

# Stan graniczny użyteczności w konstrukcjach murowych – przepisy normowe i wyniki badań

Dr hab. inż. Łukasz Drobiec, prof. Pol. Śl., dr inż. Radosław Jasiński,  
dr inż. Adam Piekarczyk, Politechnika Śląska

## 1. Wprowadzenie

Stan graniczny użyteczności SGU (z ang. *serviceability limit states* – SLS) to drugi stan graniczny metody stanów granicznych stosowanej obecnie przy wymiarowaniu większości konstrukcji, w tym i konstrukcji murowych. Norma PN-EN 1990 [1] definiuje stany graniczne użyteczności jako stany odpowiadające warunkom, po przekroczeniu których konstrukcja lub jej element przestają spełniać stawiane im wymagania użytkowe. Oznacza to, że stany graniczne użyteczności dotyczą spełnienia funkcji konstrukcji w trakcie eksploatacji, komfortu użytkowników oraz wyglądu.

W normie murowej PN-EN 1996-1-1 [2] nie podano żadnych szczegółowych zaleceń ani wzorów dotyczących obliczeniowego sprawdzania stanu granicznego użyteczności. Założono, że konstrukcje murowe niezbrojone spełniające stan graniczny nośności nie wymagają sprawdzenia stanu granicznego użyteczności. Jak pokazuje praktyka budowlana oraz liczne wyniki badań, założenie takie nie zawsze jest bezpieczne.

W niniejszej pracy opisano wyniki badań murowanych ścian z cegły pełnej, autoklawizowanego betonu komórkowego i z elementów silikatowych oraz odniesiono je do zapisów normowych. Analizowano zarysowanie ścian, które jest podstawowym przypadkiem SLS w konstrukcjach murowych.

## 2. Ustalenia przyjęte w EC-6

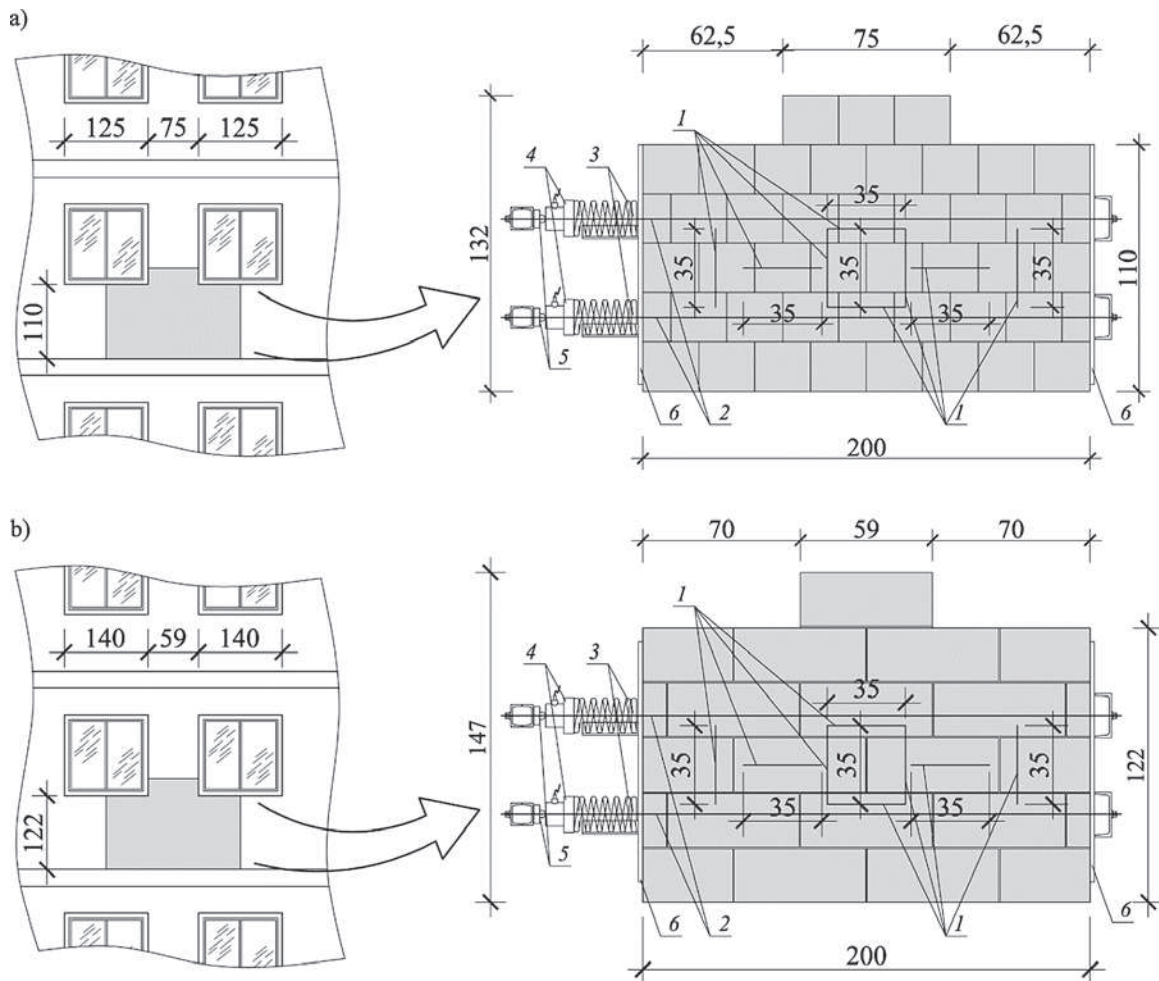
Norma PN-EN 1996-1-1 [2] w jednym ze swych pierwszych zapisów dotyczących stanu granicznego użyteczności postanawia, że konstrukcje murowe należy obliczać i konstruować z zapewnieniem nieprzekroczenia stanu granicznego użyteczności. Zaleca się sprawdzać ugięcia, które mogą wywierać negatywny wpływ na przegrody, wykończenie (włączając dodatkowe materiały), sprzęt techniczny lub mogą pogarszać szczelność przegrody. W EC6 wyraźnie stwierdzono, że użyteczność murowych elementów konstrukcyjnych nie może być pogorszona przez zachowanie się innych elementów konstrukcyjnych, jak ugięcia stropów lub ścian. Norma nie definiuje jednak zasad sprawdzania tych ugięć ani nie podaje wartości granicznych ugięć konstrukcji, na których ściany mają być wykonane. Wobec tego wydaje się, że projektant powinien odwołać się do zapisów normy PN-EN 1992-1-1 [3].

Zgodnie z EC6 konstrukcje murowe niezbrojone spełniające stan graniczny nośności nie wymagają sprawdzenia stanu granicznego użyteczności. Jest to bardzo ważny zapis w normie, który w zasadzie zwalnia projektanta od konieczności sprawdzania stanu granicznego użyteczności. Norma [2] odnośnie powyższego zapisu podaje pewne informacje dodatkowe i ograniczenia. Zastrzega ona, że niektóre zarysowania mogą wystąpić nawet wtedy, gdy spełniony jest stan graniczny nośności. Ogólnie stwierdza się, że ściany murowe nie powinny ugiąć się nadmiernie pod obciążeniem wiatrem lub przypadkowym oddziaływaniem osób, a także nieproporcjonalnie do obciążeń wyjątkowych. W wypadku ścian obciążonych prostopadle do swojej powierzchni oprócz spełnienia wymagań stanu granicznego nośności norma wymaga dodatkowo ograniczenia wymiarów ściany. Ograniczenie takie można przyjąć zgodnie z wykresami zamieszczonymi w Załączniku F [2].

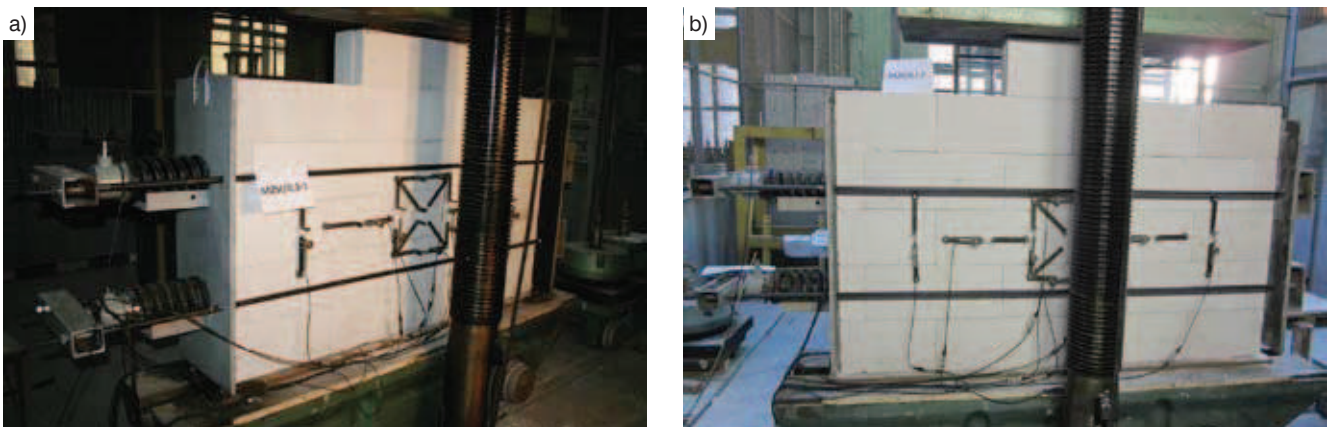
## 3. Badania strefy podokiennej muru

Strefa podokienna muru jest miejscem koncentracji naprężeń, które szczególnie narażone jest na wystąpienie zarysowań. W pracach [4, 5, 6] zaprezentowano wyniki badań strefy podokiennej murów wykonanych z elementów silikatowych i z bloczków z betonu komórkowego, wzniesionych na cienkowarstwowych zaprawach systemowych. Badania prowadzono w prasie hydraulicznej o zakresie 6000 kN. W celu realizacji badań konieczne było zaprojektowanie i wykonanie oporowo-ciężnowego układu stalowego, którego zadaniem było wywołanie poziomych sił, jakie powstają w odcinkach muru pod wpływem ograniczania jego odkształcenia w kierunku długości ściany. Kształt modeli badawczych nawiązuje do geometrii strefy podokiennej. Modele te przyjęto w taki sposób, aby odwzorować pracę filarka o szerokości 0,75 m (mur z silikatów) i 59 cm (mur z bloczków z betonu komórkowego), usytuowanego między dwoma oknami o szerokości odpowiednio 1,25 m i 1,4 m. Schemat ideowy badania oraz wymiary modelu pokazano na rysunku 1, natomiast model w stanowisku badawczym na rysunku 2.

Badaniu poddano 6 modeli z elementów silikatowych i osiem modeli z betonu komórkowego. Serię murów niezbrojonych silikatowych oznaczono literami **MN** oraz cyframi w układzie 0,X-X, z których pierwsza 0,X oznacza wielkość poziomych



**Rys. 1.** Model do badań strefy podokiennej: a) modele z elementów silikatowych, b) modele z bloczków z betonu komórkowego, 1 – baza pomiaru przemieszczeń, 2 – cięgna sprężające, 3 – sprężyny w prowadnicach, 4 – siłomierze, 5 – łożysko kuliste, 6 – blachy odporowe



**Rys. 2.** Widok modeli z elementów silikatowych (a) i z bloczków z betonu komórkowego (b) w stanowisku badawczym

naprężeń ściskających w MPa (stosowano cztery wielkości poziomych naprężeń krępujących 0,1; 0,2; 0,4), a druga to numer kolejnego modelu serii. Mury z bloczków betonu komórkowego badano z wypełnionymi i niewypełnionymi spoinami czołowymi. Serię murów z niewypełnionymi spoinami czołowymi oznaczono jako **BKN**, natomiast z wypełnionymi

spoinami czołowymi jako **BKNN**. Podobnie jak w wypadku murów z elementów silikatowych zastosowano również oznaczanie cyframi w układzie 0,X-X, z których pierwsza 0,X oznacza wielkość poziomych naprężeń ściskających w MPa. W wypadku murów z betonu komórkowego badania prowadzono przy naprężeniach poziomych rzędu 0, i 0,2 MPa.

**Tabela 1.** Wyniki badań modeli strefy podokiennej

Symbol serii i modelu		Naprężenie maksymalne $\sigma_{max}$ MPa	Naprężenie rysujące $\sigma_{cr}$ MPa	$\sigma_{cr}/\sigma_{max}$	Średnia wartość $\sigma_{cr}/\sigma_{max}$
<b>MN</b> Mury z elementów silikatowych z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MN/0,1-1	10,14	4,07	0,40	0,395
	MN/0,1-2	9,57	3,70	0,39	
	MN/0,2-1	11,56	4,89	0,42	0,43
	MN/0,2-2	10,67	4,67	0,44	
	MN/0,4-1	8,81	3,56	0,40	0,415
	MN/0,4-2	9,04	3,85	0,43	
<b>BKN</b> Mury z betonu komórkowego z wypełnionymi spoinami czołowymi	BKN/0,1-1	3,06	2,64	0,86	0,9
	BKN/0,1-2	2,95	2,78	0,94	
	BKN/0,2-1	3,88	3,58	0,92	0,9
	BKN/0,2-2	3,83	3,39	0,89	
<b>BKNN</b> Mury z betonu komórkowego z niewypełnionymi spoinami czołowymi	BKNN/0,1-1	2,57	2,26	0,88	0,92
	BKNN/0,1-2	2,67	2,54	0,95	
	BKNN/0,2-1	3,16	2,92	0,92	0,93
	BKNN/0,2-2	3,04	2,85	0,94	

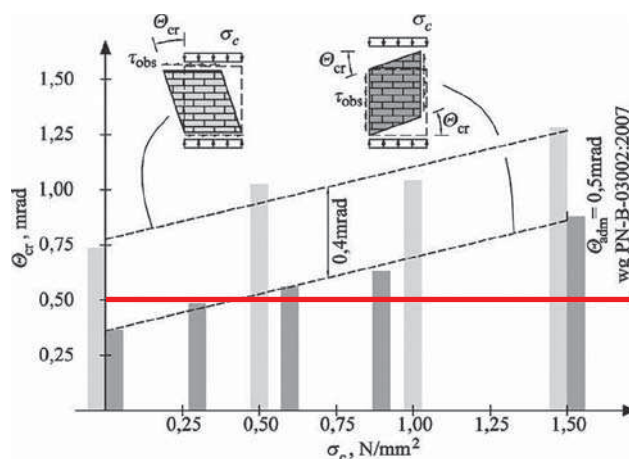
Porównanie naprężeń rysujących w badanych modelach zamieszczono w tabeli 1. W murach z elementów silikatowych zarysowania występują już na poziomie około 40% naprężeń niszczących. Największe naprężenia niszczące i rysujące uzyskano przy poziomym naprężeniu równym 0,2 MPa.

W murach z bloczków z betonu komórkowego zaobserwowano wpływ wypełnienia spoin czołowych na poziom naprężeń rysujących i niszczących. Mury z wypełnionymi spoinami czołowymi rysowały się i niszczyły później niż podobne modele z niewypełnionymi spoinami pionowymi. Rysy w modelach z wypełnionymi spoinami występowały na poziomie 0,9 naprężeń niszczących, a w modelach z niewypełnionymi spoinami na poziomie 0,92 naprężeń niszczących. Podobnie jak w wypadku murów z silikatów większe wartości naprężeń niszczących i rysujących uzyskiwano przy poziomym naprężeniu równym 0,2 MPa. Zmiana wartości naprężeń poziomych nie miała jednak istotnego wpływu na stosunek naprężeń rysujących do niszczących w modelach z wypełnionymi i niewypełnionymi spoinami czołowymi.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zarysowanie strefy podokiennej w niezbrojonych murach z elementów silikatowych wystąpiło na poziomie około 40% naprężenia niszczącego, natomiast w murach z ABK na poziomie około 90% naprężenia niszczącego. W pracach [7 i 8] przeprowadzono analizę i stwierdzono, że zarysowania strefy podokiennej muru mogą wystąpić w ścianach z silikatów, gdy siła pionowa działająca na ścianę murową (filarek międzykierunek) stanowi więcej niż 70% nośności tej ściany. W ścianach z bloczków z betonu komórkowego, przy ich poprawnym zaprojektowaniu, zarysowanie zaś wystąpić nie powinno.

#### 4. Badania ścian ścinanych

Rozpoznanie zachowania się ścian poddanych ścinaniu pełni istotną funkcję w analizach ścian usztywniających ze względu na obciążenia poziome jak i pionowe. W latach dziewięćdziesiątych XX wieku stworzono w Polsce metodę analizy wytrzymałości



**Rys. 3.** Porównanie uzyskanych w badaniach Jasińskiego i Piekarczyka [10, 11, 12] wartości kątów odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania ścian z cegły pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej 1:1:6 ścinanych poziomo i pionowo

konstrukcji murowej przez analizę stanu odkształcenia, wykorzystywaną głównie do analizy zachowania się ścian podlegających nierównomiernym deformacjom podłoża gruntowego. Metoda opracowana została na podstawie wieloletnich badań różnych typów niezbrojonych ścian poddanych pionowemu ścinaniu i implementowana do normy PN-B-03002:2007 [10]. U podstaw metody leży założenie, że odkształcenia postaciowe  $\theta$  w żadnym obszarze ściany nie mogą przekroczyć wartości granicznych ( $\theta_{adm}$ ) przy których powstają rysy wywołane ścinaniem o akceptowalnej z punktu widzenia użyteczności szerokości 0,1–0,3 mm. Mimo że wartości graniczne  $\theta_{adm}$  zostały określone w badaniach ścian przy pionowym wymuszeniu ścinającym, to znakomicie sprawdzają się także w wypadku, gdy wymuszenie zorientowane jest równoległe do spoin wspornych. Jak wykazały porównawcze badania Jasińskiego i Piekarczyka [11, 12, 13] ścian wykonanych z cegły pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej 1:1:6, odkształcenia

postaciowe ścian ścinanych poziomo i pionowo w chwili zarysowania są istotnie różne. Uzyskane wyniki badań wraz z dopuszczalnymi kątami odkształcenia postaciowego  $\theta_{adm}$  pokazano na rysunku 3.

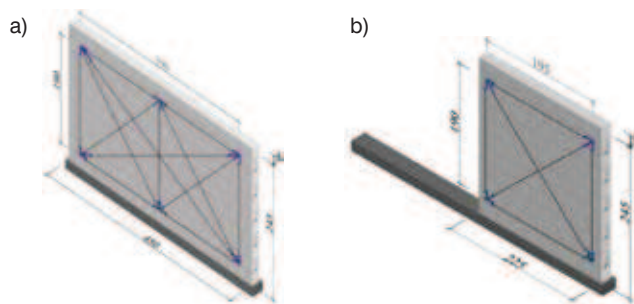
Odształcenia przy ścinaniu poziomym rosły ze wzrostem wstępnych naprężeń ściskających i były około 0,4 mrad większe niż w elementach ścinanych pionowo. Sądzić więc można, że przyjęte w Polsce wartości graniczne kątów odkształcenia postaciowego w sytuacji ścinania poziomego są zbyt asekuracyjne przy takim typie zastosowanych materiałów.

Oprócz ścian z cegły pełnej prowadzono także badania odkształcalności niezbrojonych ścian różnych kształtów poddanych ścinaniu wykonanych z silikatowych elementów murowych [15, 16, 17] oraz elementów murowych z ABK [15, 18].

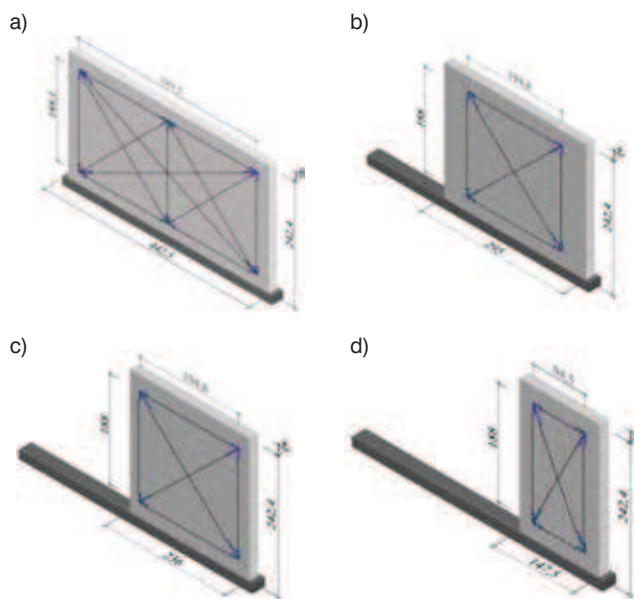
W przypadku ścian z silikatowych elementów murowych przedmiotem badań było 6 ścian, które podzielono na dwie serie oznaczone umownie jako HOS i HOS-H, w ramach których zróżnicowano gabaryty elementów. Zewnętrzne wymiary 3 ścian serii HOS (rys. 4a) były takie same równe  $l = 4,50$  m,  $h = 2,45$  m ( $h/l = 2,45$  m/4,50 m), a grubość wynosiła  $t = 180$  mm. W ramach serii HOS zbadano 3 ściany bez zbrojenia przy trzech różnych wartościach wstępnych naprężeń ściskających wynoszących  $\sigma_c = 0; 0,1; 1,5$  N/mm<sup>2</sup>. Elementy badawcze HOS-H (rys. 4b) wykonano jako niezbrojone o długości równej  $l = 2,25$  m wysokości  $h = 2,45$  m ( $h/l = 2,45$  m/2,25 m) i grubości  $t = 0,18$  m. Ściany badano przy wstępnych naprężeniach ściskających równych  $\sigma_c = 0,1; 0,75; 1,5$  N/mm<sup>2</sup> – rysunek 4.

Z kolei w przypadku ścian z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) zbadano 13 ścian. Identycznie jak w ścianach z elementów silikatowych wszystkie ściany miały grubość 0,18 m, w których nie wypełniono spoin czołowych. Ściany podzielono na cztery serie oznaczone umownie jako HOS-AAC, HOS-AAC-2/3, HOS-AAC-0/5 i HOS-AAC-1/3, w ramach których zróżnicowano gabaryty elementów. Zewnętrzne wymiary wszystkich ścian trzech pierwszych serii były takie same równe  $l = 4,43$  m,  $h = 2,43$  m, a grubość wynosiła  $t = 180$  mm. W ramach serii HOS-AAC zbadano 4 ściany bez zbrojenia (rys. 5a). Ściany niezbrojone serii HOS-AAC zbadano przy trzech różnych wartościach wstępnych naprężeń ściskających wynoszących  $\sigma_c = 0,1; 0,75; 1,0$  N/mm<sup>2</sup>. W trakcie badań jednego elementu ścinanego maksymalnie doszło do przedwczesnego zarysowania wywołanego pierwotnie założonymi naprężeniami ściskającymi równymi 1,5 N/mm<sup>2</sup>. W efekcie maksymalne naprężenia zastosowane w badaniach ścian niezbrojonych i zbrojonych określono na poziomie 1,0 N/mm<sup>2</sup>. Elementy badawcze pozostałych serii miały identyczną grubość i niewypełnione spoiny czołowe, zredukowano długość w stosunku do elementów serii HOS-AAC o 30%, 50% i 60%. Modele należące do serii HOS-AAC-2/3 (rys. 5b) miały długość równą  $l = 2,95$  m i wysokości  $h = 2,43$  m, natomiast długość modeli serii HOS-AAC-0/5 (rys. 5c) i HOS-AAC-1/3 (rys. 5d) wynosiła odpowiednio 2,36 m i 1,48 m. W ramach każdej serii zbadano po 3 elementy przy wstępnych naprężeniach ściskających równych  $\sigma_c = 0,1; 0,75$  i 1,0 N/mm<sup>2</sup>.

Porównanie wartości kątów odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania i kątów deformacji postaciowej w chwili



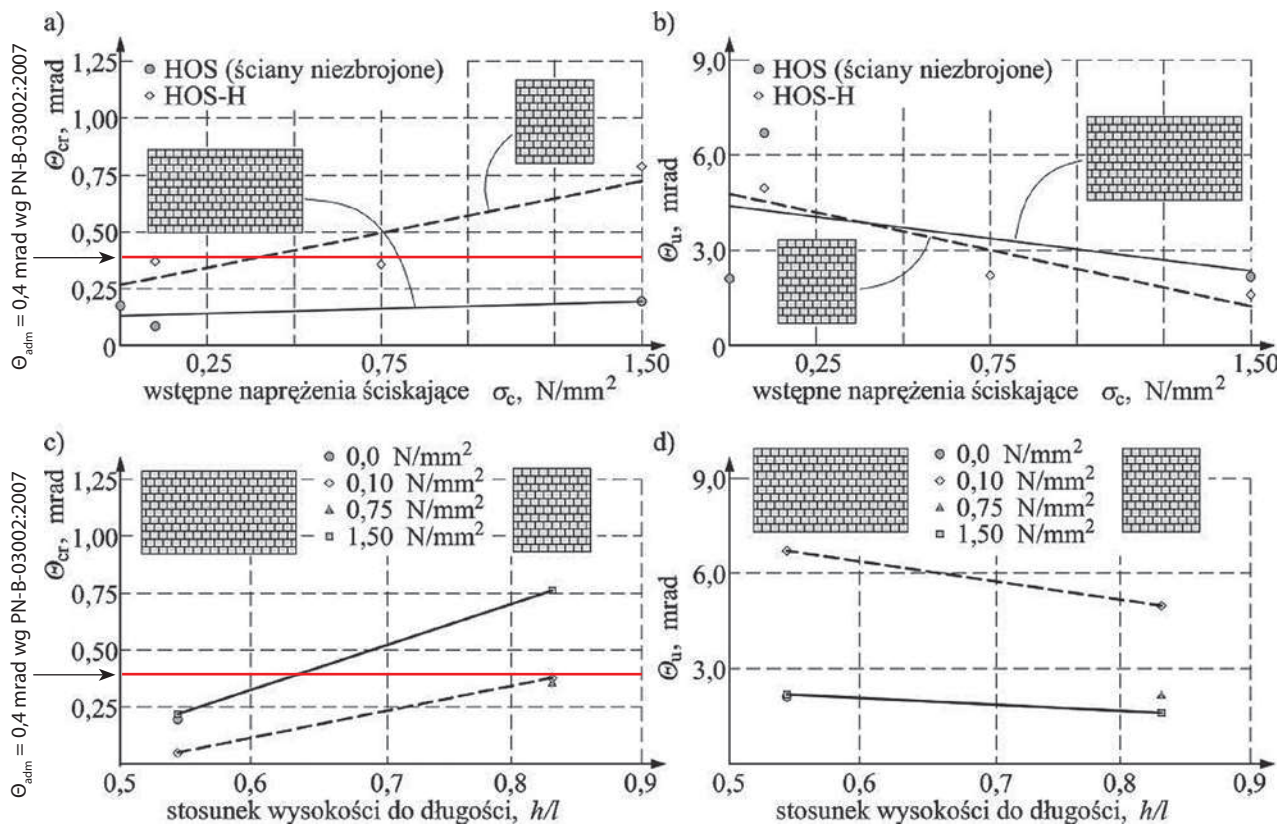
**Rys. 4.** Geometria modeli: a) ściany serii HOS długości 4,5 m, b) ściany serii HOS-H długości 2,25 m



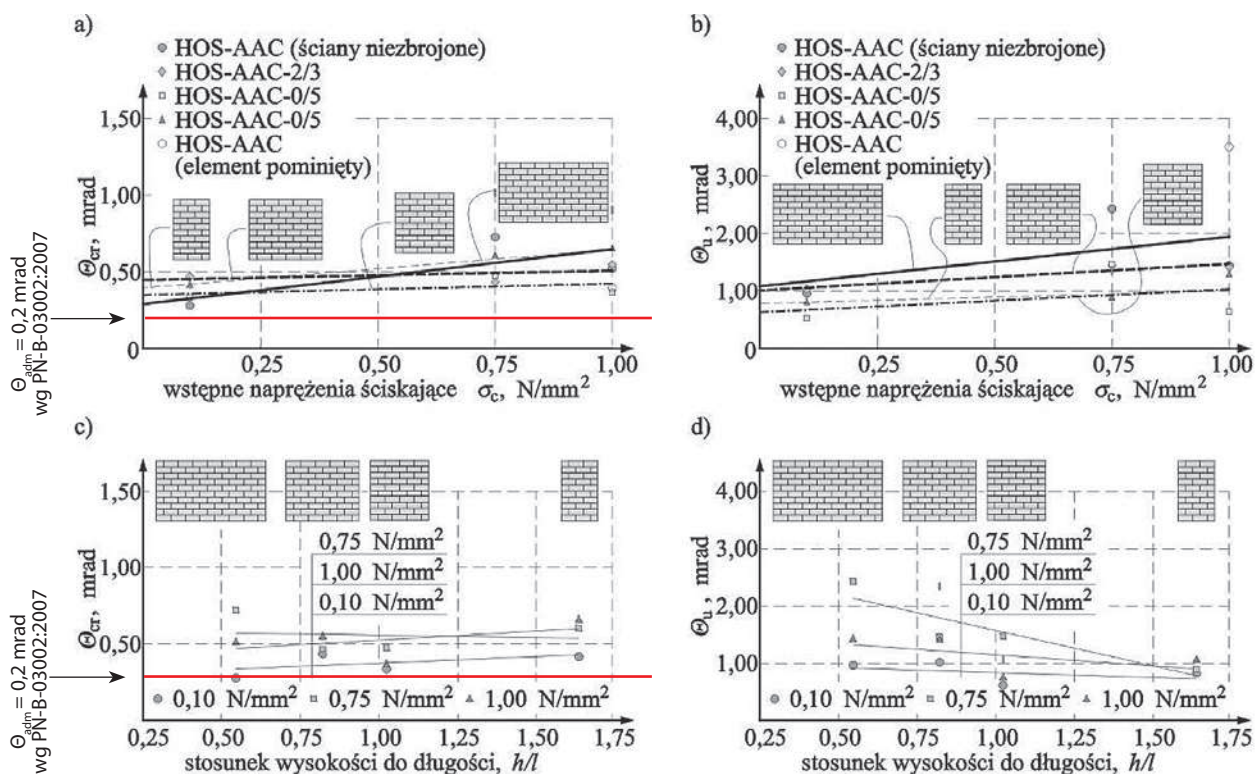
**Rys. 5.** Geometria modeli wykonanych z elementów murowych z ABK wykorzystanych w badaniach części podstawowej: a) ściany niezbrojone, zbrojone kratowniczkami stalowymi i siatkami z tworzywa sztucznego długości 4,43 m, b) niezbrojone ściany długości 2,95 m, c) niezbrojone ściany długości 2,36 m, d) niezbrojone ściany długości 1,48 m

zniszczenia wszystkich ścian z silikatowych elementów murowych przedstawiono na rysunku 6.

W ścianach najmniejszej długości przy zerowych naprężeniach ściskających, ekstrapolacyjnie określony kąt odkształcenia postaciowego wynosił około 0,25 mrad. Wzrost wstępnych naprężeń ściskających wywołał wyraźny wzrost odkształceń postaciowych  $\theta_{cr}$  do wartości rzędu 0,75 mrad w ścianie maksymalnie ściskanej. W ścianach referencyjnych ścinanych bez udziału maksymalnych naprężeń ściskających odkształcenia postaciowe wynosiły około 0,1 mrad, a wzrost wartości wstępnych naprężeń ściskających nie wywołał istotnego wzrostu odkształceń postaciowych. W chwili zniszczenia kąty deformacji postaciowej  $\theta_u$  malały ze wzrostem wartości wstępnych naprężeń ściskających. Przy naprężeniach rzędu 0,1 N/mm<sup>2</sup> zniszczenie obserwowano przy deformacjach rzędu ~4,5 mrad. Natomiast przy maksymalnych naprężeniach ściskających 1,5 N/mm<sup>2</sup> deformacje postaciowe osiągały wartość około 2 mrad.



**Rys. 6.** Zestawienie uzyskanych wartości kątów odkształcenia i deformacji postaciowej w chwili zarysowania i zniszczenia wszystkich zbadanych ścian z silikatowych elementów murowych w zależności od wartości  $\sigma_c$  i kształtu ściany: a), c) kąty odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania –  $\Theta_{cr}$ , b), d) kąty deformacji postaciowej w chwili zniszczenia –  $\Theta_u$



**Rys. 7.** Zestawienie uzyskanych wartości kątów odkształcenia i deformacji postaciowej w chwili zarysowania i zniszczenia wszystkich zbadanych ścian z elementów murowych z ABK w zależności od wartości  $\sigma_c$  i kształtu ściany: a), c) kąty odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania –  $\Theta_{cr}$ , b), d) kąty deformacji postaciowej w chwili zniszczenia –  $\Theta_u$

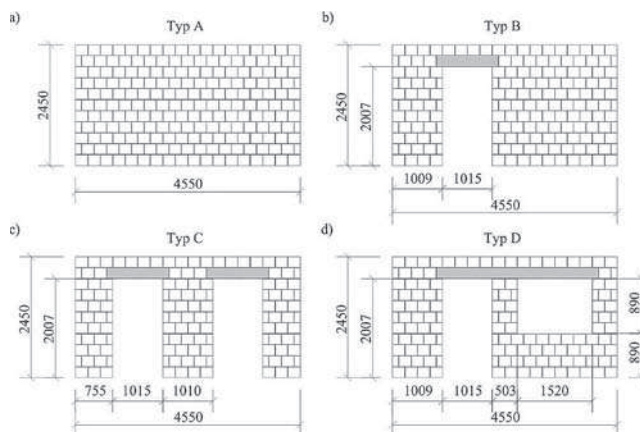
Porównanie wartości kątów odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania i kątów deformacji postaciowej w chwili zniszczenia wszystkich rodzajów ścian z elementów murowych z ABK przedstawiono na rysunku 7.

Analogicznie jak w wypadku ścian z silikatowych elementów murowych wstępne naprężenia ściskające powodowały wzrost wartości kątów odkształcenia. W chwili zarysowania najmniejsze odkształcenia (0,3 mrad) zaobserwowano w ścianach o największej długości. Natomiast ściany o największej smukłości rysowały się przy największych odkształceniach postaciowych –  $\theta_{cr}$ . Przy największych naprężeniach ściskających największe kąty odkształcenia postaciowego wystąpiły w ścianach większej długości. W chwili zniszczenia kąty deformacji postaciowej ścian minimalnie ściskanych były niemal identyczne rzędu 1,0 mrad. Wzrost wartości wstępnych naprężeń ściskających spowodował wyraźny wzrost deformacji postaciowych. W ścianach referencyjnych zniszczenie obserwowano przy deformacjach rzędu 2,0 mrad. Zmniejszenie długości ściany powodowało, że deformacje w chwili zniszczenia wyraźnie malały, osiągając 1,0 mrad w ścianach o największej smukłości.

Wykazany w badaniach ścian z cegły pełnej wpływ wstępnych naprężeń ściskających potwierdził się również w badaniach ścian z silikatowych elementów murowych oraz ścian z elementów murowych z ABK. Zaobserwowano wzrost wartości kątów odkształcenia postaciowego w chwili zarysowania  $\theta_{cr}$ . Oprócz tego istotny okazał się również kształt ściany wyrażony przez proporcje wysokości i długości ( $h/l$ ). Wydaje się, że ściany krępe, w których długość jest większa od wysokości, ulegają zarysowaniu przy mniejszych odkształceniach postaciowych niż ściany smuklejsze. Otrzymane wartości kątów deformacji postaciowej w chwili zniszczenia były wielokrotnie większe od otrzymanych w chwili zarysowania  $\theta_u$  i podobnie jak w chwili zarysowania rosły ze wzrostem wartości wstępnych naprężeń ściskających. Z kolei ze wzrostem smukłości ściany wartości kątów deformacji postaciowej wyraźnie malały. Efekt ten tłumaczyć należy wpływem zginania ścian w płaszczyźnie i udziałem przemieszczeń giętnych.

## 5. Badania ścian poddanych przemieszczeniom pionowym

Wyniki badań opisanych w opracowaniu [9] i publikacji [14] dotyczyły badań ścian pełnych oraz z otworami w skali naturalnej, które wymurowano na stalowej belce ulegającej ugięciu wraz ze wzrostem obciążeń przyłożonych poprzez żelbetowy wieniec do górnej krawędzi ściany. Badano ściany o długości 4550 mm i wysokości 2450 mm wykonane z bloczków silikatowych grupy 1 o wymiarach 250×180×220 mm i wytrzymałości średniej na ściskanie 17,7 N/mm<sup>2</sup> oraz wytrzymałości znormalizowanej  $f_b = 21,8$  N/mm<sup>2</sup>. Elementy badawcze miały cienkie spoiny wsporne i niewypełnione spoiny pionowe. Do wykonania ścian użyto zaprawy projektowanej do cienkich spoin o średniej wytrzymałości na ściskanie  $f_m = 12,5$  N/mm<sup>2</sup>. Badano ściany pełne typu A, bez otworów (rys. 8a), ściany typu B z jednym otworem drzwiowym umieszczonym niesymetrycznie w stosunku do osi pionowej (rys. 8b), elementy



**Rys. 8.** Ściany oparte na odkształcającej się podporze badane przez Piekarczyka [9] i [14]: a) typu A bez otworów, b) typu B z jednym otworem drzwiowym, c) typu C z dwoma otworami drzwiowymi, d) typu D z otworem drzwiowym i okiennym

próbne typu C z dwoma otworami drzwiowymi rozmieszczonymi symetrycznie (rys. 8c) oraz ściany typu D z otworem drzwiowym i okiennym (8d). Nad otworami w ścianach typu B i C umieszczono jednoprzęsłowe prefabrykowane nadproża żelbetowe o przekroju 180×220 mm, natomiast nad otworami w ścianie typu D nadproże było ciągłe. Długości nadproży ustalono tak, aby długość ich oparcia nie była mniejsza niż 125 mm.

W każdej serii badawczej, czyli dla elementów próbnych danego typu przeprowadzono badania łącznie czterech ścian, w tym dwóch ścian bez zbrojenia, jednej zbrojonej zgrzewanym stalowym zbrojeniem prefabrykowanym w postaci kratownicy i jednej zbrojonej siatkami z tworzywa sztucznego. Zbrojenie umieszczano w każdej spoinie wspólnej muru na całej długości ścian. Wykonano badania łącznie 16 ścian. Program badań przedstawiono w tabeli 2.

Zbrojenie stalowe składało się z pasów o przekroju prostokątnym szerokości 8 mm i grubości 1,5 mm i krzyżulców wykonanych z drutu o średnicy 1,5 mm o przekroju okrągłym. Całkowita szerokość zbrojenia stalowego wynosiła 140 mm. Krzyżulce zbrojenia były zgrzane z pasami co 400 mm z przesunięciem węzłów na pasie górnym i dolnym wynoszącym 200 mm. Zbrojenie stalowe było zabezpieczone przed korozją przez ocynkowanie w ilości minimum 70 g/m<sup>2</sup>. Płaskowniki, z których wykonano pasy zbrojenia stalowego, charakteryzowały się naprężeniem przy przyroście nieproporcjonalnym 0,2% równym 685 N/mm<sup>2</sup>, wytrzymałością na rozciąganie 716 N/mm<sup>2</sup> i całkowitym procentowym wydłużeniem przy największej sile równym 3,3%. Parametry drutu stalowego zastosowanego do krzyżulców wynosiły odpowiednio 821 N/mm<sup>2</sup>, 856 N/mm<sup>2</sup> i 3,9%.

Siatki z włókien szklanych miały kwadratowe oczka o wymiarach 5×5 mm. Wytrzymałość na rozciąganie wątku w postaci dwóch okrągłych splotów o średnicy około 0,3 mm wynosiła średnio 672 N/mm<sup>2</sup>, natomiast wytrzymałość osnowy o przekroju prostokątnym 1,5×0,22 mm był równa średnio 227 N/mm<sup>2</sup>.

**Tabela 2.** Program badań ścian opartych na odkształcającej się podporze [9] i [14]

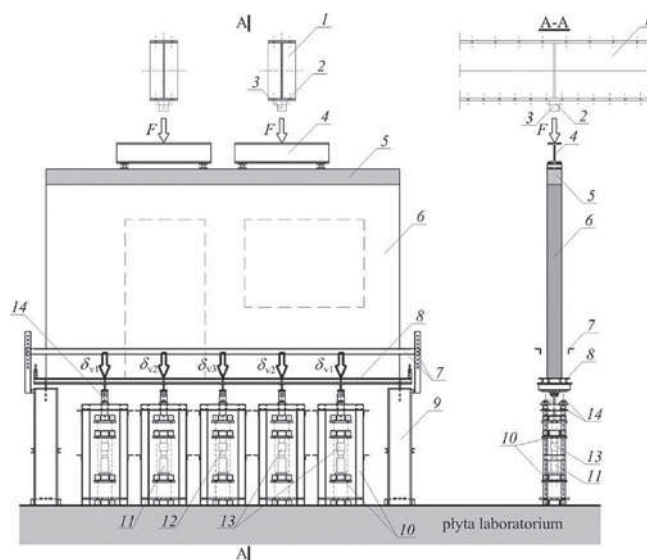
Typ ściany	Oznaczenie elementu próbnego	Sposób zbrojenia/stopień zbrojenia
A (rys. AP1a)	A-1	--/--
	A-2	--/--
	Az-1	zbrojenie stalowe/0,0642
	As-1	siatka z włókien szklanych/0,0174
B (rys. AP1b)	B-1	--/--
	B-2	--/--
	Bz-1	zbrojenie stalowe/0,0642
	Bs-1	siatka z włókien szklanych/0,0174
C (rys. AP1c)	C-1	--/--
	C-2	--/--
	Cz-1	zbrojenie stalowe/0,0642
	Cs-1	siatka z włókien szklanych/0,0174
D (rys. AP1c)	D-1	--/--
	D-2	--/--
	Dz-1	zbrojenie stalowe/0,0642
	Ds-1	siatka z włókien szklanych/0,0174

Badania prowadzono w specjalnie do tego zaprojektowanym stalowym stanowisku badawczym, którego schemat pokazano na rysunku 9.

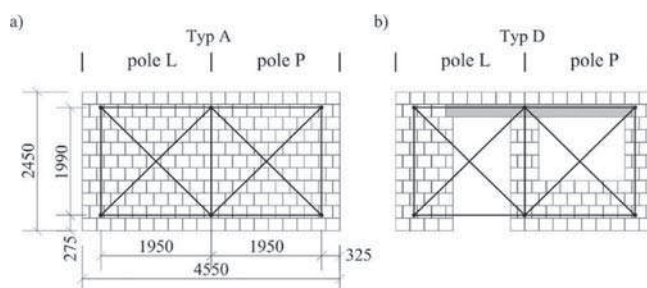
Oprócz sił  $F$  i przemieszczeń  $\delta_v$  pomiarom podlegały odkształcenia tarczy murowanej wzdłuż jedenastu odcinków na każdej powierzchni ściany w dwóch polach oznaczonych umownie L i P – rysunek 10. Długości poziomych baz pomiarowych wynosiły 1950 mm, baz pionowych 1900 mm, natomiast ukośnych 2723 mm. Zmiany pierwotnej długości baz pomiarowych wynikające ze zwiększających się obciążeń górnej krawędzi ściany i pionowych przemieszczeń belki podpierającej były rejestrowane przez czujniki indukcyjne o zakresie pomiarowym  $\pm 5$  i  $\pm 10$  mm. Pomiar zmian długości odcinków pomiarowych posłużył do obliczenia średnich kątów odkształcenia postaciowego elementu badawczego w obydwu polach L i P.

W tabeli 3 zestawiono wybrane wyniki badań ścian wykonanych z silikatowych elementów murowych poddanych obciążeniom pionowym i jednoczesnemu ugięciu belki, na których zostały one wymurowane. W kolumnie 1 znajduje się symbol elementu próbnego zgodnie z programem badań zestawionym w tabeli 2. Kolumna 2 zawiera symbol prawego (P) lub lewego (L) pola ściany, którego dotyczą przedstawione dalej wyniki badań. Sposób zarysowania ścian na różnym etapie badań opisano skrótowo w kolumnie 3. Wartość całkowitego obciążenia górnej krawędzi ściany  $2F$ , ugięcia w środku rozpiętości belki podpierającej  $\delta$ , stosunku tego ugięcia do długości ściany i kąta odkształcenia postaciowego  $\theta$ , które towarzyszą zarysowaniu zestawiono kolejno w kolumnach 4, 5, 6 i 7.

W przypadku elementów badawczych typu A, czyli bez otworów zaobserwowano odspojenie dolnej krawędzi ściany od podpory w początkowej fazie badania przy niewielkim jej ugięciu stanowiącym ponad 1/3000 część rozpiętości belki podpierającej. Pierwsze „schodkowe” rysy ukośne w przypadku jednej ze ścian niezbrojonych i obydwu ze zbrojeniem pojawiły



**Rys. 9.** Stanowisko do badań ścian murowanych opartych na odkształcającej się podporze: 1 – stalowa rama, 2 – siłomierz o zakresie do 500 kN, 3 – siłownik hydrauliczny o zakresie do 500 kN, 4 – stalowy trawers, 5 – żelbetowy wieniec, 6 – badana ściana, 7 – elementy montażowe układu do pomiaru przemieszczenia pionowego, 8 – podatna podpora ściany (stalowa belka), 9 – zewnętrzna podpora stanowiska badawczego, 10 – elementy układu wymuszania przemieszczenia pionowego, 11 – siłownik hydrauliczny o zakresie do 150 kN, 12 – siłomierz o zakresie do 100 kN, 13 – siłomierz o zakresie do 50 kN, 14 – śruby ustalające ugięcie [9] i [14]



**Rys. 10.** Obszary, w których dokonywano pomiarów kąta odkształcenia postaciowego w polu lewym i prawym elementów badawczych, przykładowo dla ścian: a) typu A, b) typu D

się przy stosunku  $\delta/L$  z zakresu około 1/650 do 1/1050 przy obciążeniu stanowiącym od 35 do 50% obciążenia maksymalnego. Jedna ze ścian niezbrojonych uległa zniszczeniu na skutek powstania pojedynczego pionowego zarysowania obejmującego całą jej wysokość, które wystąpiło blisko środka długości przy niemal pięciokrotnie mniejszym obciążeniu i ugięciu niż w przypadku drugiego tego rodzaju ściany. Warto również zauważyć, że w przypadku ściany zbrojonej stała doszło do rozwarstwienia dolnych warstw muru wzdłuż spoin wspornych już przy znikomym ugięciu i obciążeniu (rys. 11b).

Ściany z jednym otworem drzwiowym ulegały odspojeniu od podpierającej je belki przy niewielkim jej ugięciu od 1,1 do 1,6 mm, podobnie jak w przypadku ścian bez otworów. Dodatkowo

**Tabela 3.** Wybrane wyniki badań ścian podpartych na odkształcającej się belce [9] i [14]

Element	Pole	Sposób zarysowania	Obciążenie całkowite 2F, kN	Ugięcie $\delta$ , mm	Stosunek ugięcia do długości ściany $\delta/L$	Średni kąt odkształcenia postaciowego $\theta$ , mm/m				
1	2	3	4	5	6	7				
A-1	L	odspojenie dolnej krawędzi	--	1,2	1/3791	--				
	P									
	L	zniszczenie rysą pionową w środku długości	117	6,0	1/758	0,135				
	P									
A-2	L	odspojenie dolnej krawędzi	--	1,4	1/3250	--				
	P									
	L	pierwsze „schodkowe” zarysowanie ukośne	203	6,1	1/745	0,178				
	P		173	4,2	1/1083	0,118				
L	zniszczenie rysami ukośnymi	499	25,6	1/177	2,61					
P					4,64					
Az-1	L	odspojenie dolnej krawędzi	--	1,3	1/3500	--				
	P									
	L	zarysowanie poziome w spoinach wspornych	58	1,3	1/3500	0,045				
	P									
	L	pierwsze „schodkowe” zarysowanie ukośne	293	7,1	1/641	0,657				
	P					0,935				
L	zniszczenie rysami ukośnymi	848	27,1	1/168	5,04					
P					5,57					
As-1	L	odspojenie od dolnej krawędzi	--	1,4	1/3250	--				
	P									
	L	pierwsze „schodkowe” zarysowanie ukośne	228	5,5	1/827	0,077				
	P					0,091				
L	zniszczenie rysami ukośnymi	430	19,2	1/237	1,422					
P					2,430					
B-1	L (otwór drzwiowy)	odspojenie dolnej krawędzi i zarysowania przy końcu nadproża	--	1,4	1/3250	0,179				
	P					0,011				
B-2	L (otwór drzwiowy)	odspojenie dolnej krawędzi i zarysowania przy końcu nadproża	321	11,2	1/406	12,2				
	L (otwór drzwiowy)					71	1,6	1/2843	0,089	
	P								0,016	
Bz-1	L (otwór drzwiowy)	zniszczenie filarka rysą ukośną	290	6,6	1/690	6,24				
	L (otwór drzwiowy)					odspojenie od dolnej krawędzi	69	1,5	1/3033	1,32
	P									0,060
Bs-1	L (otwór drzwiowy)	zmiażdżenie muru pod nadprożem	702	26,6	1/171	12,1				
	L					odspojenie od dolnej krawędzi	--	1,1	1/4136	--
	P									
C-1	L	zarysowania przy końcach nadproży	--	2,7	1/1685	0,211				
	P					0,134				
	L	zniszczenie zewnętrznych filarków rysą ukośną i poziomą	507	23,4	1/194	13,3				
	P					14,4				
C-2	L	zarysowania przy końcach nadproży	--	1,7	1/2676	0,069				
	P					0,089				
	P					zniszczenie zewnętrznego filarka rysą ukośną	396	14,9	1/305	12,5
Cz-1	L	zarysowania przy końcach nadproży	--	1,5	1/3033	0,204				
	P					0,687				
	P					zniszczenie – zmiażdżenie muru pod nadprożem	475	24,1	1/189	12,3
Cs-1	L	zarysowania przy końcach nadproży	--	1,7	1/2676	0,491				
	P					1,013				
	L	zniszczenie zewnętrznych filarków rysami ukośnymi	485	25,2	1/181	13,7				
	P					12,1				



cd. tabeli 3

D-1	P (otwór okienny)	zarysowania pod oknem i przy końcu nadproża nad oknem	--	1,6	1/2843	--
	L (otwór drzwiowy)	zarysowanie ukośne	241	5,7	1/798	0,535
	L (otwór drzwiowy)	zniszczenie filarka rysą ukośną	376	15,0	1/303	2,60
D-2	P (otwór okienny)	zarysowania pod oknem i przy końcu nadproża nad oknem	--	2,0	1/2275	--
	P (otwór okienny)	zmiążdżenie muru pod nadprożem nad otworem okiennym	425	20,0	1/228	15,6
Dz-1	P (otwór okienny)	zarysowania pod oknem i przy końcu nadproża nad oknem	--	1,5	1/3033	--
	P (otwór okienny)	zmiążdżenie muru pod nadprożem nad otworem okiennym	501	23,8	1/191	15,6
Ds-1	P (otwór okienny)	zarysowania pod oknem i przy końcu nadproża nad oknem	--	1,5	1/3033	--
	P (otwór okienny)	zmiążdżenie muru pod nadprożem nad otworem okiennym	511	24,3	1/187	11,9

w przypadku ścian niezbrojonych dochodziło równocześnie do widocznych zarysowań występujących przy końcach nadproża nad otworem drzwiowym. Do zniszczenia ścian typu B dochodziło w ukośnym przekroju filarka przylegającego do otworu drzwiowego z wyjątkiem ściany ze zbrojeniem stalowym, w której uzyskano dużo większą wartość obciążenia niszczonego oraz ugięcia i gdzie doszło do zmiążdżenia muru pod nadprożem. Elementy próbne z dwoma symetrycznie umieszczonymi otworami drzwiowymi ulegały zarysowaniu we wczesnej fazie badań w rejonie oparcia nadproży na murze przy stosunku ugięcia do rozpiętości od około 1/1500 do 1/3000. Zniszczenie ścian typu C następowało w przekrojach ukośnych zewnętrznych filarków lub przez ścięcie muru w płaszczyźnie poziomej na przedłużeniu belek nadprożowych. Wyjątek stanowił element badawczy ze zbrojeniem stalowym, gdzie doszło do zmiążdżenia muru pod nadprożem.

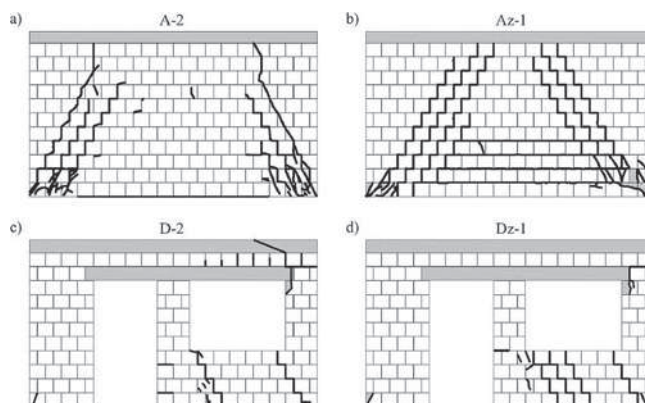
Pierwsze zarysowania ścian z otworem drzwiowym i okiennym nastąpiły znów przy niewielkich wartościach ugięcia, stanowiących od 1/2200 do 1/3700 części rozpiętości belki podporowej. Zarysowania pojawiły się w murze pod otworem okiennym i przy końcu nadproża w filarku zewnętrznym przylegającym do okna. Do pierwszego zarysowania filarka zewnętrznego przy otworze drzwiowym w przekroju ukośnym ściany niezbrojonej D-1 doszło przy ugięciu wynoszącym 1/800 rozpiętości belki podporowej i przy obciążeniu stanowiącym 65% obciążenia niszczonego. Tylko ta ściana typu D uległa zniszczeniu we wspomnianym przekroju ukośnym. Zniszczenie pozostałych ścian z otworem okiennym i drzwiowym nastąpiło przez zmiążdżenie muru pod nadprożem w filarku przylegającym do otworu okiennego. Zarysowania ścian na przykładzie ścian bez otworów typu A i z otworem okiennym i drzwiowym typu D niezbrojonych oraz ze zbrojeniem stalowym pokazano na rysunku 11.

## 6. Podsumowanie

W ścianach obciążonych głównie pionowo zapewnienie spełnienia warunku nośności nie musi zawsze gwarantować spełnienia stanu granicznego zarysowania. Wystąpienie zarysowań jest zależne od rodzaju materiału oraz od lokalizacji fragmentu

muru w konstrukcji. Najbardziej narażone na powstanie zarysowań są strefy koncentracji naprężeń, jak np. strefa podokienna. Na podstawie przeprowadzonych badań tego obszaru stwierdzono, że w murach z silikatów istnieje ryzyko wystąpienia zarysowań, natomiast w murach z betonu komórkowego rysy takie wystąpić nie powinny, jeśli zostanie przeprowadzona poprawna analiza obliczeniowa.

W szczegółowych analizach ścian usztywniających podanych ścinaniu zasadne byłoby uwzględnienie zarówno wpływu kształtu, jak i wpływu wstępnych naprężeń ściskających na wartości granicznych kątów odkształcenia postaciowego  $\theta_{adm}$ . Przy braku jakichkolwiek europejskich wytycznych, przy projektowaniu przyjmowanie wartości  $\theta_{adm}$  według



**Rys. 11.** Zarysowania na przykładzie ścian: a) niezbrojonej bez otworów, b) zbrojonej bez otworów, c) niezbrojonej z otworem drzwiowym i okiennym, d) ze zbrojeniem stalowym z otworem okiennym i drzwiowym [9] i [14]

PN-B-03002:2007 pokazanych na rysunku 3, rysunkach 6 i 7 jest zazwyczaj bezpiecznym oszacowaniem warunków ULS nie tylko ścian z cegły pełnej, ale także ścian z silikatowych elementów murowych i ścian z ABK zróżnicowanych kształtów. Zdecydowanie najbardziej niebezpieczne w analizach są ściany ścinane i minimalnie ściskane (0 lub 0,1 N/mm<sup>2</sup>), które występują w budynkach jednokondygnacyjnych lub

na najwyższych kondygnacjach. Wtedy zarysowanie i zniszczenie następuje przy najmniejszych wartościach kątów odkształcenia i deformacji postaciowych. Określone wartości dopuszczalne  $\theta_{adm}$  mogą być zawyżone jeżeli chodzi o SLS, ale w dalszym ciągu bezpieczne w zakresie ULS.

W przypadku ścian murowanych obciążonych pionowo i doznających jednoczesnych przemieszczeń pionowych wynikających z ugięcia konstrukcji, na której ściany te opierają się, we wczesnej fazie obciążenia obserwuje się odspojenie ściany od konstrukcji podpierającej już przy ugięciu wynoszącym około 1/3000 rozpiętości, a nawet mniejszym. Przy tak niewielkich przemieszczeniach może również dochodzić do zarysowań pojawiających się w ścianach z otworami w miejscu podparcia nadproży oraz w strefie podokiennej ścian z otworami okiennymi. Ze względu na małe obciążenia pionowe występujące w tak wczesnej fazie badań również kąty odkształcenia postaciowego ścian  $\theta$  był znikome. Zarysowania ukośne ścian bez otworów pojawiały się przy ugięciu konstrukcji podpierającej mniejszym od około 1/650 rozpiętości i przy średnim kącie odkształcenia postaciowego wynoszącym około 0,1 mm/m. W ścianach zawierających otwory, w zasadzie poza zarysowaniami występującymi w początkowej fazie badań przy niewielkim obciążeniu i ugięciu konstrukcji podpierającej, nie dochodziło do większych uszkodzeń ścian aż do momentu, który uznawano za wyczerpanie nośności. Mechanizm zniszczenia ścian z otworami polegał na powstaniu rys ukośnych lub zmiążdżenia muru pod belką nadprożową. W przypadku ścian bez otworów zniszczenie polegało na powstaniu wielokrotnych rys ukośnych lub jednej pionowej rysy w środku długości ściany oraz zmiążdżeniu muru w dolnych warstwach w rejonie naroży ścian.

## BIBLIOGRAFIA

[1] PN-EN 1990:2004/A1:2008/NA: 2010 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji

[2] PN-EN 1996-1-1+A1:2013-05/NA: 2014-03 Projektowanie konstrukcji murowych – Część 1-1: Reguly ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych

[3] PN-EN 1992-1-1:2008/NA: 2010/A1:2015-03 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguly ogólne i reguly dla budynków

[4] Drobiec Ł., Przeciwdziałanie zarysowaniu ściskanych murów zbrojeniem spoin wspornych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, seria monografie nr 452, Gliwice, 2013

[5] Drobiec Ł., Wpływ zbrojenia na zarysowanie strefy podokiennej muru z betonu komórkowego. Materiały Budowlane 8/2016, str. 122–125.

[6] Drobiec Ł., Analiza naprężeń i odkształceń w strefie podokiennej muru. Badania modeli ścian, Materiały Budowlane, 4/2017, str. 7–8

[7] Drobiec Ł., The effect of different strengthening systems on the cracking of spandrel walls made of calcium silicate units. Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges. Taylor & Francis Group, London, 2016, str. 2055–2062

[8] Drobiec Ł., Limitation of cracking in AAC masonry under the window zone/Begrenzung von Rissbildung in Porenbetonmauerwerk im Brüstungsbereich. Mauerwerk 21 (2017), Heft 5, str. 332–342

[9] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Starosolski W., Sprawozdanie merytoryczne z projektu badawczego N N506 194438: Badania murowych ścian z otworami, Gliwice, maj 2013

[10] PN-B-03002:2007 Konstrukcje murowe. Projektowanie i obliczanie

[11] Jasiński R., Nośność i odkształcalność zbrojonych ścian murowych ścinanych poziomo. Rozprawa doktorska. Gliwice, 2005

[12] Jasiński R., Badania zbrojonych ścian ceglanych ścinanych poziomo, Przegląd Budowlany, 9/2009, str. 28–36

[13] Piekarczyk A., Nośność i odkształcalność zbrojonych ścian murowych poddanych ścinaniu w kierunku pionowym. Praca doktorska, Gliwice, 2005

[14] Piekarczyk A., Jasiński R., Distortions and the Way of Damaging Masonry Walls Supported on Deflected Structural Elements. 16th International Brick and Block Masonry Conference – Trends, Innovations and Challenges, 26–30 June 2016, Modena, da Porto & Valluzzi, Italy, 2016 Taylor & Francis Group, London, CRC Press, str. 1815–1822, DOI: 10.1201/b21889–239

[15] Jasiński R., Badania i modelowanie murowych ścian usztywniających. Monografia nr 673. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice, 2017

[16] Jasiński R., Research of bed joints reinforced masonry walls with openings made of calcium silicate units horizontally sheared. Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges. Taylor & Francis Group, London 2016, str. 2303–2311

[17] Jasiński R., Badania wpływu kształtu ścian murowanych z elementów silikatowych poddanych ścinaniu. Materiały Budowlane 4/2017, str. 21 – 26. DOI: 10.15199/33.2017.04.05.

[18] Jasiński R., Badania wpływu kształtu murowych ścian z autoklawizowanego betonu komórkowego poddanych ścinaniu, Materiały Budowlane 5/2017, str. 106–111. DOI: 10.15199/33.2017.05.46

## IX Konferencja Naukowo-Techniczna

## RENOWACJE BUDUNKÓW I MODERNIZACJA OBSZARÓW ZABUDOWANYCH

Zielona Góra, 21–23 marca 2018 r.

## CEL KONFERENCJI

Celem konferencji jest prezentacja aktualnych wyników badań w zakresie renowacji budynków i modernizacji obszarów zabudowanych. Do udziału w konferencji zapraszamy pracowników naukowych, projektantów, wykonawców, producentów materiałów, budowlanych oraz pracowników administracji rządowej i samorządowej.

- modernizacja obszarów zabudowanych;
- problemy finansowania rewitalizacji;
- zagadnienia materiałowe, konstrukcyjne i wykonawcze w zakresie remontów i renowacji;
- renowacja w zrównoważonym rozwoju budownictwa;
- inne zagadnienia towarzyszące tematyce konferencji.

## WARUNKI UCZESTNICTWA

Kartę zgłoszenia uczestnictwa oraz streszczenia referatów należy przelać na adres Komitetu Organizacyjnego: Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budownictwa „Renowacje”

ul. prof. Z. Szafrana 1, 65–516 Zielona Góra  
tel. 068 3282 416; 068 3282 290; 068 3287 803  
e-mail: Renowacje@ib.uz.zgora.pl

## TEMATYKA KONFERENCJI

Tematyka konferencji obejmuje następujące zagadnienia:

- rewitalizacja zasobów budowlanych;
- problemy remontowe budynków i budowlanych;
- adaptacja obiektów na cele użytkowe;
- renowacja budynków zabytkowych;