

**THE BEHAVIOR OF MASONRY  
STIFFENING WALLS BASED  
ON THE FULL-SCALE  
RESEARCH**

**DOCTORAL DISSERTATION IN THE DISCIPLINE  
CIVIL ENGINEERING, GEODESY AND  
TRANSPORT**

**Krzysztof GRZYB**

**PROMOTOR**

**Professor Phd, CEng Radosław JASIŃSKI**

GLIWICE 2023

# ZACHOWANIE SIĘ MUROWANYCH ŚCIAN USZTYWNIAJĄCYCH NA PODSTAWIE BADAŃ PEŁNOSKALOWYCH

## Poszerzone streszczenie

Zadaniem murowanych ścian usztywniających jest zapewnienie geometrycznej niezmienności budynku, ograniczenie poziomych przemieszczeń konstrukcji oraz zapewnienie ogólnego komfortu użytkowania budowli. Elementy usztywniające przenoszą obciążenia poziome, oddziałujące w płaszczyźnie ściany. Mogą być one wywołane przez oddziaływanie wiatru, nierównomierne osiadanie podłoża czy też mogą wynikać z negatywnych wpływów eksploatacji górniczej (wstrząsy, odkształcenia podłoża).

Konstrukcja murowa jest strukturą anizotropową, której cechy mechaniczne nie są prostym odzwierciedleniem parametrów mechanicznych składowych części muru – elementów murowych i zaprawy. Ponadto złożony stan naprężeń w murowanej ścianie usztywniającej wynika z jednoczesnego oddziaływania obciążenia poziomego i pionowego. Ściana usztywniająca jest jednocześnie ściskana, ścinana i zginana w swojej płaszczyźnie – co znacząco utrudnia badania eksperymentalne. Choć rola tych elementów jest niezwykle ważna z punktu widzenia zarówno projektowania jak i użytkowania budynków – brakuje spójnego opracowania dotyczącego specyfiki tychże usztywnień. Ten fakt skłonił autora do podjęcia rozprawy doktorskiej poświęconej zagadnieniu murowanych ścian usztywniających.

Celem pracy jest teoretyczne i eksperymentalne rozpoznanie przedmiotu pracy, motywowane następującymi czynnikami:

- brakiem spójnych procedur projektowania ścian usztywniających przy tendencji rynkowej do optymalizacji konstrukcji (zmniejszania przekroju poprzecznego ścian),
- niejasne i nieprecyzyjne sformułowania normowe dotyczące ścian usztywniających,
- nieznaną rzeczywistą wielkość redystrybucji sił wewnętrznych w murowanych ścianach usztywniających – w Eurokodzie 6 dopuszczono redystrybucję sił do 15% bez uzasadnienia takich regulacji,
- brak spójnych metod określania sztywności ścian usztywniających i rozdziału obciążeń poziomych na poszczególne ściany,
- brak metod wyznaczania położenia środka skręcania budynku i uwzględniania obrotu budynku w obliczeniach,
- nieznaną wpływ perforacji ścian na sztywność konstrukcji,
- niedostateczne rozpoznanie badawcze przedmiotowej tematyki na modelach pełnoskalowych.

Głównym zagadnieniem badawczym pracy jest zachowanie się ścian usztywniających wykonanych z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) zarówno w fazie sprężystej jak i nieliniowej. Celami pracy są:

- analiza stanu wiedzy w literaturze krajowej i zagranicznej dotyczącej murowanych ścian usztywniających,
- przegląd ustaleń normowych,
- rozdział obciążeń na ściany usztywniające,
- określenie rzeczywistej redystrybucji sił wewnętrznych,
- analiza propagacji zarysowań i morfologii rys,
- propozycja metody wyznaczania położenia środka skręcania budynku,
- określenie faz pracy murowanych ścian usztywniających w zakresie sprężystym i post-sprężystym.

W ramach rozprawy sformułowano następujące tezy pracy:

1. Sztywność poszczególnych części konstrukcji determinuje wielkość redystrybucji sił wewnętrznych w budynku murowanym.
2. Sprężysty zakres pracy konstrukcji murowej jest niewielki i stanowi ok. 30% nośności.
3. Ściany usztywniające poddane ścinaniu ulegają znacznej degradacji swojej sztywności.
4. Położenie środka skręcania budynku wynika z rozkładu sztywności poszczególnych elementów konstrukcyjnych (ścian).
5. Budynek, w którym występuje niesymetryczny rozdział sztywności elementów usztywniających, na skutek działania obciążenia poziomego, ulega przesunięciu (translacji) oraz skręceniu (obrotowi).
6. Dobór metody homogenizacji konstrukcji murowej wpływa na dokładność numerycznego odwzorowania pracy konstrukcji.

Do weryfikacji postawionych tez przedsięwzięto analizy eksperymentalne i teoretyczne niezbrojonych konstrukcji murowych, poddanych działaniu monotonicznego obciążenia poziomego. Zakresem pracy objęto:

- przegląd literatury,
- własny program badań eksperymentalnych,
- analizy numeryczne z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES),
- propozycję analitycznej metody wyznaczania sztywności ścian usztywniających i położenia środka skręcania budynku,
- dyskusję i główne wnioski.

Rozdział 1 rozprawy stanowi krótki wstęp opisujący aktualną sytuację gospodarczą i rynkową dotyczącą branży budowlanej – w okresie, w którym powstawała niniejsza praca. Rozdział 2 obejmuje uzasadnienie podjęcia tematu ścian usztywniających oraz cele, tezy i zakres pracy. Rozdział 3 obejmuje analizę stanu wiedzy w ujęciu przepisów normowych oraz publikacji naukowych w literaturze krajowej i zagranicznej. Przedstawiono wybrane wyniki badań konstrukcji murowych, procedury obliczeniowe i metody (techniki) homogenizacji muru, stosowane w obliczeniach numerycznych. Rozdział 4 dotyczy własnego programu badań pełnoskalowych modeli budynków murowanych, opis stanowiska badawczego opis oraz wykorzystywanych metod pomiarowych. W rozdziale 5 zaprezentowano główne wyniki badań i opis faz zachowania się ścian usztywniających w zakresie sprężystym i nieliniowym. W rozdziale 6 zawarto rezultaty analiz propagacji zarysowań i uszkodzeń ścian. Rozdział 7 obejmuje obliczenia numeryczne. W ramach pracy zaproponowano autorską procedurę homogenizacji muru, opierającą się na wynikach badań normowych. Podejście to zapewnia powtarzalność i dzięki temu może być weryfikowane przez innych badaczy. Ponadto wykonano analizy numeryczne z wykorzystaniem sprężysto-plastycznego modelu materiałowego z degradacją do odzwierciedlenia zachowania się ścian usztywniających. Rozdział 8 zawiera dyskusję wyników badań w zakresie wyznaczania sztywności ścian w fazie sprężystej i post-sprężystej z uwzględnieniem zarysowania ściany, położenie środka skręcania budynku oraz propozycję inżynierskiej metody analizy numerycznej ścian. W rozdziale 9 zebrano najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz. W załączniku zawarto zdetalizowane rysunki konstrukcyjne ścian, umożliwiające powtórzenie (dokładne odwzorowanie) badań.

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że:

- badania ścian usztywniających obciążonych monotonicznie należą do rzadkości,
- większość analiz niezbrojonych konstrukcji murowych dotyczy obciążeń cyklicznych,
- przemieszczenia poziome ścian usztywniających obejmują deformacje spowodowane ścinaniem (deformacje postaciowe) oraz spowodowane zginaniem (deformacje giętne),
- udział poszczególnych deformacji w całkowitym odkształceniu ścian nie zależy od wstępnego obciążenia ściskającego – zależy wyłącznie od geometrii konstrukcji,
- nośność ścian usztywniających uwarunkowana jest poziomem wstępnych naprężeń ściskających – zwiększenie naprężeń ściskających powoduje wzrost nośności ściany na ścinanie w swojej płaszczyźnie,
- wstępne naprężenia ściskające mają wpływ na morfologię zarysowania ściany – przy niewielkim obciążeniu pionowym rysy mają charakter schodkowy, przy znaczących wartościach naprężeń ściskających, rysy przebiegają ukośnie

- również przez elementy murowe,
- fragmenty ścian poprzecznych do ścian usztywniających biorą udział w przenoszeniu obciążeń poziomych (są to tzw. szerokości współpracujące),
  - sztywność niezbrojonej konstrukcji murowej spada znacząco w przypadku wykonania otworów w ścianie,
  - obecność otworów zmienia rzeczywistą geometrię filarków międzyotworowych i obraz zarysowania konstrukcji,
  - niesymetryczny rozkład perforacji w budynku determinuje skręcanie konstrukcji obciążonej poziomo.

Własny program badań doświadczalnych zaprojektowano według następujących kryteriów:

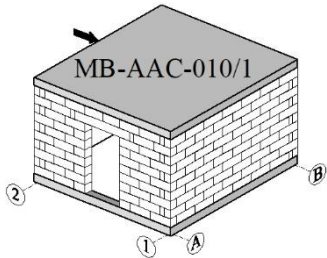
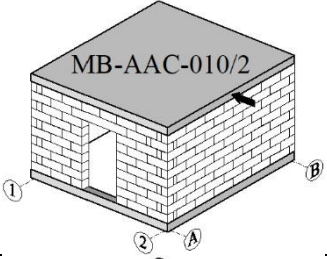
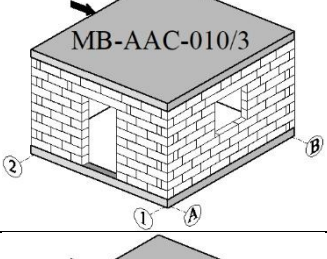
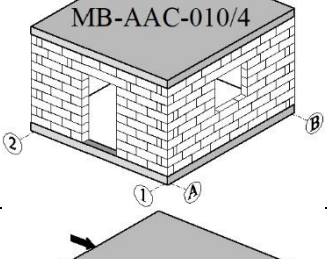
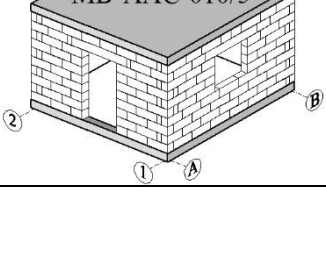
- modele wykonane są z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego,
- ściany są wzniesione w technologii na cienkie spoiny wsporne i niewypełnione spoiny pionowe (czołowe) – połączenia typu pióro-wpust,
- wszystkie modele są niezbrojonymi konstrukcjami murowymi,
- modele badawcze składają się ze ścian murowanych i stropu żelbetowego, który stanowi sztywną tarczę przez którą przekazywane są obciążenia poziome na ściany,
- wielkość wstępnych naprężeń ściskających odpowiada obciążeniu jednokondygnacyjnego budynku w zabudowie mieszkalnej i obejmuje ciężar własny, ciężar warstw wykończeniowych oraz obciążenie zmienne (użytkowe),
- badania mogą zostać w przyszłości rozszerzone do analizy budynków wielokondygnacyjnych poprzez zwiększenie wstępnych naprężeń ściskających,
- geometria ścian sprawia, że dominującymi odkształceniami są deformacje postaciowe – nie giętne, współczynnik wysokości do długości ściany usztywniającej jest mniejszy od jedności  $h/l < 1$ ,
- w wybranych modelach budynków wykonano otwory drzwiowe i okienne, o geometrii odpowiadającej rzeczywistym gabarytom takich otworów,
- zaprojektowane stanowisko badawcze umożliwia badania pełnoskalowych modeli budynków w schemacie statycznym utwierdzenia ścian u podstawy, przy zadaniu wstępnych naprężeń ściskających ściany.

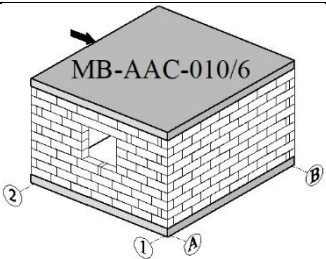
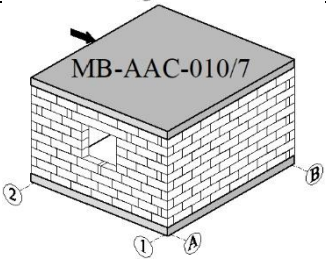
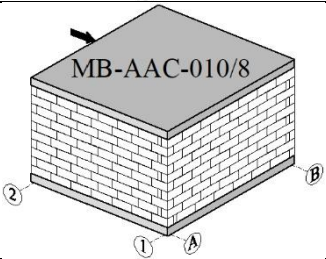
Modele zaprojektowano w taki sposób aby umożliwić zrealizowanie postawionych celów pracy. Program badawczy obejmuje osiem pełnoskalowych modeli budynków, wzniesionych na planie kwadratu 4,0x4,0 m, przy wysokości całkowitej budynku równej 2,85 m i grubości ścian 0,18 m. Każdy model składa się z dwóch ścian usztywniających, oznaczonych literami A i B oraz dwóch ścian prostopadłych oznaczonych cyframi 1 i 2. Modele oznaczono symbolami literowo- cyfrowymi MB-

AAC-010/N, gdzie N oznacza kolejne modele budynków. Program badawczy składa się z czterech typów modeli – typ I to modele z jednym otworem drzwiowym, typ II to otwór drzwiowy w ścianie usztywniającej i otwór okienny w ścianie prostopadłej. Typ III to modele z dwoma otworami w ścianach usztywniających, a typ IV to jeden model referencyjny pozbawiony otworów. Zestawienie badanych modeli budynków pokazano w tabeli 1.

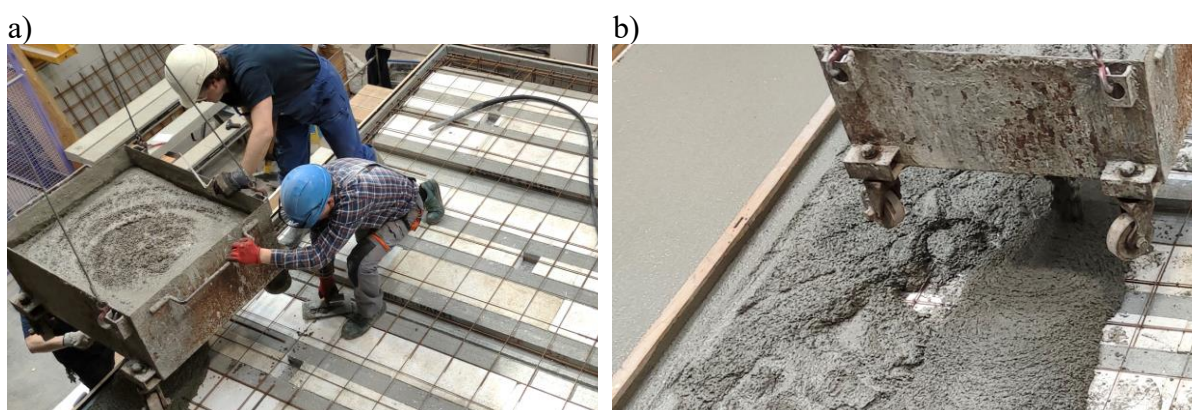
Tabela 1

Lista modeli badawczych budynków murowanych

Oznaczenie modelu / widok 3D	Oznaczenie ściany	Otworowanie	Opis ściany
<b>MB-AAC-010/1</b> 	Ściana A	otwór drzwiowy	usztywniająca
	Ściana B	pełna	
	Ściana 1	pełna	prostopadła
	Ściana 2	pełna	
<b>MB-AAC-010/2</b> 	Ściana A	otwór drzwiowy	usztywniająca
	Ściana B	pełna	
	Ściana 1	pełna	prostopadła
	Ściana 2	pełna	
<b>MB-AAC-010/3</b> 	Ściana A	otwór drzwiowy	usztywniająca
	Ściana B	pełna	
	Ściana 1	otwór okienny	prostopadła
	Ściana 2	pełna	
<b>MB-AAC-010/4</b> 	Ściana A	otwór drzwiowy	usztywniająca
	Ściana B	pełna	
	Ściana 1	otwór okienny	prostopadła
	Ściana 2	pełna	
<b>MB-AAC-010/5</b> 	Ściana A	otwór drzwiowy	usztywniająca
	Ściana B	pełna	
	Ściana 1	otwór okienny	prostopadła
	Ściana 2	pełna	

MB-AAC-010/6		Ściana A	otwór okienny	usztywniająca
		Ściana B	otwór drzwiowy	
		Ściana 1	pełna	prostopadła
		Ściana 2	pełna	
MB-AAC-010/7		Ściana A	otwór okienny	usztywniająca
		Ściana B	otwór drzwiowy	
		Ściana 1	pełna	prostopadła
		Ściana 2	pełna	
MB-AAC-010/8		Ściana A	pełna	usztywniająca
		Ściana B	pełna	
		Ściana 1	pełna	prostopadła
		Ściana 2	pełna	

Aby skrócić czas wznoszenia poszczególnych modeli zdecydowano się na zaprojektowaniu stropu, który mógłby być podnoszony po badaniu modelu budynku i wykorzystany ponownie w kolejnym teście. W tym celu wykorzystano prefabrykowane panele stropowe (zwane elementami panelowymi). Są to segmenty sprężone składające się z żeber i płyty dolnej. Pomędzy żebra włożono styropian pozwalający na zredukowanie ciężaru własnego stropu – ograniczenie to wynikało z tonażu suwnicy. Elementy panelowe układano na kształtkach wieńcowych, a całość konstrukcji stropu monolityzowano nadbetonem – rys. 1.

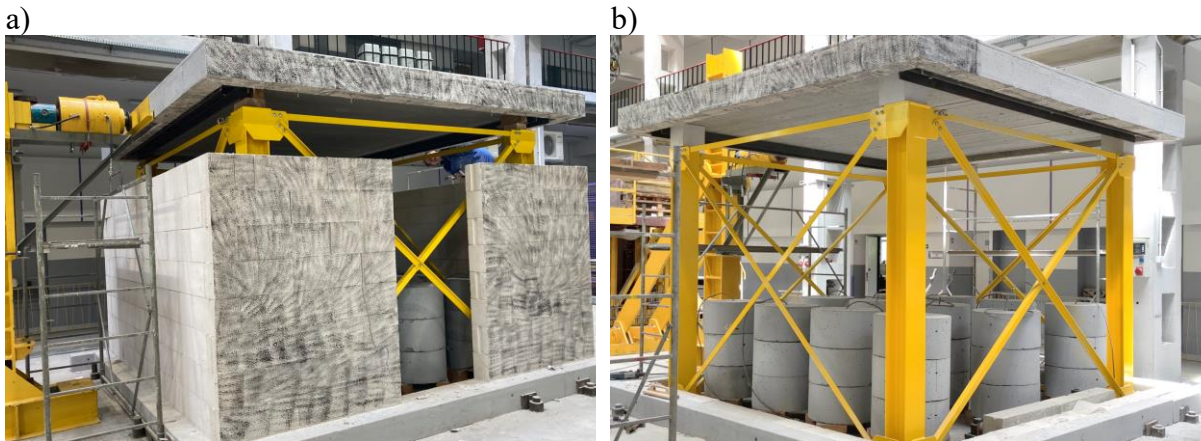


Rys. 1 Betonowanie stropu: a) zasobnik z mieszanką betonową, b) układanie mieszanki betonowej.



Modele badawcze wznoszono w kilku etapach – rys. 2:

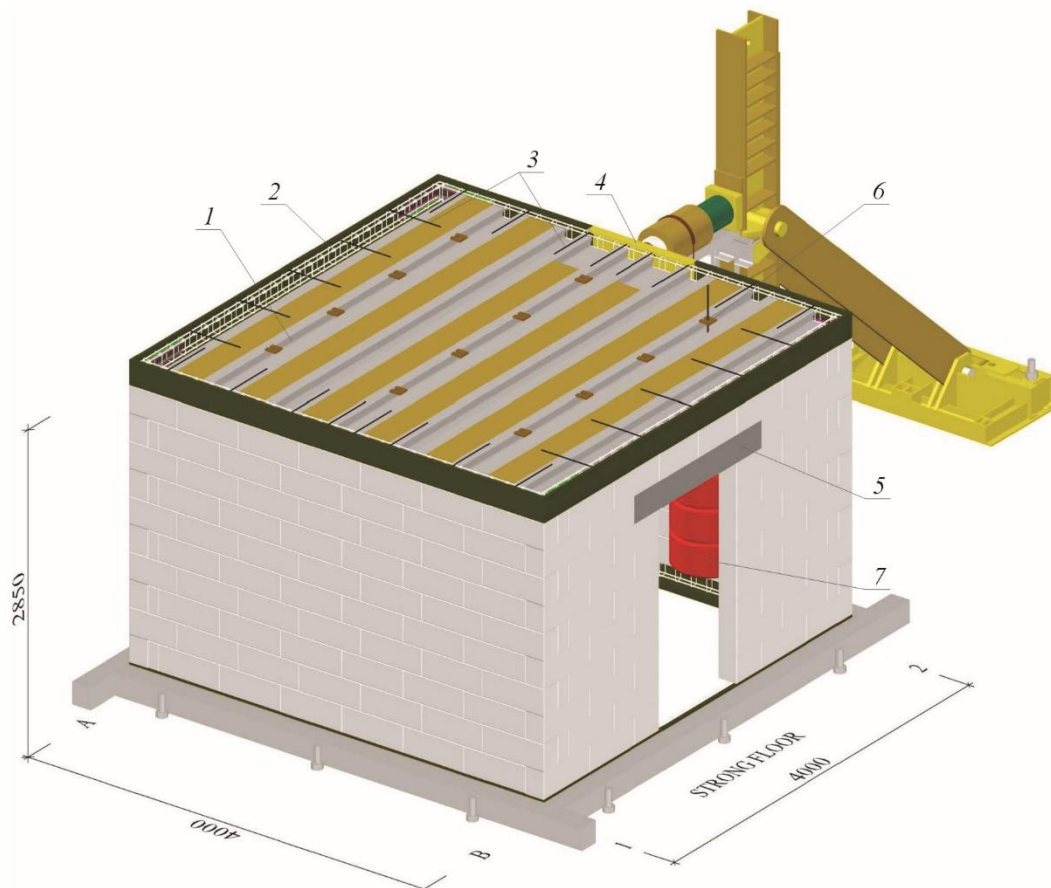
- wzniesienie pierwszego modelu,
- badanie pierwszego modelu,
- odcięcie stropu od ścian i podniesienie stropu suwnicą,
- ułożenie stropu na stalowej konstrukcji wsporczej,
- rozbiórka ścian,
- wzniesienie nowych ścian kolejnego modelu i ułożenie stropu.



Rys. 2 Procedura ponownego wykorzystania stropu: a) wyburzenie ścian modelu po badaniu, b) strop ułożony na stalowej konstrukcji wsporczej

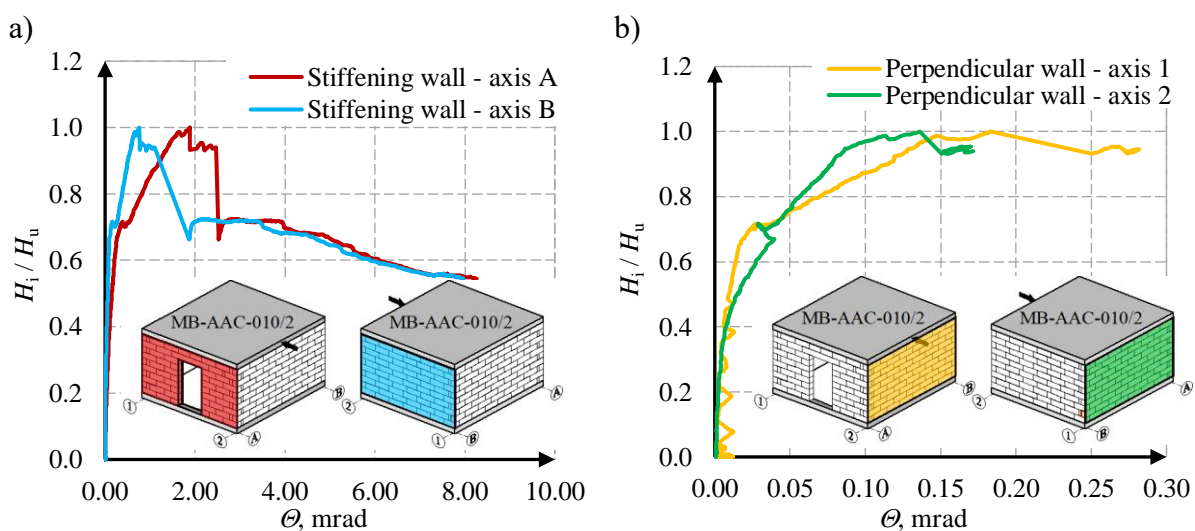
Stanowisko zaprojektowano w sposób umożliwiający zadanie obciążenia pionowego jak również poziomego. Model badawczy utwierdzono w płycie wielkich sił. Zamocowanie zrealizowano za pomocą zewnętrznych belek okalających dolny wieniec modelu, zaklinowanych o śruby średnicy 65 mm, które były przykręcone do hali laboratorium. Obok modelu umiejscowiono stalowy słup z zastrzałem – do niego przymocowano stalową konstrukcję podpierającą siłownik hydrauliczny. Pomiar siły odbywał się za pomocą siłomierza o zakresie pracy  $250 \text{ kN} \pm 0.1 \text{ kN}$ . Obciążenie poziome przyłożone w środku ciężkości stropu i w połowie długości ściany prostopadłej do ścian usztywniających. Obciążenia pionowe wywołano obciążnikami podwieszonymi do stropu. Pojedynczy odważnik miał średnicę 60 cm i wysokość 30 cm. Sumarycznie podwieszono po trzy odważniki o ciężarze 204 kg w dwunastu punktach (73.44 kN). W tym celu w wykonanym stropie uprzednio wywiercono otwory o średnicy 25 mm do przepuszczenia stalowych cięgien podwieszających obciążniki. Otwory były zlokalizowane pomiędzy sprężonymi żebrami stropu panelowego – by nie uszkodzić cięgien sprężających. W miejscu przykładania obciążenia kształtki wieńcowe zamieniono na ceownik stalowy, umożliwiający bezpieczne przekazanie obciążenia na konstrukcję stropu. Widok modelu badawczego na stanowisku pokazano na rys. 3. Pomiary przemieszczeń prowadzono z wykorzystaniem transformatorowych przetworników przemieszczeń liniowych (LVDT). Analizę propagacji zarysowań oraz odkształceń modeli wykonano za pomocą systemu Aramis 6M.





Rys. 3 Model badawczy na stanowisku: 1 – prefabrykowane, sprężone element panelowe stropu, 2 – zbrojenie górnego wieńca, 3 – zbrojenie górne stropu, 4 – ceownik stalowy, 5 – prefabrykowane nadproże, 6 – punkty podwieszenia obciążenia pionowego, 7 – widoczne obciążniki

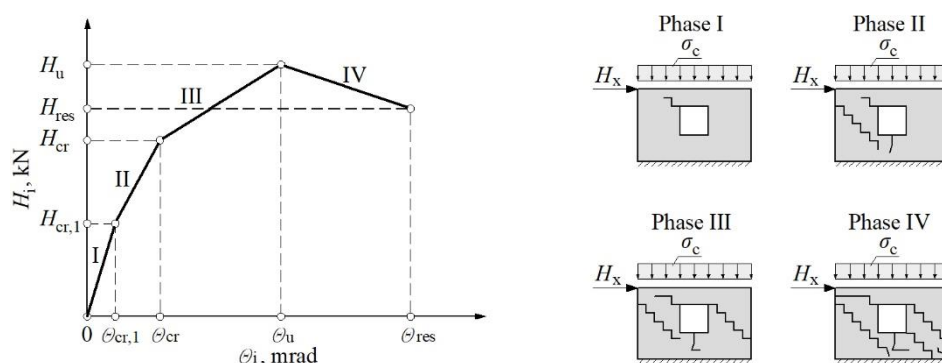
Zachowanie się ścian usztywniających i ścian prostopadłych przedstawiono w formie wykresów zależności znormalizowanej siły poziomej ( $H_i/H_u$ ) do kąta odkształcenia postaciowego. Przykładowe rezultaty pokazano na rys. 4. Znając kąty odkształcenia deformacji postaciowej obliczono również wielkości poziomych przemieszczeń ścian.



Rys. 4 Zależność pomiędzy obciążeniem poziomym, a kątem odkształcenia postaciowego dla modelu MB-AAC-010/2: a) wyniki dla ścian usztywniających A i B, b) wyniki dla ścian prostopadłych 1 i 2

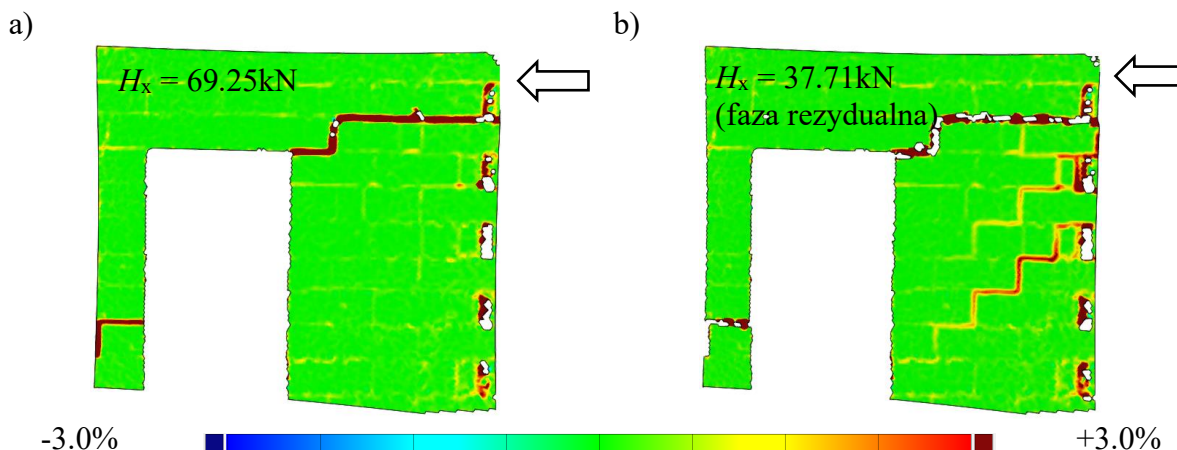
Analiza wyników badań pozwoliła na określenie faz pracy zachowania się ścian usztywniających z otworami i bez otworów. Wyróżniono fazę początkową (faza I), w której jako pierwszy uszkodzeniu ulega rozciągany narożnik otworu. Następnie ma miejsce zarysowanie samej ściany murowanej, co jest tożsame z granicą sprężystej pracy konstrukcji (faza II). W dalszej kolejności dochodzi do postępujących zarysowań schodkowych ściany w zakresie post-sprężystym (faza III). Po przekroczeniu siły niszczącej (maksymalnej) – ściana ulega poziomej translacji (faza rezydualna IV) – rys. 5.

Bazując na wynikach badań opracowano empiryczną metodę wyznaczania sztywności ścian. Jako podejście referencyjne zaproponowano również metodę całkowitej sztywności. Porównanie obu metod pozwoliło na określenie redystrybucji sił wewnętrznych w ścianach – której wielkość określono na ok. 10%.



Rys. 5 Fazy pracy ścian usztywniających z otworem okiennym

Analiza propagacji i morfologii zarysowań ścian (rys. 6) pozwoliły na określenie rzeczywistej geometrii filarków międzyotworowych. W pracy zaproponowano korektę geometrii filarków, pozwalającą na wyznaczenie sztywności postsprężystej ściany w fazie zarysowanej. Ponadto przeanalizowano zjawisko obrotu budynku na skutek działania obciążenia poziomego - rys. 7.

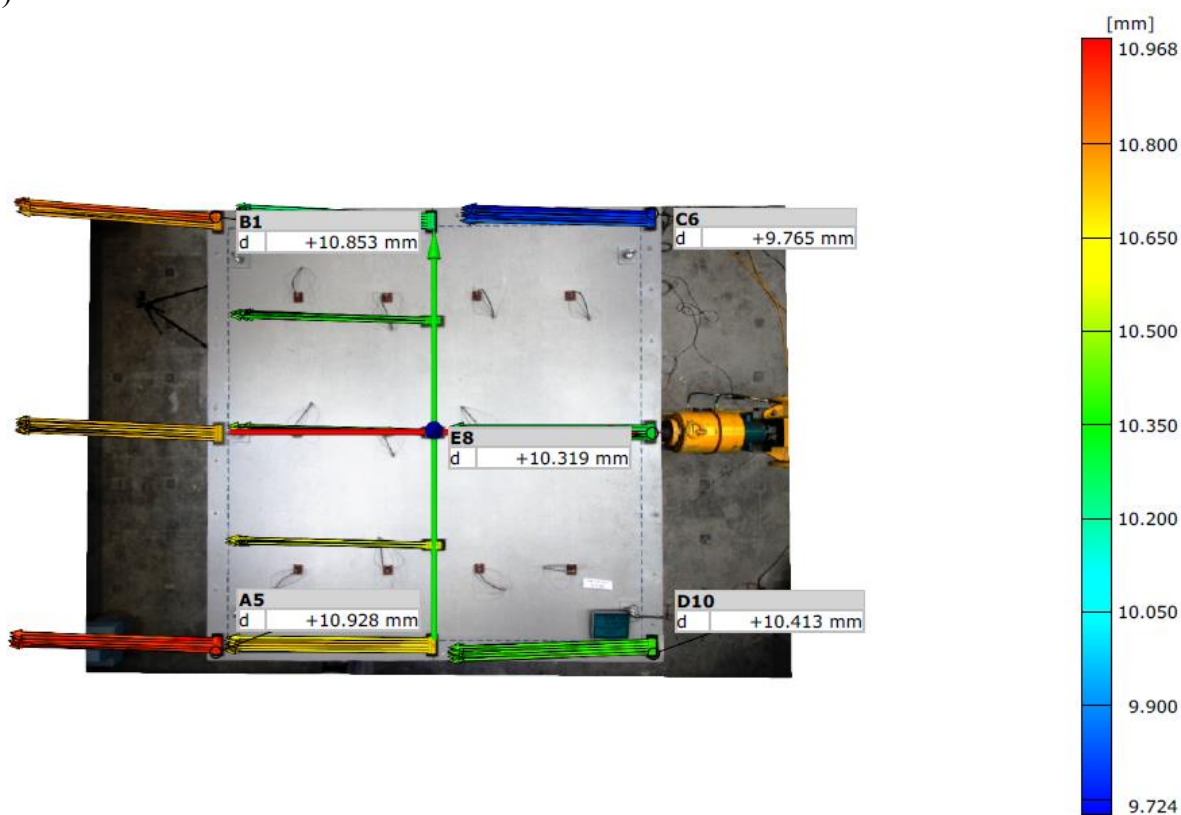


Rys. 6 Propagacja zarysowań ściany usztywniającej A - model MB-AAC-010/2: a) obraz zarysowań przy sile poziomej  $H_x = 69,25 \text{ kN}$ , b) obraz zarysowań przy sile poziomej  $H_x = 37,71 \text{ kN}$

a)



b)



Rys. 7 Wektory przemieszczeń poziomych narożników stropu – model MB-AAC-010/2: a) przy sile poziomej  $H_x = 64,49$  kN, b) przy sile poziomej  $H_x = 46,85$  kN

Pomiary poziomych przemieszczeń narożników stropu i analiza wektorów przemieszczenia wypadkowego wskazała, że budynek w fazie początkowej i sprężystej podlega niewielkiemu przemieszczeniu poziomemu i obrotowi. Na skutek postępujących zarysowań ścian dochodzi do redystrybucji sił wewnętrznych i wyrównania sztywności ścian. W fazach postsprężystych budynek ma tendencje do stosunkowo dużej translacji, a zjawisko obrotu konstrukcji jest marginalne. Zaproponowana w pracy procedura wyznaczania położenia środka skręcania budynku umożliwiła na analityczne określenie współrzędnych środka obrotu. Wykorzystując wyniki badań stwierdzono, że położenie to zmienia się w trakcie zwiększania obciążenia, na skutek postępujących zmian sztywności (spowodowanych zarysowaniem).

W ramach rozprawy doktorskiej wykonano zaawansowane (nieliniowe) obliczenia numeryczne. W tym celu wykorzystano autorską procedurę homogenizacji konstrukcji murowej. Walidacje obliczeń numerycznych prowadzono w oparciu o wyniki badań i dwa kryteria walidacyjne. Kryterium A polegające na porównaniu globalnego zachowania się modelu, w którym porównywano zależności siła pozioma – przemieszczenie poziome ścian. Kryterium B dotyczyło porównania obrazów uszkodzeń i zarysowań ścian. Kalibrowano wybrane parametry mechaniczne modelu materiałowego. Redukcja wytrzymałości na rozciąganie pozwoliła na lepsze dopasowanie sił niszczących, jednak prowadziła do znacznego rozmiękczenia modelu – kalibracja energii pęknięcia umożliwiła na dopasowanie obrazów uszkodzeń ścian (obszary osłabienia materiału w modelu numerycznym), przy jednoczesnym braku satysfakcjonującej zbieżności zachowania się modelu numerycznego w odniesieniu do wyników badań.

Jako, że w praktyce inżynierskiej stosowanie nieliniowych modeli materiałowych w obliczeniach numerycznych jest niepraktyczne ze względu na stopień złożoności modelu i czasochłonność obliczeń – zaproponowano podejście uproszczone. W tym celu posłużono się modelem sprężystym budynku, w którym nie modelowano otworów. Ściany z otworami zastąpiono ścianami bez otworów o zredukowanej sztywności. Podejście to pozwoliło na dopasowanie sztywności budynku poprzez kalibrację modułu sprężystości. Podobny efekt można również uzyskać redukując grubość ścian w modelu numerycznym.

Autor jest świadomy, że niniejsze opracowanie ma charakter badań rozpoznawczych, pozwalających na wyznaczenie dalszych kierunków prac, które powinny obejmować:

- analizy numeryczne na mikromodelach, pozwalających na dokładne odwzorowanie zachowania się modeli budynków i umożliwiających porównanie sił wewnętrznych,
- powtórzenie badań na modelach w skali, przy jednoczesnym zapewnieniu powtarzalności eksperymentu,
- rozszerzenie programu badań o analizy modeli budynków ze zwiększonym obciążeniem pionowym (o zwiększonych naprężeniach ściskających ściany).