10
				0,5	2	
				1,0	2	
				1,5	3	
HC-ZPII	Pręty gładkie $\varnothing$ 6 mm	0,10	0	0	3	10
				0,5	2	
				1,0	2	
				1,5	3	
HC-ZKI	Kratowniczki	0,05	0,058	0	3	10
				0,5	2	
				1,0	2	
				1,5	3	
HC-ZKII	Kratowniczki	0,10	0,116	0	3	10
				0,5	2	
				1,0	2	
				1,5	3	

no również badania materiałowe muru, komponentów składowych (zaprawy, cegły) i stali zbrojenio-wej, wyniki zawarto w pracy [5]. W elementach zbrojonych prętami (seria HC-ZPI) stosowano po dwa pręty gładkie średnicy 6 mm umieszczane co 6 spoinę wsporną ( $s = 450$  mm) uzyskując procent zbrojenia wynoszący  $\rho_h = 0,05\%$  – rys. 2a. Natomiast w elementach serii HC-ZPII podwojono procent zbrojenia do  $\rho_h = 0,10\%$  poprzez wprowadzenie prętów w co 3 spoinie ( $s = 450$  mm) – rys. 2b. W elementach serii HC-ZKI wprowadzono 3 warstwy „kratowniczek” uzyskując  $\rho_h = 0,05\%$  – rys. 2c, a w elementach serii HC-ZKII zastosowano 5 warstw i otrzymano  $\rho_h = 0,10\%$  – rys. 2d.

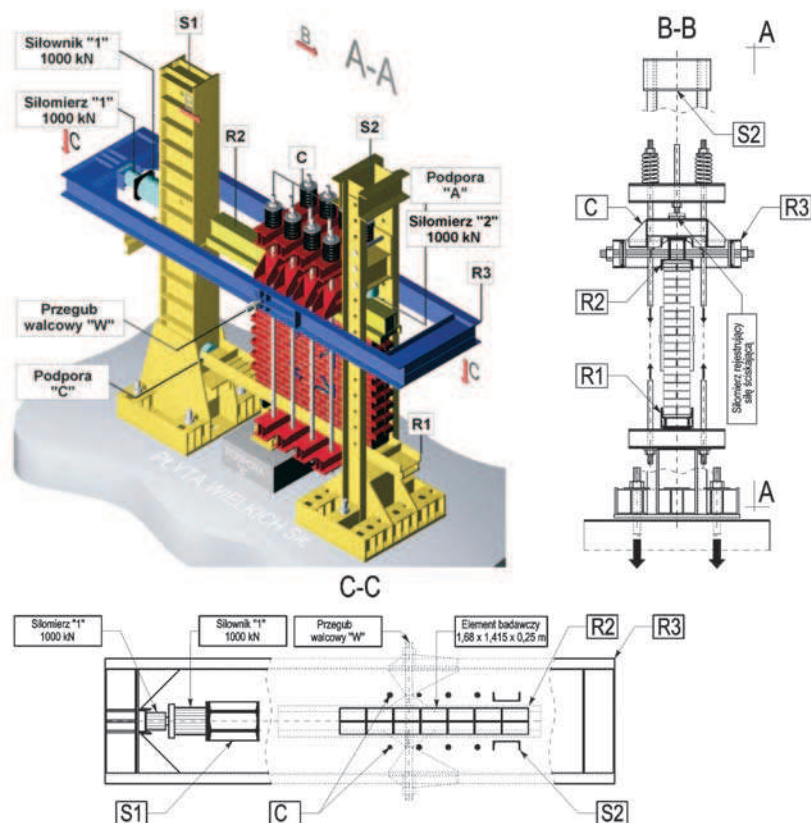
Wszystkie podłużne pręty zbrojenia (swobodne pręty i pasy „kratowniczek”) kotwiono mechaniczne w zaprawie poprzez dospawanie na końcach stalowych płaskowników (por. rys. 1).

**3. Stanowisko badawcze i przebieg badań**

Elementy badano w stanowisku (opisanym szczegółowo w pracy [5]) pozwalającym na realizację ścinania siłami zorientowanymi równoległe do płaszczyzny spoin wspornych z jednoczesnym ścisnaniem prostopadłym do spoin wspornych. Stanowisko składało się z dwóch stalowych słupów [S1] i [S2], trzech poziomych rygli [R1], [R2], [R3] oraz czterech zestawów ciągnowych [C], służących do wywołania wstępnych naprężeń ściskających  $\sigma_c$  – rys. 3. Obciążenie ścinające, wywołane siłownikiem hydraulicznym „1”, przekazywano na model badawczy przez rygle [R2] i [R3], a rygiel [R1] stanowił podporę dolnej krawędzi ściany. Badanie każdego modelu przebiegało tak samo, w pierwszej kolejności wywoływa- no wstępne naprężenia ściskające  $\sigma_c$  prostopadłe do płaszczyzny spoin wspornych za pomocą układów ciągnowych [C], następnie elementy obciążano siłą poziomą H



**Rys. 2.** Zbrojone elementy badawcze: a) zbrojone prętami HC-ZPI ( $\rho_h = 0,05\%$ ), b) zbrojone prętami HC-ZPII ( $\rho_h = 0,10\%$ ), c) zbrojone „kratowniczkami” HC-ZKI ( $\rho_h = 0,05\%$ ), d) zbrojone „kratowniczkami” HC-ZKII ( $\rho_h = 0,10\%$ )



Rys. 3. Stanowisko badawcze

w jednym cyklu aż do zniszczenia. Obciążenie zwiększano skokowo co 10 kN w 2-minutowych odstępach czasowych, dokonując za pośrednictwem automatycznego stanowiska pomiarowego (ASP-1) rejestracji odczytów czujników indukcyjnych i wskazań siłomierzy. Przy każdej zarejestrowanej sile poziomej  $H_i$  (przy  $i$ -tym poziomie obciążenia) obliczano wartość średnich naprężeń stycznych  $\tau_{v,i}$  jako iloraz obciążenia ścinającego  $H_i$  i pola powierzchni przekroju poziomego muru  $A_h$  z zależności:

$$\tau_{v,i} = \frac{H_i}{A_h} = \frac{H_i}{lt} \quad (1)$$

Do pomiarów kąta odkształcenia postaciowego muru służył układ ramkowy (o bazie 600 mm) mocowany na kleju epoksydowym symetrycznie po obu stronach modelu badawczego – rys. 4a. Na podstawie zmian długości boków i przekątnych, obliczono na podstawie

zależności trygonometrycznych, kąty odkształcenia postaciowego  $\Theta_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) wydzielone ze zdeformowanego układu pomiarowego – rys. 4b. Kąt odkształcenia postaciowego –  $\Theta_i$  (przy  $i$ -tym poziomie obciążenia), którym posługiwano się w dalszej części pracy stanowił

średnią arytmetyczną z poszczególnych kątów  $\Theta_j$ . Wartość modułu odkształcenia postaciowego  $G_i$  (przy  $i$ -tym poziomie obciążenia) określano jako iloraz naprężeń stycznych  $\tau_{v,i}$  oraz średnich wartości kąta odkształcenia postaciowego  $\Theta_i$ .

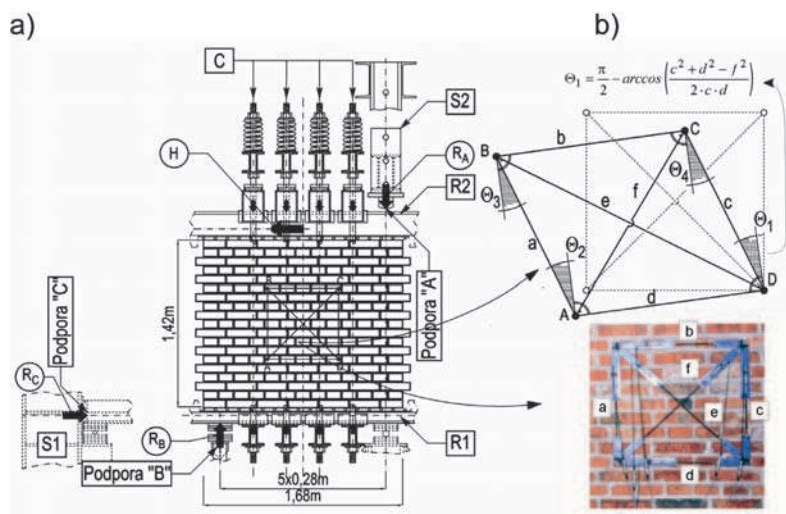
$$G_i = \frac{\tau_{v,i}}{\Theta_i} \quad (2)$$

Wartości naprężeń rysujących  $\tau_{cr}$  i odpowiadające im kąty  $\tau_{cr}$  i moduły odkształcenia postaciowego  $G_{cr}$  określono dla sił rysujących  $H_{cr}$ , przy których zaobserwowano pojawienie się nowych rys o rozwarości 0,1 mm. Natomiast naprężenia niszczące  $\tau_u$  i kąty deformacji postaciowej  $\tau_u$  określano przy siłach powodujących zniszczenie modelu (nie rejestrowano dalszego wzrostu obciążeń przy wzroście odkształceń postaciowych muru).

#### 4. Wyniki badań i analiza

##### 4.1. Naprężenia rysujące i niszczące

Średnie wartości naprężeń rysujących  $\tau_{cr,mv}$  i niszczących  $\tau_{u,mv}$ , poszczególnych serii elementów (badanych przy tych samych wartościach  $\sigma_c$ ) zestawiono w tabeli 2. Do zobrazowania wpływu zbrojenia, w tabeli 2 przedstawiono



Rys. 4. a) szkic stanowiska badawczego, b) układ „ramkowy” do pomiaru kątów odkształcenia postaciowego



**Tabela 2.** Rezultaty badań – naprężenia rysujące i niszczące

Seria	$\rho_h$ [%]	$\sigma_c$ [MPa]	Naprężenia rysujące*	Naprężenia niszczące*	Naprężenia rysujące	Naprężenia niszczące
			$\tau_{cr,mv}$ [MPa]	$\tau_{u,mv}$ [MPa]	$\frac{\tau_{cr,mvZ}}{\tau_{cr,mvN}}$	$\frac{\tau_{u,mvZ}}{\tau_{u,mvN}}$
HC-00	0	0	0,343	0,388	1,0	1,0
HC-05		0,5	0,684	0,812	1,0	1,0
HC-10		1,0	0,892	1,06	1,0	1,0
HC-15		1,5	1,01	1,35	1,0	1,0
HC-ZPI-00	0,05	0	0,442	0,564	1,29	1,45
HC-ZPI-05		0,5	0,775	1,066	1,13	1,31
HC-ZPI-10		1,0	0,942	1,291	1,06	1,22
HC-ZPI-15		1,5	0,970	1,39	0,97	1,03
HC-ZPII-00	0,1	0	0,479	0,557	1,40	1,43
HC-ZPII-05		0,5	0,798	1,132	1,17	1,39
HC-ZPII-10		1,0	0,988	1,392	1,11	1,31
HC-ZPII-15		1,5	1,05	1,59	1,04	1,18
HC-ZKI-00	0,05	0	0,739	0,794	2,15	2,05
HC-ZKI-05		0,5	0,930	1,10	1,36	1,35
HC-ZKI-10		1,0	1,22	1,59	1,37	1,50
HC-ZKI-15		1,5	1,38	1,76	1,37	1,30
HC-ZKII-00	0,1	0	0,764	0,829	2,23	2,14
HC-ZKII-05		0,5	1,10	1,29	1,60	1,58
HC-ZKII-10		1,0	1,28	1,63	1,43	1,53
HC-ZKII-15		1,5	1,45	1,77	1,44	1,31

\* – wyniki badań każdego modelu zawarto w pracy [5]

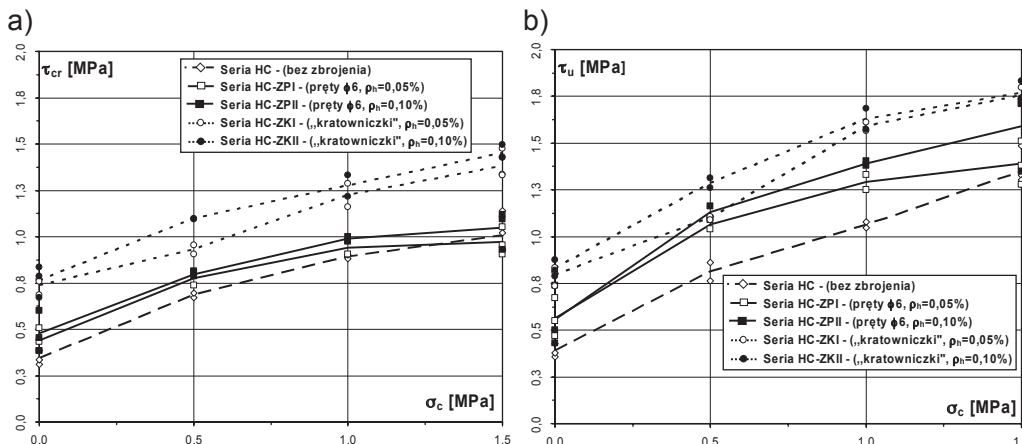
również ilorazy wartości naprężeń rysujących  $\tau_{cr,mvZ}$  i niszczących  $\tau_{u,mvZ}$  uzyskanych w seriach murów zbrojonych do odpowiadających im wartości naprężeń  $\tau_{cr,mvN}$ ,  $\tau_{u,mvN}$  otrzymanych w seriach murów niezbrojonych. Uzyskane wyniki w funkcji wstępnych naprężeń ściskających  $\sigma_c$  pokazano na wykresach – rys. 5. Przyrost wartości naprężeń rysujących  $\tau_{cr,mv}$  (rys. 5a) określony w modelach maksymalnie ściskanych (przy  $\sigma_c=1,5$  MPa), w stosunku do elementów wyłącznie ścinanych wynosił w modelach

zbrojonych prętami (obu serii) 120% i 90% w przypadku „kratowniczek”. W ścianach bez zbrojenia wzrost ten był największy – rzędu 190%. Natomiast przyrost naprężeń określony w chwili zniszczenia  $\tau_{u,mv}$  (rys. 5b) w murach maksymalnie ściskanych – w stosunku do elementów wyłącznie ścinanych – wynosił w murach zbrojonych prętami 150% ( $\rho_h=0,05\%$ ) i 190% ( $\rho_h=0,10\%$ ), a w modelach zbrojonych „kratowniczkami” 120% ( $\rho_h=0,05\%$ ) i 110% ( $\rho_h=0,10\%$ ). W elementach bez zbrojenia uzy-

skany przyrost był znacznie większy i wynosił 250%.

Największy wpływ zbrojenia na wartość naprężeń rysujących zaobserwowano w elementach wyłącznie ścinanych. Przy  $\rho_h=0,05\%$  w modelach zbrojonych prętami uzyskano 30%, a „kratowniczkami” 115% przyrost wartości naprężeń w odniesieniu do modeli serii HC. Kiedy stosowano dwukrotnie większy procent zbrojenia w modelach ścinanych przy  $\sigma_c=0$  zbrojonych prętami uzyskano o 40%, a „kratowniczkami” o 120% większe naprężenia niż w murach bez zbrojenia. Ze wzrostem wartości  $\sigma_c$  wpływ zbrojenia w stosunku do murów niezbrojonych wyraźnie malał. Jedynie w murach z „kratowniczkami” przy obu procentach nasycenia obserwowano 40% wzrost wartości naprężeń.

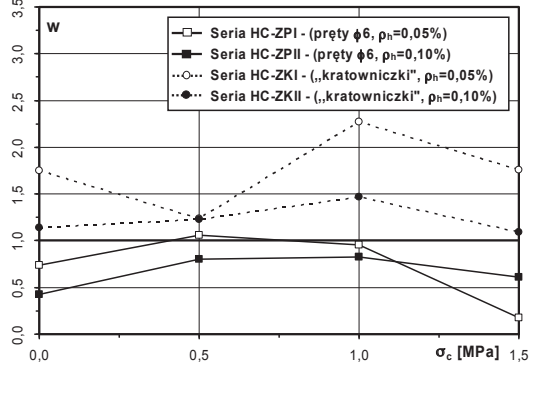
Analogicznie jak w przypadku naprężeń rysujących, również w chwili zniszczenia najistotniejszy wpływ zastosowanego zbrojenia uzyskano w elementach wyłącznie ścinanych. W murach z „kratowniczkami” przyrost wartości  $\tau_{u,mv}$  w stosunku do elementów niezbrojonych wynosił 100% ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i 110% ( $\rho_h = 0,10\%$ ), a w murach z prętami 45% ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i 40% ( $\rho_h = 0,10\%$ ). Przy wzroście naprężeń  $\sigma_c$  proporcjonalnie malał wpływ zbrojenia. W elementach maksymalnie ściskanych z prętami uzyskano 3% ( $\rho_h=0,05\%$ ) i 20% ( $\rho_h = 0,10\%$ ), a w murach z „kratowniczkami” przy obu procentach zbrojenia 30% wzrosty naprężeń.



**Rys. 5.** Zestawienie uzyskanych zależności  $\tau_{cr,mv}$ ,  $\tau_{u,mv}$  –  $\sigma_c$  wszystkich serii elementów: a) naprężenia rysujące –  $\tau_{cr,mv}$ , b) naprężenia niszczące –  $\tau_{u,mv}$

**Tabela 3.** Porównanie uzyskanych współczynników wyężenia

Seria	$\sigma_c$ [MPa]	w
HC-ZPI	0,0	0,74
	0,5	1,06
	1,0	0,96
	1,5	0,17
HC-ZPII	0,0	0,42
	0,5	0,80
	1,0	0,83
	1,5	0,61
HC-ZKI	0,0	1,75
	0,5	1,24
	1,0	2,28
	1,5	1,76
HC-ZKII	0,0	1,14
	0,5	1,23
	1,0	1,47
	1,5	1,09



Przepisy normowe stanowią, aby obliczeniową nośność zbrojonego muru poddanego poziomemu ścinaniu określać według ogólnej zależności:

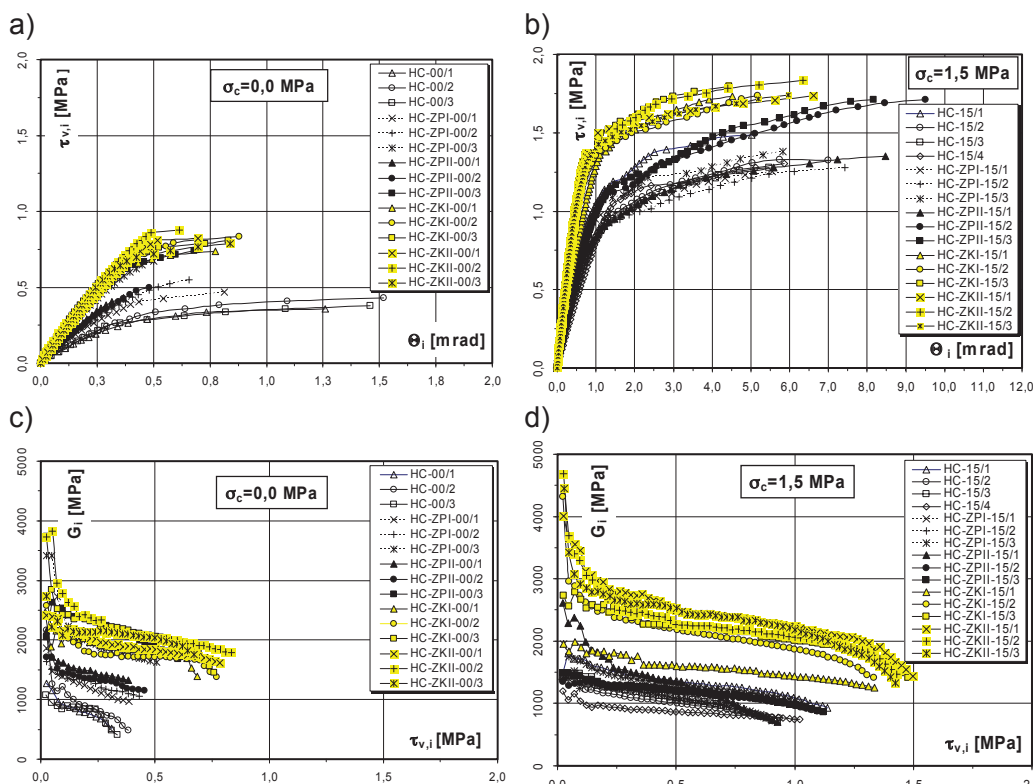
$$V_{Rd} = V_{Rd1} + V_{Rd2} = V_{Rd1} + wN_{RN} \quad (3)$$

Pierwszy składnik  $V_{Rd1}$  wyraża nośność muru niezbrojonego na ścinanie, a drugi  $V_{Rd2}$  jest nośnością zbrojenia na rozciąganie  $wN_{RN}$ , w której „w” jest współczynnikiem wykorzystania zbrojenia ( $w \leq 1$ ), natomiast

$N_{RN}$  jest wypadkową siłą w zbrojeniu (przy założeniu osiągnięcia granicy plastyczności  $f_y$ ). Bazując na uzyskanych wynikach badań ścian zbrojonych i niezbrojonych, określono ze wzoru (3) wartości współczynnika „w”. W obliczeniach przyjęto  $V_{Rd} = H_{u,obsZ}$  ( $H_{u,obsZ}$  – średnia ścinająca siła niszcząca mur zbrojony) oraz  $V_{Rd1} = H_{u,obsN}$  ( $H_{u,obsN}$  – średnia ścinająca siła niszcząca mur niezbrojony). Średnie wartości współczynników „w” w elementach ścinanych przy jednakowych wartościach  $\sigma_c$

przedstawiono w formie liczbowej i graficznej w tabeli 3 (wyniki badań każdego modelu zawarto w pracy [5]).

Zależnie od typu zbrojenia, uzyskiwano zróżnicowane wartości współczynnika wykorzystania zbrojenia:  $w < 1$  w przypadku prętów i  $w > 1$  w murach z „kratowniczkami”, jednocześnie wartość „w” malała ze wzrostem procentu zbrojenia. Uzyskane wartości świadczą, że przy  $w < 1$  nie osiągnięto granicy plastyczności, natomiast przy  $w \approx 1$  doszło do uplastycznienia zbrojenia. Wartości  $w > 1$ , które uzyskano w murach z „kratowniczkami” wskazują, że naprężenia w prętach osiągnęły wartość bliską wytrzymałości na rozciąganie. Uzyskane wyniki potwierdzają obserwacje sposobu zniszczenia ścian, ponieważ w elementach z prętami ze wzrostem obciążenia rosły deformacje postaciowe i szerokości rozwarcia rys, natomiast w elementach z „kratowniczkami” przy maksymalnym obciążeniu następowało zerwanie wszystkich prętów „kratowniczek”. Przyjmowanie w obliczeniach nośności murów zbrojonych „kratowniczkami” (zalecanych przez



**Rys. 6.**  
 a) zależności  $\tau_{v,i} - \theta_i$  przy  $\sigma_c = 0$ ,  
 b) zależności  $\tau_{v,i} - \theta_i$  przy  $\sigma_c = 1,5$  MPa,  
 c) zależności  $\tau_{v,i} - G_1$  przy  $\sigma_c = 0$ ,  
 d) zależności  $\tau_{v,i} - G_1$  przy  $\sigma_c = 1,5$  MPa

PN-EN-845-3:2003 [9]) wartości współczynnika  $w=1,0$  (SNIP II-22-81 [13]),  $w=0,9$  (PN-EN 1996-1-1 [11]) wydają się być korzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji. Wartości te są jednak zbyt liberalne w przypadku ścian zbrojonych prętami (niesprawdzanych obliczeniowo i ścian zbrojonych konstrukcyjnie), zasadne wydaje się obniżenie wartości współczynnika do poziomów  $w=0,7$  (GBJ-68-84 [14], NEHRP [15]) lub  $w=0,5$  (NZS 4230:1990 [16]).

**4.2. Odształcalność postaciowa**

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wykresy zależności naprężenie styczne  $\tau_{v,i}$  – kąt odkształcenia postaciowego  $\Theta_i$  oraz zależności naprężenie styczne  $\tau_{v,i}$  – moduł odkształcenia postaciowego  $G_i$  (do chwili zarysowania) elementów badanych przy naprężeniach ściskających  $\sigma_c=0$  i 1,5 MPa.

Do chwili zarysowania, zależność  $\tau_{v,i}-\Theta_i$  (rys. 6a i b) miała we wszystkich elementach charakter zbliżony do liniowego o zróżnicowanym, w zależności od procentu i typu zbrojenia, pochyleniu (największe pochylenie – elementy niezbrojonych serii HC, a najmniejsze –

mury zbrojone kratowniczkami serii HC-ZKI i HC-ZKII). W fazie po zarysowaniu zdolność murów do przyjmowania obciążeń wyraźnie zmalała. Bez względu na typ i procent zbrojenia, widoczne były znaczne przyrosty kątów deformacji postaciowej, których końcowa wartość rosła proporcjonalnie do wartości wstępnych naprężeń ściskających  $\sigma_c$ .

Na wykresach  $G_i-\tau_{v,i}$  (rys. 6c i d) wyróżnić można co najmniej dwa przedziały różniące się gradientem zmiany modułu odkształcenia postaciowego. Pierwszy – początkowy przedział zmienności  $G_i$  występował, gdy wartość naprężeń ściskających zawierała się w granicach  $0 < \tau_{v,i} < \sim 5\% \tau_{cr}$ . Obserwowano wówczas gwałtowną degradację początkowej wartości modułu odkształcenia postaciowego, zarówno w elementach niezbrojonych, jak i w wszystkich modelach zbrojonych bez względu na wartość wstępnych naprężeń ściskających  $\sigma_c$ . Drugi, nieco mniej intensywny przedział zmiany  $G_i$ , występował gdy średnie naprężenie styczne wynosiły  $\sim 5\% \tau_{cr} < \tau_{v,i} < \tau_{cr}$ ; wówczas zmiany wartości  $G_i$  miały przebieg zbliżony do liniowego. W niektórych mode-

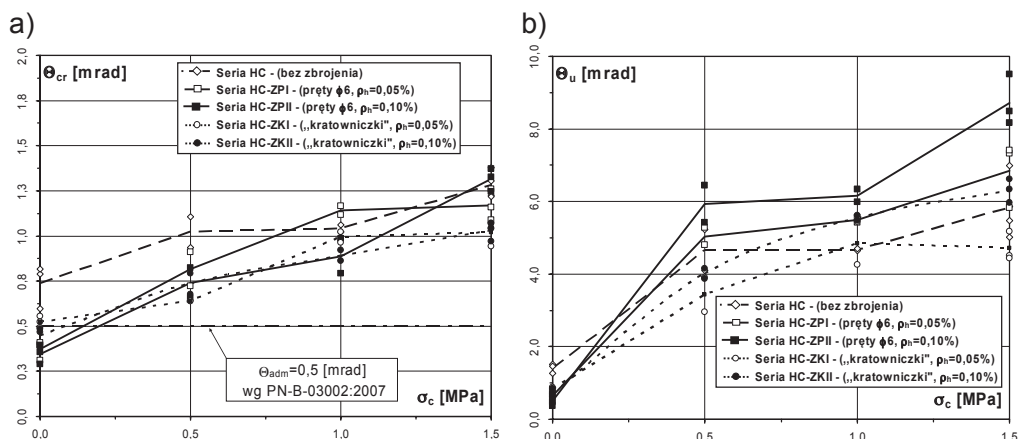
lach w stadium poprzedzającym zarysowanie obserwowano dodatkowy spadek wartości  $G_i$ .

Średnie wartości kątów odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania  $\Theta_{cr,mv}$  i zniszczenia  $\Theta_{u,mv}$  oraz wartości modułów odkształcenia postaciowego  $G_{cr,mv}$  poszczególnych serii elementów (badanych przy tych samych wartościach  $\sigma_c$ ) zestawiono w tabeli 4. Do zobrazowania wpływu zbrojenia przedstawiono również ilorazy uzyskanych wartości  $\Theta_{cr,mvZ} / \Theta_{u,mvZ}$  i  $G_{cr,mvZ} / G_{cr,mvN}$  murów zbrojonych i odpowiadające im wartości  $\Theta_{cr,mvN} / \Theta_{u,mvN}$  i  $G_{cr,mvN} / G_{cr,mvN}$  otrzymane w murach niezbrojonych.

Wartości kątów odkształcenia postaciowego  $\Theta_{cr,mv}$  określone w chwili zarysowania rosły proporcjonalnie ze wzrostem wstępnych naprężeń ściskających ( $\sigma_c$ ) – rys. 7a. W przypadku murów zbrojonych prętami przy wzroście  $\sigma_c$  od 0 do 1,5 MPa uzyskano wartości  $\Theta_{cr,mv}=0,373 \div 1,17$  mrad ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i  $\Theta_{cr,mv}=0,347 \div 1,32$  mrad ( $\rho_h = 0,10\%$ ), a kratowniczek  $\Theta_{cr,mv}=0,523 \div 1,02$  mrad ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i  $\Theta_{cr,mv}=0,445 \div 1,03$  mrad ( $\rho_h = 0,10\%$ ). Wartości te były mniejsze od kątów odkształcenia postaciowego  $\Theta_{cr,mv}$  otrzymanych dla

**Tabela 4.** Rezultaty badań – wartości kątów odkształcenia i deformacji postaciowej oraz moduły odkształcenia postaciowego

Seria	$\rho_h$ [%]	$\sigma_c$ [MPa]	$\Theta_{cr,mv}$ [mrad]	$\Theta_{u,mv}$ [mrad]	$G_{cr,mv}$ [MPa]	$\frac{\Theta_{cr,mvZ}}{\Theta_{cr,mvN}}$	$\frac{\Theta_{u,mvZ}}{\Theta_{u,mvN}}$	$\frac{G_{cr,mvZ}}{G_{cr,mvN}}$
HC-00	0	0	0,735	1,413	472	–	–	–
HC-05		0,5	1,02	4,665	674	–	–	–
HC-10		1,0	1,04	4,671	857	–	–	–
HC-15		1,5	1,28	5,84	787	–	–	–
HC-ZPI-00	0,05	0	0,373	0,658	1220	0,51	0,47	2,58
HC-ZPI-05		0,5	0,816	5,04	957	0,80	1,08	1,42
HC-ZPI-10		1,0	1,14	5,49	826	1,10	1,17	0,96
HC-ZPI-15		1,5	1,17	6,86	836	0,91	1,17	1,06
HC-ZPII-00	0,1	0	0,347	0,510	1390	0,47	0,36	2,94
HC-ZPII-05		0,5	0,739	5,94	1090	0,72	1,27	1,62
HC-ZPII-10		1,0	0,888	6,17	1060	0,85	1,32	1,23
HC-ZPII-15		1,5	1,32	8,72	798	1,03	1,49	1,01
HC-ZKI-00	0,05	0	0,523	0,827	1410	0,71	0,59	2,99
HC-ZKI-05		0,5	0,638	3,43	1460	0,62	0,74	2,16
HC-ZKI-10		1,0	0,994	4,84	1230	0,95	1,04	1,44
HC-ZKI-15		1,5	1,02	4,71	1360	0,79	0,81	1,73
HC-ZKII-00	0,1	0	0,445	0,717	1720	0,61	0,51	3,65
HC-ZKII-05		0,5	0,735	4,01	1500	0,72	0,86	2,23
HC-ZKII-10		1,0	0,892	5,54	1430	0,86	1,19	1,67
HC-ZKII-15		1,5	1,03	6,31	1410	0,80	1,08	1,79



**Rys. 7.** Zestawienie uzyskanych wyników badań w funkcji wstępnych naprężeń ściskających  $\sigma_c$ : a) wartość kątów odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania –  $\Theta_{cr}$ , b) wartość kątów deformacji postaciowej w chwili zniszczenia –  $\Theta_u$

murów niezbrojonych. Największe redukcje kątów uzyskano w przypadku elementów wyłącznie ścinanych przy ( $\sigma_c = 0$ ) – o 50% w murach zbrojonych prętami i 30% ( $\rho_h = 0,05\%$ ) oraz 40% ( $\rho_h = 0,10\%$ ) w murach z kratowniczkami. Również deformacje postaciowe murów określone w chwili zniszczenia  $\Theta_{u,mv}$  wzrastały ze wzrostem naprężeń ściskających – rys. 7b. W murach zbrojonych prętami przy wzroście  $\sigma_c$  w przedziale 0÷1,5 MPa przyrost deformacji postaciowych wynosił  $\Theta_{u,mv} = 0,658 \div 6,86$  mrad ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i  $\Theta_{u,mv} = 0,510 \div 8,72$  mrad ( $\rho_h = 0,10\%$ ), a kratowniczek  $\Theta_{u,mv} = 0,872 \div 4,71$  mrad ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i  $\Theta_{u,mv} = 0,717 \div 6,31$  mrad ( $\rho_h = 0,10\%$ ). W stosunku do elementów niezbrojonych, wartości  $\Theta_{u,mv}$  uzyskane w murach niezbrojonych były mniejsze przy  $\sigma_c = 0$  o 50÷60% w murach z prętami i 40÷50% w murach z kratowniczkami. Przy największych wartościach  $\sigma_c = 1,5$  MPa deformacje postaciowe murów z kratowniczkami były w stosunku do elementów niezbrojonych większe o 8% ( $\rho_h = 0,10\%$ ), a murów z prętami o 17% ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i 49% ( $\rho_h = 0,10\%$ ). W przypadku modułów odkształcenia postaciowego murów zbrojonych  $G_{cr,mv}$ , obserwowano spadek uzyskanych wartości ze wzrostem  $\sigma_c$ . W murach z niepowiązanymi ze sobą prętami, wartości  $G_{cr,mv}$  wynosiły  $G_{cr,mv} = 1220 \div 836$  MPa ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i  $G_{cr,mv} = 1390 \div 798$  MPa ( $\rho_h = 0,10\%$ ), w elementach z kratowniczkami odpowied-

nie  $G_{cr,mv} = 1410 \div 1360$  MPa ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i  $G_{cr,mv} = 1720 \div 1410$  MPa ( $\rho_h = 0,10\%$ ). W odniesieniu do elementów bez zbrojenia, we wszystkich seriach elementów zbrojonych ścinanych bez udziału naprężeń ściskających uzyskano większe wartości modułów odkształcenia postaciowego  $G_{cr,mv}$ . Wzrosty te wynosiły 150% ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i 190% ( $\rho_h = 0,10\%$ ) w murach z prętami i 200% ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i 265% ( $\rho_h = 0,10\%$ ) w murach z kratowniczkami. Ze wzrostem naprężeń ściskających, wpływ zbrojenia wyraźnie malał. Przy  $\sigma_c = 1,5$  MPa w murach z prętami nie uzyskano istotnej różnicy, a w murach z kratowniczkami w stosunku do elementów niezbrojonych wzrosty wartości wynosiły 73% ( $\rho_h = 0,05\%$ ) i 79% ( $\rho_h = 0,10\%$ ). Znajomość kątów odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania i modułów odkształcenia postaciowego muru jest niezbędna przy sprawdzaniu SGU konstrukcji. W myśl postanowień normy PN-B-03002:2007 [12], w przypadku konstrukcji niezbrojonych należy obliczyć maksymalne kąty odkształcenia postaciowego i sprawdzić czy nie przekraczają one wartości dopuszczalnych –  $\Theta_{adm}$  dla stanu pojawienia się rys o rozwarości 0,1÷0,3 mm (wykalibrowanych wg obszernych badań [7]). Istotnym wpływem zastosowanego zbrojenia było ograniczenie, w stosunku do elementów niezbrojonych, odkształceń postaciowych w chwili zarysowania  $\Theta_{cr}$ . Na rysun-

ku 4a przedstawiono porównanie uzyskanych w badaniach wartości kątów  $\Theta_{cr}$  wszystkich serii elementów i wartości dopuszczalnej równej  $\Theta_{adm} = 0,5$  mrad przyjętej w PN-B-03002:2007 dla muru niezbrojonego. Z wykresu wynika, że w murach zbrojonych, z wyjątkiem elementów wyłącznie ścinanych, wartość graniczna kąta  $\Theta_{adm}$  była mniejsza od uzyskanych w badaniach wartości kątów  $\Theta_{cr}$ . W związku z tym, przy braku stosownych uregulowań dla murów zbrojonych, operowanie wartościami  $\Theta_{adm}$  (zawartymi w PN-B-03002:2007) dla ścian zbrojonych wyłącznie ścinanych (ściany wypełniające) prowadzić może do niebezpiecznego niedoszacowania szerokości rozwarcia rys ukośnych. W normach PN-B-03002:2007 jak i PN-EN 1996-1-1, w przypadku modułu odkształcenia postaciowego  $G$ , nie podano zaleceń dla murów zbrojonych, ograniczając się do przypadków murów niezbrojonych. W polskiej normie moduł odkształcenia postaciowego muru niezbrojonego wyznacza się z zależności:

$$G_{cal} = (1 - \omega) \frac{E_y}{2(1 + \nu_{xy})} \quad (4)$$

w której  $\omega = 0,5$  (wg [7]) wyraża stopień uszkodzenia muru w chwili zarysowania w stosunku do wartości początkowej. Po przyjęciu wartości współczynnika odkształcalności poprzecznej równej  $\nu_{xy} = 0,25$ , mo-



dużo odkształcenia postaciowego obliczyć można jako  $G_{cal}=0,2E$ . Wpływ zmiany parametrów mechanicznych muru na wartość modułu odkształcenia postaciowego określono na podstawie badań analogicznie zbrojonych ścian ściśkanych, przeprowadzonych przez Drobca [8]. Określono współczynniki:  $\zeta=E_{yz}/E_{yN}$  i  $\nu=\nu_{yz}/\nu_{yN}$  będące ilorazami modułów sprężystości i współczynników odkształcalności poprzecznej muru zbrojonego i niezbrojonego ( $E_{yN} = 12140$  MPa – moduł sprężystości i  $\nu_{yN} = 0,23$  – współczynnik odkształcalności poprzecznej muru niezbrojonego w badaniach [8]). Wyniki obliczeń  $G_{cal}$  (dla  $E_y=3110$  MPa i  $\nu_{xy} = 0,122$ ) murów zbrojonych przedstawiono w tabeli 5, a porównanie z wartościami uzyskanymi w badaniach ścian ścinanych na rysunku 8. Lepszą zgodność wyników badań i obliczeń uzyskano w przypadku elementów zbrojonych kratowniczkami, natomiast  $G_{cal}$  murów z prętami znacznie przekraczały wartości empiryczne. Zaobserwowane rozbieżności związane są ze różni-

cowanym wpływem typu zbrojenia na parametry muru. Zbrojenie w postaci prętów powodowało znaczną redukcję modułu sprężystości, natomiast kratowniczki – redukcję odkształceń poprzecznych muru. Drugą przyczyną obserwowanych różnic jest nieuwzględnienie redukcji modułu spowodowanego narastaniem uszkodzeń, jak to ma miejsce w murach niezbrojonych serii HC, w których po uwzględnieniu  $\omega=0,5$  uzyskano zadowalającą zbieżność  $G_{cal}$  z wynikami badań – rys. 8.

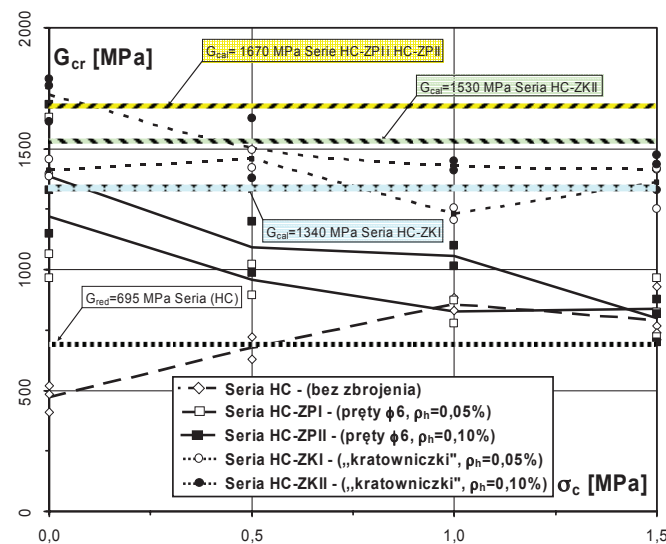
5. Podsumowanie

Stosując zbrojenie na poziomie minimalnym wg norm PN-B-03002:2007 [12] i PN-EN-1996-1-1 wynoszącym 0,1% lub mniejszym równym 0,05%, w stosunku do elementów niezbrojonych uzyskano:

- korzystny wpływ zbrojenia na badane wielkości z tym, że efektywność zbrojenia nie była proporcjonalna do procentu zbrojenia,
- wzrost wartości pionowych naprężeń ściskających  $\sigma_c$  powodował wzrost naprężeń rysujących  $\tau_{cr}$

Tabela 5. Wartości obliczonych modułów odkształcenia postaciowego murów zbrojonych

Seria	Wartości ilorazów wg badań Drobca [6]		$G_{cal} = \frac{\zeta \cdot E_y}{2(1 + \nu \cdot \nu_{xy})}$ [MPa]
	$\zeta = E_{yz} / E_{yN}$	$\nu = \nu_{yz} / \nu_{yN}$	
HC-ZPI	1,19	0,87	1670
HC-ZPII	1,20	1,00	1670
HC-ZKI	0,94	0,78	1340
HC-ZKII	1,07	0,70	1530



Rys. 8. Porównanie obliczonych i uzyskanych z badań wartości  $G$

i niszczących  $\tau_u$ , mała natomiast korzystny wpływ zbrojenia w stosunku do murów „świadków”,

- wpływ zbrojenia na wartości naprężeń  $\tau_{cr}$  był największy w murach wyłącznie ścinanych przy  $\sigma_c = 0$  i wynosił przy ( $\rho_h=0,05\% \div 0,1\%$ ) w stosunku do elementów „świadków” 30%÷40% w ścianach z prętami i 115%÷120% w ścianach z „kratowniczkami”. Przy  $\sigma_c=1,5$  MPa wpływ ten w murach z prętami okazał się nieistotny, a w murach z „kratowniczkami” wynosił 40%,
- obniżenie wartości kątów odkształcenia postaciowego –  $\Theta_{cr}$  o 50% w elementach z prętami i 40% w murach z kratowniczkami (przy  $\sigma_c=0$ ) i 20% w murach z kratowniczkami ścinanych przy  $\sigma_c=1,5$  MPa,
- wzrost wartości modułów odkształcenia postaciowego  $G_{cr}$  w chwili zarysowania o ~200% w murach z prętami i o ~260%, kiedy stosowano kratowniczki (przy  $\sigma_c=0$ ),
- również najkorzystniejszy efekt zastosowanego zbrojenia na wartość naprężeń niszczących  $\tau_u$  uzyskano w modelach wyłącznie ściśkanych, wtedy w stosunku do murów bez zbrojenia wzrosły wartości  $\tau_u$  i wynosiły 45% w murach z prętami oraz 100%, kiedy stosowano „kratowniczki”. W elementach ściśkanych przy  $\sigma_c=1,5$  MPa zbrojonych prętami uzyskano 3÷20%, „kratowniczkami” 30% wzrost wartości naprężeń w stosunku do murów „świadków”,
- wzrost kątów deformacji postaciowej –  $\Theta_u$  przy naprężeniach ściskających równych  $0 < \sigma_c \leq 1,5$  MPa, a przy  $\sigma_c=0$  obniżenie wartości  $\Theta_u$  o 50% w murach z prętami i o 40% w murach z kratowniczkami,
- uzyskane wartości współczynnika wykorzystania zbrojenia  $w < 1$  w murach z prętami i  $w > 1$  w murach z „kratowniczkami”, sugerują zróżnicowanie, zależnie od typu zbrojenia, wartości „w” przyjmowanego w normach projektowania. Stwierdzono ponadto, że:



- kąty odkształcenia postaciowego –  $\Theta_{cr}$  murów zbrojonych ścinanych przy  $\sigma_c = 0$  były zbliżone (kratowniczki) lub 30% mniejsze (pręty) od wartości granicznej zawartej w PN-B-03002:2007 równej  $\Theta_{adm} = 0,5$  mrad przyjmowanej dla murów niezbrojonych,
- wartości modułów odkształcenia postaciowego murów zbrojonych, obliczone z pominięciem stopnia uszkodzeń odbiegały od wartości uzyskanych empirycznie.

**BIBLIOGRAFIA**

[1] Scrivener J. C., Static Racking Tests on Concrete Masonry Walls. Designing Engineering and Construction with Masonry Product. International Conference on Masonry Structural System. Texas, Austin 1969, s. 185–191  
 [2] Sanpaelesi L., Cieni P., Experimental Analysis of a Reinforced Masonry Tipology Under Static and Cyclic Loadings to be Used in Seismic Areas. Third International CIB Symposium Wall Structures. Warszawa, czerwiec 1984, Vol. II, s. 323–330  
 [3] Xingzahi C., Jinguo L., Jiang X., Shear Strength of Brick Masonry with Reinforced Networks in Bed Joints Subject to Combined Actions. Proceedings of

9th International Brick / Block Masonry Conference. Berlin, October 1991, s. 458–464  
 [4] Ernst M., Tests of Reinforced Masonry Walls Subjected to in-Plane Loading. Darmstadt Concrete. No. 10. 1995, s. 131–143  
 [5] Jasiński R., Nośność i odkształcalność zbrojonych ścian murowych ścinanych poziomo. Rozprawa doktorska. Gliwice 2005  
 [6] Jasiński R., Badania zbrojonych ścian ceglanych ścinanych poziomo. Monografia pod redakcją Mirosława Brodniewicza i Jolanty Anny Prusiel: Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa, tom II, Konstrukcje Budowlane i Inżynierskie. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 2007, s. 339–346  
 [7] Kubica J., Niezbrojone ściany murowe poddane odkształceniom postaciowym wywołanym nierównomiernymi pionowymi przemieszczeniami podłoża. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Budownictwo, Z. 96. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2003  
 [8] Drobiec Ł., Analiza murów z cegły pełnej ze zbrojeniem w spoinach wspornych poddanych obciążeniom pionowym. Rozprawa doktorska. Gliwice 2004  
 [9] PN-EN 845-3:2003: Specyfikacja wyrobów dodatkowych do murów. Część 3: Stalowe zbrojenie do spoin wspornych. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2003

[10] PN-B-03340 / Az1: Konstrukcje murowe zbrojone. Projektowanie i obliczanie. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1999  
 [11] PN-EN-1996-1-1:2005 – Eurokod 6 – Projektowanie konstrukcji murowych – Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.  
 [12] PN-B-03002:2007 Konstrukcje murowe. Projektowanie i obliczanie. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2007  
 [13] SNIP II-22-81 Строительные нормы и правила. Каменные и армокаменные конструкции. Москва 2000  
 [14] GBJ-68-84 Uniform Standard for Building Structural Design. Beijing 1984  
 [15] BSSC, NEHRP: Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings. Part 1. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C. Report No. FEMA-302, 337 p. 1998  
 [16] NZS 4230:1990: Code of Practice for the Design of Masonry Structures. Standard Association of New Zealand. Wellington 1990

# Seminaria

## styczeń-październik 2009



**ENERGOOSZCZĘDNOŚĆ**



- WARSZAWA
- KIELCE
- RZESZÓW
- KATOWICE
- GLIWICE

- ☛ Akty prawne, wymagania techniczne obiektów.
- ☛ Nowoczesne formy pozyskiwania energii.
- ☛ Energooszczędne materiały budowlane.
- ☛ Zarządzanie energią, paszporty energetyczne budynków.




[www.infoinvest.pl](http://www.infoinvest.pl)

Info-Inwest Sp. z o.o.: 01-347 Warszawa, ul. Gabriela 4, lok. 1  
 tel.: 0 22 664 44 44. e-mail: [redakcja@infoinvest.pl](mailto:redakcja@infoinvest.pl)