



Politechnika Śląska

Wydział Budownictwa

Dyscyplina: Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

ROZPRAWA DOKTORSKA

„Nośność i odkształcalność ściskanych murów
z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową”

Autor:

Mgr inż. arch. Tomasz Rybarczyk

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec

Gliwice, wrzesień 2024



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

*Łukaszowi Drobcowi
oraz Zespołowi z Politechniki Śląskiej
najznakomitszym specjalistom od konstrukcji murowych
dziękuję za naukę i współpracę.*

*Markowi Małeckiemu i Łukaszowi Małeckiemu
dziękuję za stworzenie możliwości i wyróżnienie mnie.*

*Kasi, Mariannie i Jagnie
dziękuję za cierpliwość i wiarę.*

*Ewie i Lechowi
dziękuję za ukształtowanie mnie i wsparcie.*

*Wszystkim niewymienionym dopingującym
dziękuję za życzliwość i doping.*

Wam to zawdzięczam i Wam to dedykuję.



1. Spis treści

1.	<i>Spis treści</i>	3
2.	<i>Oznaczenia</i>	6
3.	<i>Wprowadzenie</i>	11
3.1.	<i>Wstęp</i>	11
3.2.	<i>Cel i zakres pracy</i>	11
4.	<i>Aktualny stan wiedzy</i>	12
4.1.	<i>Idea muru skrępowanego</i>	12
4.2.	<i>Rozwój konstrukcji murowych oraz praktyczne sposoby wykorzystania murów skrępowanych</i>	13
4.3.	<i>Mury skrępowane jako sposób budowania na trudnych terenach</i>	14
4.4.	<i>Wyniki badań skrępowanych modeli poddanych ścisnaniu</i>	22
	Badania kanadyjskie	22
	Badania Iernutan i Babota	24
	Badania Da Porto, Mosele i Modena	26
4.5.	<i>Analizy obliczeniowe murów skrępowanych</i>	28
	Modele prętowe (Strut and Tie)	28
	Modele bazujące na analizie równowagi sił w przekroju	39
	Zalecenia instrukcji i norm.....	44
	Ustalenia przyjęte w projektach Eurokod 6	52
4.6.	<i>Podsumowanie stanu wiedzy</i>	57
5.	<i>Cele naukowe pracy</i>	58
6.	<i>Wyniki badań materiałowych</i>	59
6.1.	<i>Wprowadzenie</i>	59
6.2.	<i>Badania wytrzymałości elementów murowych na ścisnaniu</i>	60
6.3.	<i>Badania elementów murowych w trójosiowym stanie naprężenia</i>	66



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

6.4.	Badania wytrzymałości muru na ściskanie.....	69
6.5.	Badania materiałowe nadproży zbrojonych z betonu komórkowego.....	74
6.6.	Badania wytrzymałości zaprawy murarskiej na zginanie i ściskanie	76
6.7.	Badanie zbrojenia.....	79
6.8.	Badania betonu zwykłego.....	80
6.9.	Badania betonu lekkiego	84
7.	Badania murów w skali naturalnej.....	85
7.1.	Wprowadzenie.....	85
7.2.	Badania wstępne.....	86
	Przyjęte założenia i geometria modeli.....	86
	Technika badań.....	91
	Wyniki badań	95
	Podsumowanie badań wstępnych.....	99
7.3.	Badania zasadnicze.....	100
	Założenia i program badań zasadniczych	100
	Modele badawcze.....	103
	Stanowisko do badań i technika badań.....	109
	Wyniki badań ścian bez otworu z betonem zwykłym oraz lekkim	115
	Wyniki badań ścian z otworem.....	130
7.4.	Badania dodatkowe	150
	Badania ścian w skali naturalnej z nadprożem żelbetowym	150
	Założenia i program badań dodatkowych	150
	Badania fragmentów ścian z różnymi układami przesklepienia otworu.....	162
8.	Analiza wyników	169
8.1.	Porównanie i analiza wyników badań murów pełnych.....	170
8.2.	Porównanie i analiza wyników badań murów z otworem	176
8.3.	Porównanie murów pełnych z murami z otworem.....	182
9.	Analizy obliczeniowe	186



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

9.1.	Nośność murów skrępowanych według projektu oraz najnowszej wersji EC6.	186
9.2.	Analizy numeryczne	188
9.3.	Modele prętowe – Strut & Tie.....	197
9.4.	Wnioski z badań i analiz obliczeniowych	201
10.	<i>Wnioski końcowe</i>	203
11.	<i>Kierunki dalszych działań.....</i>	206
12.	<i>Streszczenie.....</i>	207
13.	<i>Summary</i>	208
14.	<i>Literatura.....</i>	210
15.	<i>Normy, instrukcje i wytyczne</i>	218
16.	<i>Strony internetowe.....</i>	219
17.	<i>Wykaz rysunków</i>	220
18.	<i>Wykaz tabel.....</i>	228



2. Oznaczenia

Duże litery łacińskie

A_{bt}	- pole powierzchni przekroju poprzecznego elementów murowych
$A_{sv,min}$	- minimalny przekrój zbrojenia pionowego rdzenia
A_t	- pole przekroju poprzecznego brutto skrępowanej ściany murowanej, w tym słupy ryglowe / pole powierzchni poziomego przekroju ściany
C	- współczynnik koncentracji naprężenia
E	- moduł sprężystości muru
E_c	- moduł sprężystości belki żelbetowej lub rdzenia krępującego
E_{z1}	- moduł sprężystości muru z niewypełnionymi spoinami czołowymi
E_{z2}	- moduł sprężystości muru z wypełnionymi spoinami czołowymi
F	- siła zewnętrzna, stosunek średnich naprężeń do dopuszczalnych obliczeniowych naprężeń ściskających
F_d	- siła w ściskanej części przekroju
F_{RA}	- nośność zakotwienia poprzecznych prętów kotwiących
G_f	- energia pęknięcia
H	- wysokość ściany lub elementu badawczego
I	- moment bezwładności belki
I_s	- moment bezwładności rdzenia krępującego
K	- bezwymiarowy parametr sztywności względnej
K_{nn}	- sztywność normalna
K_{tt}	- sztywność styczna
L	- szerokość muru, rozpiętość belki
M	- moment zginający
M_{max}	- maksymalny moment zginający
M_{mid}	- moment zginający w środku rozpiętości elementu
M_{Rd}	- nośność na zginanie muru
M_{Sd}	- obliczeniowy moment zginający
N	- całkowite pionowe obciążenie ściany
N_{cc}	- siła wywołująca zniszczenie z uwagi na zmiążdżenie muru w narożniku
N_{dt}	- siła wywołująca zniszczenie z uwagi na nośność ściskanego krzyżulca
N_{dt}	- siła wywołująca zarysowanie ukośne
N_E	- całkowite obciążenie modeli laboratoryjnych powiększone o połowę ciężaru modelu i ciężar stalowego osprzętu



N_{Ed}	- obliczeniowa siła pionowa działająca na ścianę
N_i	- minimalna siła w krzyżulcu
N_{Rd}	- obliczeniowa nośność ściany skrępowanej obciążonej głównie pionowo
$N_{Rm(1)}$	- nośność ściany skrępowanej w przekroju środkowym
$N_{Rm(2)}$	- nośność ściany bez skrępowania w przekroju środkowym
N_s	- siła wywołująca poślizg w spoinie pionowej
N_w	- siła pionowa
P_y	- siła
R_a	- parametr względnej sztywności podłużnej
R_{eH}	- średnia górna granica plastyczności
R_f	- parametr sztywności względnej
R_m	- wytrzymałość na rozciąganie stali
$R_{p0,2}$	- średnia umowna granica plastyczności
T	- siła osiowa w nadprożu
T	- maksymalna siła rozciągająca w krzyżulcu
V	- siła tnąca
V_{Ed}	- ścinające obciążenie obliczeniowe działające na ścianę
V_{Rd}	- obliczeniowa nośność muru skrępowanego
V_{Rd1}	- nośność muru na ścinanie
V_{Rd2}	- nośność elementów żelbetowych na ścinanie
V_{Rdl}	- wartość nośności granicznej przy ścinaniu
W	- całkowite obciążenie działające na układ mur - belka
X	- względny zasięg oddziaływania naprężenia ściskającego
$X1$	- odkształcenia poziome baz górnych
$X2$	- odkształcenia poziome baz dolnych
Y	- odkształcenia pionowe

Małe litery łacińskie

b	- szerokość przekroju elementu badawczego, parametr doświadczalny
c	- kohezja
$d, l, h,$	
$h_m, l_m,$	- dane geometryczne
l_{eff}, w	
e_a	- mimośród niezamierzony
f	- wytrzymałość muru na ściskanie



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

f_b	- średnia wytrzymałość elementu murowego na ściskanie
f_{bok}	- charakterystyczna wytrzymałość stali zbrojeniowej na zakotwienie
f_{bt}	- wytrzymałość na rozciąganie elementów murowych wyznaczona w kierunku równoległym do powierzchni wspornej
f_c	- wytrzymałość muru na ściskanie
$f_{c,cyl}$	- otrzymana w badaniach wytrzymałość na ściskanie betonu
f_{cd}	- obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie
f_{c-lim}	- redukcja wytrzymałości na ściskanie spowodowana zarysowaniem
$f_{c,mean}$	- średnia wytrzymałość na ściskanie ze wszystkich zarobów
f_{cr}	- ugięcie nadproża przy zarysowaniu
f_d	- obliczeniowa wytrzymałość muru na ściskanie
$f_{i,min}$	- najmniejsza wytrzymałość na ściskanie pojedynczego elementu próbnego w danej serii
f_k	- charakterystyczna wytrzymałość muru na ściskanie
$f_{k,test}$	- charakterystyczna wytrzymałość muru na ściskanie
f_m	- średnia wytrzymałość na ściskanie
f_{mt}	- średnia wytrzymałość na zginanie
f_t	- wytrzymałość muru na rozciąganie
f_{tk}	- wytrzymałość charakterystyczna muru na rozciąganie
f_u	- ugięcie elementu
f_{V0}	- początkowa wytrzymałość muru na ścinanie
f_y	- wytrzymałość stali zbrojeniowej
f_{yd}	- parametry zbrojenia w rdzeniu rozciągającym / obliczeniowa granica plastyczności podłużnego zbrojenia krępujących rdzeni
f_{Z1}	- wytrzymałość na ściskanie muru z niewypełnionymi spoinami czołowymi
f_{Z2}	- wytrzymałość na ściskanie muru z wypełnionymi spoinami czołowymi
h	- wysokość ściany lub elementu badawczego
h_b	- wysokość belki
k	- sztywność
k_1	- współczynnik momentu zginającego
l	- długość ściany, rozpiętość belki
l_c	- długość ściskanej części ściany
l_m	- długości muru
l_v	- długość odcinka kontaktu naprężeń normalnych
l_s	- długość odcinka kontaktu naprężeń stycznych
I_s	- moment bezwładności rdzenia krępującego



l_M	- położenie maksymalnego momentu zginającego
m	- minimalna szerokość, na którą przekazywane są obciążenia ściskające
n	- liczba próbek
n_t	- liczba strzemion kotwiących
r_m	- częściowy współczynnik bezpieczeństwa
r_t	- promień południka rozciągania powierzchni granicznej
s_c	- odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie
s_{ma}	- rozstaw rys
t	- grubość muru
$tg\alpha$	- współczynnik tarcia
$tg\gamma$	- współczynnik tarcia zaprawy w płaszczyźnie spoin wspornych
u_x	- całkowita deformacja modelu
w	- szerokość pasa ściskanego
w_c	- przemieszczenia przy rozciąganiu
x	- odległość między pionowymi wypadkowymi siłami działającymi na górnej i dolnej krawędzi ściany
z	- ramię sił wewnętrznych

Wielkie litery greckie

Φ_i	- współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ smukłości ściany i mimośrodowości obciążenia
χ_1	- współczynnik
χ_2	- współczynnik
χ_3	- współczynnik

Małe litery greckie

α	- współczynnik
α_b	- procentowy zakres kontaktu między rygłem a murem pod deformacją
α_c	- cecha sprężystości muru
α_c	- procentowy zakres kontaktu między rdzeniem a murem pod deformacją
β	- współczynnik redukcyjny
β_1	- współczynnik redukcyjny
β_1	- kąt pochylenia ściskanego krzyżulca
β_2	- kąt pochylenia ściskanego krzyżulca
γ	- współczynnik redukcyjny



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

γ_M	- częściowy współczynnik materiałowy
ϵ	- odkształcenia skurczowe
ϵ_{mu}	- graniczne odkształcenie muru
ϵ_s	- odkształcenie plastyczne stali zbrojeniowej
ϵ_x	- odkształcenia poziome
ϵ_y	- odkształcenia pionowe
ϕ	- średnica pręta zbrojeniowego
ϕ_{∞}	- końcowa wartość współczynnika pełzania
δ	- współczynnik redukcyjny, współczynnik stosowany do określania znormalizowanej średniej wytrzymałości na ściskanie elementów murowych
η_w	- współczynnik uwzględniający stan zawilgocenia elementu murowego
η	- współczynnik
η_M	- współczynnik
θ	- kąt Lodego
λ	- współczynnik
$\lambda_{10,dry}$	- deklarowany współczynnik przewodzenia ciepła
λ_h	- parametr bezwymiarowy
χ	- współczynnik redukcyjny
ν	- współczynnik Poissona
ρ	- klasa gęstości brutto w stanie suchym dla autoklawizowanego betonu komórkowego
ρ_2	- współczynnik redukcji wysokości efektywnej ściany
ρ_w	- stopień zbrojenia
σ	- naprężenie ściskające
σ_c	- naprężenie wzdłuż słupa
σ_d	- obliczeniowe naprężenie w murze
σ_{hor}	- naprężenia poziome
σ_y	- naprężenie ściskające
σ_{rad}	- ciśnienie zewnętrzne
σ_{ver}	- naprężenie pionowe
τ	- naprężenie styczne
τ_b	- naprężenie wzdłuż rygla
τ_{mv}	- wytrzymałość na ścinanie uzyskana z badań ukośnego ściskania



3. Wprowadzenie

3.1. Wstęp

Murowane ściany nośne nie występują tylko w podstawowej formie – jako konstrukcje wykonane z elementów murowych powiązanych zaprawą murarską. Są wznoszone również w postaci ścian wypełniających konstrukcję żelbetową lub tzw. ścian skrępowanych. W przypadku ścian wypełniających konstrukcja żelbetowa jest wykonana jako pierwsza (mogą to być elementy żelbetowe wylewane na budowie lub elementy żelbetowe prefabrykowane), natomiast w murach skrępowanych najpierw wznosi się murowaną ścianę, a następnie w płaszczyźnie ściany betonuje się rdzenie i rygle. Różna kolejność wykonania powoduje, że oba te układy konstrukcyjnie zupełnie inaczej pracują. W przypadku muru wypełniającego pomiędzy konstrukcją żelbetową a murem zawsze występują luzy, co oznacza, że konstrukcja murowa zaczyna pracować dopiero po deformacji konstrukcji żelbetowej albo murowej [61]. W przypadku muru skrępowanego ułożenie mieszanki betonowej wokół ściany skutkuje w murze wprowadzeniem dodatkowych sił ściskających w wyniku wystąpienia zjawiska skurczu betonu. W efekcie uzyskuje się mur, który jest skrępowany konstrukcją żelbetową. Takim murom właśnie jest poświęcona niniejsza praca.

3.2. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu skrępowania na nośność i odkształcalność muru wykonanego z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) poddanego ściskaniu.

Zakres pracy obejmuje przeprowadzenie przeglądu stanu wiedzy na temat murowanych ścian podanych ściskaniu, wykonanie laboratoryjnych badań murów wzniesionych z autoklawizowanego betonu komórkowego oraz opracowanie modeli numerycznych i modeli analitycznych badanych murów skrępowanych.

W wielu krajach budynki z murami skrępowanymi wykonuje się na terenach oddziaływań sejsmicznych. W literaturze znaleźć można wiele zaleceń konstrukcyjnych wywodzących się z tradycji budowania na terenach takich oddziaływań [5], [45], [52], [53], [73], [87] oraz opis stosowanych modeli obliczeniowych [3] [41], [43], [87], [95]. Dostępne w literaturze modele obliczeniowe nie pozwalają jednak określić nośności ścian obciążonych monotonicznie. Stąd w zakres niniejszej pracy wchodzi również próba zdefiniowania propozycji modelu obliczeniowego do wyznaczania nośności murów skrępowanych.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Skrępowanie muru jest jednym ze sposobów lepszego wykorzystania właściwości murów z autoklawizowanego betonu komórkowego i stosowania go w bardziej wymagających konstrukcjach [17], [18], [24]. Wytrzymałości na ściskanie elementów murowych z betonu komórkowego, w porównaniu do innych materiałów murowych, są dużo mniejsze. W praktyce wielu projektantów w swoich opracowaniach przyjmuje rozwiązania dla nich najbardziej bezpieczne, bez wykonywania niezbędnych obliczeń i sprawdzeń przyjmując materiały o największej wytrzymałości na ściskanie. Niniejsza praca dotyczy możliwości optymalnego wykorzystania parametrów materiałowych autoklawizowanego betonu komórkowego.

4. Aktualny stan wiedzy

4.1. Idea muru skrępowanego

Definicja muru skrępowanego pojawiła się dopiero w normie PN-EN 1996-1-1 (Eurokod 6) [N18]. Według Eurokodu 6 (EC6) [N18] za mur skrępowany uważa się mur, którego odkształcenia zostały w pionie i w poziomie ograniczone przez przylegającą do niego konstrukcję żelbetową lub mur zbrojony. Wpływ skrępowania na ograniczenie odkształceń opisano w pracach [12], [27], [28] [29], [30], [33], [37]. W praktyce murów zbrojonych jako elementów krępujących nie stosuje się albo stosuje się bardzo rzadko. Do krępowania odkształceń murów wykorzystuje się głównie żelbetowe monolityczne rdzenie, rygle i wieńce stropów albo rygle wykonane w murach bez stropów (co ma miejsce w budynkach typu halowego). Przed powstaniem Eurokodu 6 mury skrępowane wykonywano również w naszym kraju, chociaż nie były one w ten sposób nazwane (np. na rdzenie mówiono pionowe wieńce). Tego typu mury w Polsce były wznoszone na terenach poddanych wpływom od eksploatacji górniczej [29], [34]. Wykonywało je wówczas według instrukcji i wytycznych ITB [N6].

W licznych publikacjach [2] [4], [40], [46], [47], [68], [90], [93] podkreśla się różnice między murem skrępowanym, a murem stanowiącym wypełnienie szkieletu żelbetowego oraz podaje się zalety murów skrępowanych. Prace te koncentrują się jednak wokół wpływu skrępowania przy cyklicznym obciążeniu. Eurokod 6 [N18] nie dotyczy jednak murów obciążonych w sposób sejsmiczny, a w projekcie tej normy [N26] znalazły się nawet zalecenia dotyczące obliczeń murów skrępowanych pod obciążeniem pionowym i poddanych ścinaniu. W literaturze mało jest natomiast publikacji dotyczących badań murów skrępowanych realizowanych w jednym cyklu obciążenia. Można tu wymienić pracę [7], w której badano niewielkie skrępowane modele z betonu



komórkowego, pracę [10], w której analizowano zachowanie murowanych słupów z drążonych bloczków betonowych i prace [36], [76], w których opisano badania skrępowanych ścian i słupów z drążonych bloczków betonowych. Powyższe badania prowadzono jednak na małych modelach. W literaturze trudno jest znaleźć wyniki badań skrępowanych murowanych ścian badanych w skali naturalnej.

Wiadomo powszechnie, że mury skrępowane mają większą odporność na zarysowania i większą nośność niż mury bez skrępowania. Dzieje się tak ponieważ skurcz betonu w elementach krępujących powoduje występowanie pewnych naprężeń ściskających w murze usytuowanym między elementami krępującymi, co jest bardzo korzystne dla konstrukcji ściany. W ścianie skrępowanej, na skutek skurczu betonu, mur jest poddany dwuosowemu ściskaniu. Naprężenia ściskające od skurczu betonu mogą mieć wartość $0,2 \div 0,3 \text{ N/mm}^2$ [48], [49] i to one odpowiadają za zwiększenie odporności muru na zarysowania [55], [56].

4.2. Rozwój konstrukcji murowych oraz praktyczne sposoby wykorzystania murów skrępowanych

Konstrukcje murowe wykonuje się od wielu lat. Pomimo wiekowej tradycji podlegają one również rozwojowi. Rozwój i postęp konstrukcji murowych można uzyskać w różnorodny sposób. Najczęściej jest to realizowane przez:

- Wprowadzenie materiałów o polepszonych właściwościach użytkowych w stosunku do tych, które są obecnie w użyciu. Ten proces występuje najczęściej, chociaż ze względu na niewielką skalę poprawy właściwości użytkowych wyrobów, z reguły nie stanowi znaczącego postępu.
- Wprowadzanie zupełnie nowych materiałów: elementów murowych, zapraw murarskich. Jest to rozwój obarczony pewnym ryzykiem, ponieważ nie wiadomo jak się nowe technologie sprawdzą w konstrukcjach budynków na przestrzeni lat.
- Zastosowanie nowego rodzaju rozwiązań wykonania tych konstrukcji (np. zbrojenie murów, zastosowanie różnego rodzaju wzmocnień, zastosowanie materiałów FRP – Fiber Reinforced Polymers lub FRCM – Fiber-Reinforced Cementitious Matrix) [14], [83]. Zbrojenie murów nie zawsze może sprostać wymaganiom architektów, projektantów lub wykonawców. W związku z tym poszukuje się jeszcze innych metod



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

pozwalających spełnić wymagania norm projektowania w zakresie nośności, bezpieczeństwa i użyteczności, bez istotnych ograniczeń architektonicznych.

- Synergiczne łączenie ze sobą znanych i dobrze rozpoznanych technologii, umożliwiających ich optymalne wykorzystanie oraz zwiększenie ich wspólnej interakcji. Takim rozwiązaniem jest np. łączenie konstrukcji murowych z żelbetem.

Powyższe metody rozwoju konstrukcji murowych mogą oczywiście być wprowadzane oddzielnie i niezależnie, ale mogą być wprowadzane łącznie.

Monolityczne połączenie tradycyjnego muru z żelbetowym szkieletem i wykonanie tak zwanego muru skrępowanego [23] wpisuje się w nowoczesne trendy rozwoju konstrukcji murowych. Mimo powszechnie znanych zalet tego rozwiązania, takich jak ograniczenie zarysowań i wzrost nośności, rozpowszechnienie technologii murów skrępowanych jest hamowane przez brak rozpoznanych i skutecznych metod ich projektowania, w tym brak możliwości analitycznego sprawdzania ich nośności.

4.3. Mury skrępowane jako sposób budowania na trudnych terenach

Mury skrępowane są stosowane przede wszystkim na trudnych terenach w kontekście warunków posadowienia oraz możliwości odkształceń podłoża i na terenach działania silnych wiatrów. Ponieważ tego typu mury są znacznie bardziej odporne na zarysowania od murów wznoszonych w technologii tradycyjnej na świecie często wykonuje się je na obszarach poddanych wpływom sejsmicznym. W Polsce mury skrępowane stosowane były dotychczas powszechnie na terenach poddanych wpływom eksploatacji górniczej, w miejscach narażonych na wystąpienie osuwisk oraz na terenach zalewowych itp. [4], [40], [46], [47], [68], [90], [93]. Na Rys. 4.3.1, Rys. 4.3.2, Rys. 4.3.3 pokazano przykłady budynków uszkodzonych w wyniku powodzi oraz wpływów sejsmicznych. W budynkach tych ściany skrępowane nie zostały zniszczone, ani nawet znacząco zarysowane. Należy też dodać, że w ostatnich latach w kraju i na świecie obserwuje się coraz częstsze wykorzystanie murów skrępowanych na obszarach pozbawionych wpływów wyjątkowych. Skrępowanie stosuje się wówczas w celu usztywnienia konstrukcji i przeciwdziałania uszkodzeniom np. od ekstremalnych wiatrów. W niektórych przypadkach skrępowanie ścian zewnętrznych umożliwi również zaprojektowanie i wybudowanie budynku bez ścian konstrukcyjnych wewnętrznych. Coraz częściej tego typu formy budynku są projektowane i wykonywane (np. budynki parterowe bez stropu, większe budynki wielorodzinne albo budynki komercyjne typu



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

np. markety). Przykłady takich budynków pokazano na Rys. 4.3.4, Rys. 4.3.5, Rys. 4.3.6, Rys. 4.3.7, Rys. 4.3.8, Rys. 4.3.9.



Rys. 4.3.1 Przykład odporności konstrukcji budynku ze ścianami skrępowanymi na obciążenia wyjątkowe (budynek po powodzi w Bośni 2014)[W1]



Rys. 4.3.2 Przykład odporności konstrukcji budynku ze ścianami skrępowanymi na obciążenia wyjątkowe (budynek po powodzi w Bośni 2014) [W3]



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.3.3 Przykład odporności konstrukcji budynku ze ścianami skrępowanymi na obciążenia wyjątkowe (budynek po trzęsieniu ziemi w Haiti w 2010 roku) [W2]



Rys. 4.3.4 Przykład budynku mieszkalnego jednorodzinnego ze skrępowaniem ścian jednowarstwowych z betonu komórkowego (krępujące elementy żelbetowe trzpienie i wieńce są wykonywane w kształtkach U) (fot. Tomasz Rybarczyk)



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.3.5 Przykład budynku mieszkalnego jednorodzinnego ze skrępowaniem ścian jednowarstwowych z betonu komórkowego (krępujące elementy żelbetowe trzpienie i wieńce są wykonywane w kształtkach U) (fot. Tomasz Rybarczyk)



Rys. 4.3.6 Przykład budynku mieszkalnego jednorodzinnego ze skrępowaniem murów z betonu komórkowego (fot. Tomasz Rybarczyk)



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.3.7 Przykład budynku mieszkalnego jednorodzinego wielolokalowego ze skrępowaniem murów z betonu komórkowego (fot. Tomasz Rybarczyk)



Rys. 4.3.8 Przykład budynku mieszkalnego wielorodzinnego ze skrępowaniem murów z betonu komórkowego (fot. Tomasz Rybarczyk)



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.3.9 Przykład budynku komercyjnego z murami skrępowanymi (fot. Tomasz Rybarczyk)

Jak już wcześniej wspomniano, skrępowanie wymaga wykonania w pierwszej kolejności murowanych ścian z pozostawionymi miejscami na wykonanie słupów i rygli żelbetowych. Ta technologia daje duże korzyści, polegające na tym, że:

- współpraca muru z żelbetem od chwili wykonania konstrukcji żelbetowej jest większa niż w przypadku wypełnienia szkieletu żelbetowego elementami murowymi,
- zachodzi wzajemna interakcja muru z żelbetem wywołana wpływami skurczowo-termicznymi,
- następuje przejmowanie części sił ściskających i ścinających przez żelbetowe elementy krępujące,
- zostaje ograniczona dystrybucja zarysowań w miejscach potencjalnych koncentracji naprężeń powstających w miejscach skrzyżowań ścian, występowania otworów lub oparcie belek na murze.

Wadą konstrukcji skrępowanej jest dłuższy czas ich realizacji oraz większe skomplikowanie robót w porównaniu z technologią tradycyjną oraz szkieletową prefabrykowaną. Jest to natomiast porównywalne z wykonywaniem murów w połączeniu z żelbetowym szkieletem, który również



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

wymaga przygotowanie szalunków oraz robót zbrojarskich – jeśli szkielet jest wykonywany, jako monolityczny. Wadą jest też to, że wolnostojące fragmenty ścian oczekujące na wykonanie skrępowania są podatne na porywy wiatru i w ekstremalnych przypadkach możliwość przewrócenia Rys. 4.3.10. Dlatego tak ważne jest zabezpieczenie fragmentów muru przed przewróceniem na etapie wykonawstwa.



Rys. 4.3.10 Przykład zagrożenia w przypadku wykonywania ścian skrępowanych (fot. Tomasz Rybarczyk)

Doświadczenia z konstrukcjami skrępowanymi z krajów, w których są one stosowane pokazują, że tego typu budynki nie mają luźnej i skomplikowanej formy. Budynek wpisujący się w zasady konstruowania budynku ze ścianami skrępowanymi powinien mieć uporządkowane elewacje (Rys. 4.3.11, Rys. 4.3.12). W kontekście architektury niezadowolające może być to, że nie można sobie pozwolić na swobodę projektowania, ponieważ forma budynku wynika z jego konstrukcji. To aspekty w pewien sposób ograniczające architektów. Bryła budynku ze ścianami skrępowanymi powinna być zwarta, trzeba jednak zwrócić uwagę, że dzięki temu budynki są proste w budowie. Prosta bryła wpływa też na optymalne zużycie energii podczas użytkowania budynku. Dzięki skrępowaniu można zmniejszyć grubość murów, a więc zwiększyć ich smukłość bez wpływu na pogorszenie sztywności budynku. Ponadto skrępowanie muru może również zmniejszyć liczbę albo zupełnie wyeliminować wykonanie ścian konstrukcyjnych wewnętrznych.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Wszystkie te elementy decydują, że technologia murów skrępowanych wpisuje się w szeroko pojęte zasady zrównoważonego rozwoju.



Rys. 4.3.11 Przykład elewacji budynku ze ścianami skrępowanymi Campus on the Sabarmati IIT Gandhinagar – Indie [94]



Rys. 4.3.12 Przykład elewacji budynku ze ścianami skrępowanymi Campus on the Sabarmati IIT Gandhinagar – Indie [94]



4.4. Wyniki badań skrępowanych modeli poddanych ściskaniu

W literaturze można znaleźć wiele publikacji na temat murów skrępowanych. Jednak zdecydowana większość z nich dotyczy murów poddanych wpływom sejsmicznym, murom badanym pod obciążeniem cyklicznym lub badanym na stołach wibracyjnych. Tylko niewielka liczba publikacji opisuje badania ścian skrępowanych obciążonych monotonicznie. Wśród nich są publikacje dotyczące murów ściskanych, ścinanych oraz zginanych. W związku z tematem pracy poniżej prezentuje się wyniki badań skrępowanych murów ściskanych. Opis wyników badań murów zginanych znaleźć można w pracy [29], a murów ścinanych w pracy [37].

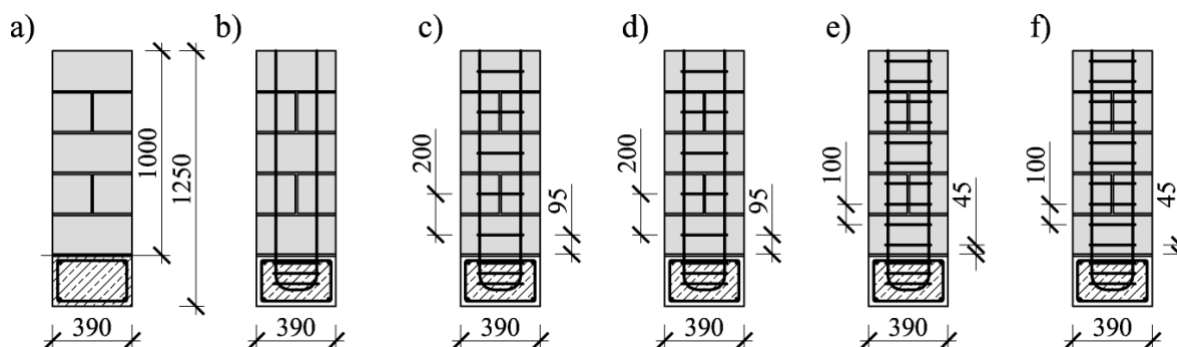
Badania kanadyjskie

Jednym z badań murów skrępowanych poddanych ściskaniu są kanadyjskie analizy ściskanych słupków krępujących obudowanych elementami murowymi [36], [76]. Badaniom poddano siedemnaście elementów próbnych, różniących się konfiguracją zbrojenia (Rys. 4.4.1). Szczegółowe informacje dotyczące badanych modeli przedstawia Tablica 4.4.1.

Gabaryty wszystkich badanych elementów były takie same, a ich wysokość wynosiła 1250 mm (bez podwaliny 1000 mm). Każdy model składał się z pięciu warstw elementów murowych połączonych spoinami o grubości 10 mm, umiejscowionych na podwalinie żelbetowej o wymiarach 400 x 400 x 250 mm. Elementy murowe miały przekrój poprzeczny w kształcie litery C o wymiarach: szerokość półki 190 mm, długość 390 mm, grubość 70 mm i wysokość 190 mm. Większość modeli miała zbrojenie pionowe w formie czterech prętów 20M (średnica 19,5 mm). Zastosowano również zbrojenie poprzeczne o średnicach 10M (11,3 mm) oraz 15M (16,0 mm). Granica plastyczności stosowanego zbrojenia wynosiła 420 N/mm².



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.4.1 Badane próbki [36]: a) BE-R-0, b) BE-R-10M/200, c) BE-R-15M/200, d) BE-R-10M/100, e) BE-R-15M/100

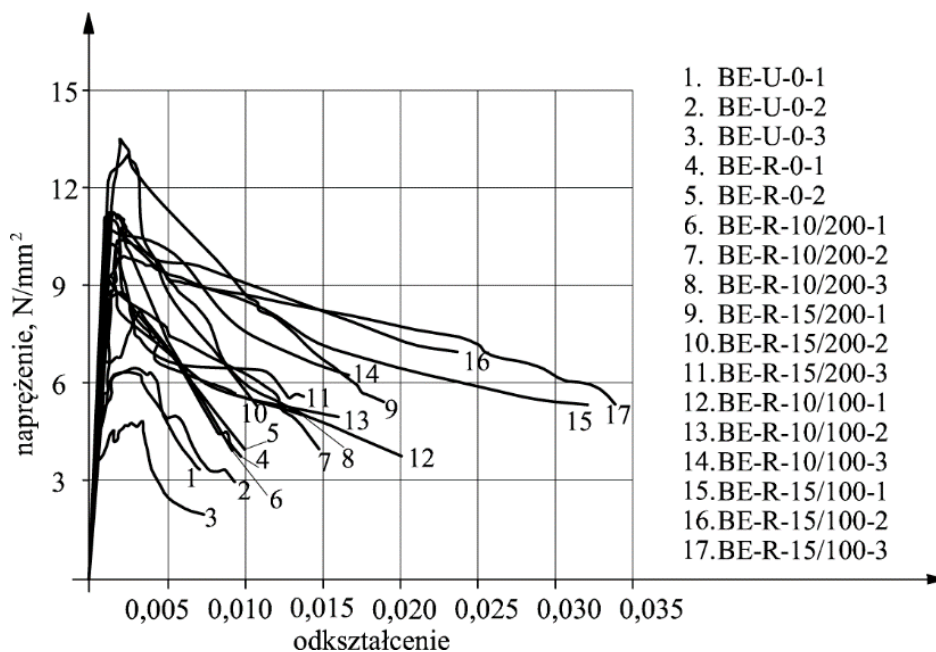
Tablica 4.4.1 Zestawienie badanych elementów próbnych według [36] [76]

Oznaczenie muru	Liczba elementów próbnych	Zbrojenie pionowe [mm]	Średnica i rozstaw zbrojenia poprzecznego [mm]
BE-U-0	2	-	-
BE-R-0	3	4 ϕ 19,5	-
BE-R-10/200	3	4 ϕ 19,5	ϕ 11,3 co 200
BE-R-15/200	3	4 ϕ 19,5	ϕ 16,0 co 200
BE-R-10/100	3	4 ϕ 19,5	ϕ 11,3 co 100
BE-R-15/100	3	4 ϕ 19,5	ϕ 16,0 co 100

Elementy próbne zostały poddane obciążeniu ściskającemu, przez stalowe płyty grubości 50 mm, ułożone na warstwie gipsu wysokiej wytrzymałości. Obciążenie przykładano w kroku 0,45 mm na minutę. Na Rys. 4.4.2 pokazano wykresy naprężenie-odkształcenie uzyskane z badań wszystkich modeli. Widać wyraźny wpływ zbrojenia na nośność modeli. Ściany oznaczone jako BE-R-0 (mury ze zbrojeniem pionowym) w porównaniu do modeli BE-U-0 (bez zbrojenia), odznaczały się znacząco większą nośnością (wzrost o 50%), co niewątpliwie wskazuje na korzystny wpływ zbrojenia pionowego. Zastosowanie dodatkowych strzemion pozwoliło na dalszy wzrost nośności od 19% (model BE R 10/200) do 46% (model BE-R-15/200).



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



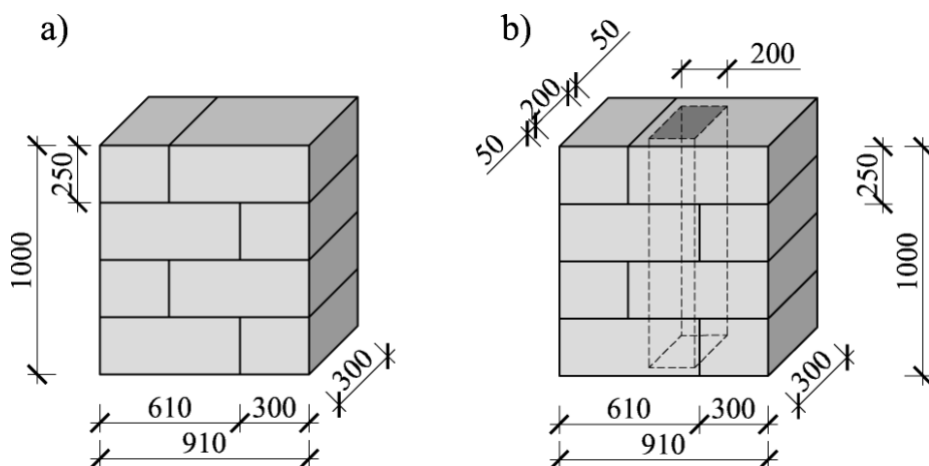
Rys. 4.4.2 Wykresy naprężenie-odkształcenie uzyskane z badań [36], [76]

Badania Iernutan i Babota

Iernutan i Babota [44] podjęli próbę przeanalizowania pracy konstrukcji, w której elementy krępujące nie mają zbrojenia prętowego. Skrępowanie zrealizowano przez wykonanie elementów betonowych ze zbrojeniem rozproszonym w otworach znajdujących się w elementach murowych. Zdaniem autorów rozwiązanie to miało stanowić alternatywę skrępowania budynków znajdujących się na terenach mniej aktywnych sejsmicznie, zapewniając ochronę przed kruchym zniszczeniem konstrukcji. Wykonano modele badawcze o długości 91 cm, wysokości 100 cm, grubości 30 cm. Modele wymurowano z elementów z ABK o wymiarach 600 x 250 x 300 mm, przy grubości spoin równych 10 mm (Rys. 4.4.3). W modelach skrępowanych wykonano po jednym pionowym otworze o przekroju 200 x 200 mm, który wypełniano mieszanką betonową C 16/25 z metalowym zbrojeniem rozproszonym WHS 50/09/H. Zbadano trzy modele nieskrępowane oraz dwa skrępowane. Modele badano w prasie hydraulicznej w jednym cyklu, aż do zniszczenia.

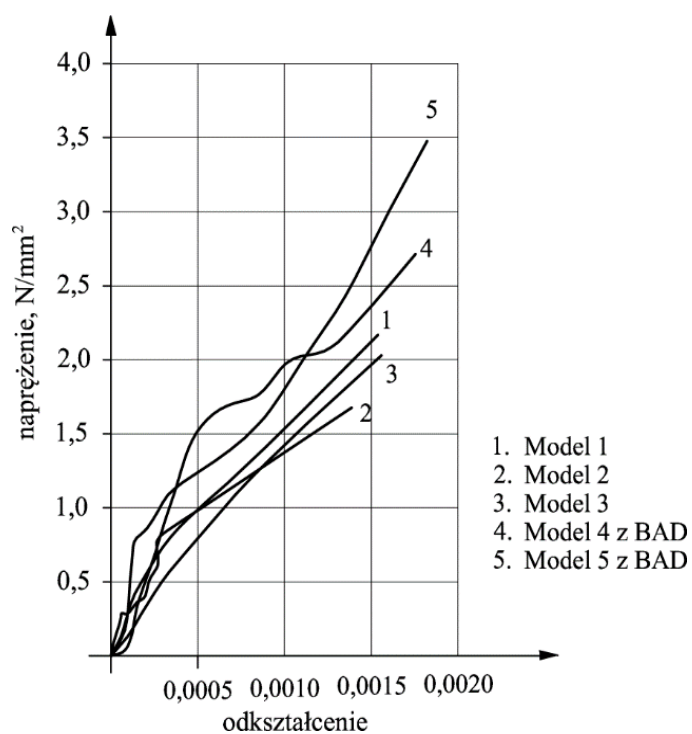


Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.4.3 Modele wykorzystane w badaniach [44]: a) nieskrępowane, b) skrępowane

Na Rys. 4.4.4 pokazano wykresy naprężenie-odkształcenie uzyskane z badań. Na podstawie zrealizowanych badań stwierdzono 59% przyrost nośności muru z elementem skrępowanym elementem betonowym ze zbrojeniem rozproszonym w stosunku do ściany bez skrępowania oraz zwiększenie granicznych deformacji o 12%. Odnotowano również prawie dwukrotnie większe wartości modułów sprężystości dla ścian skrępowanych w odniesieniu do ścian bez skrępowania.

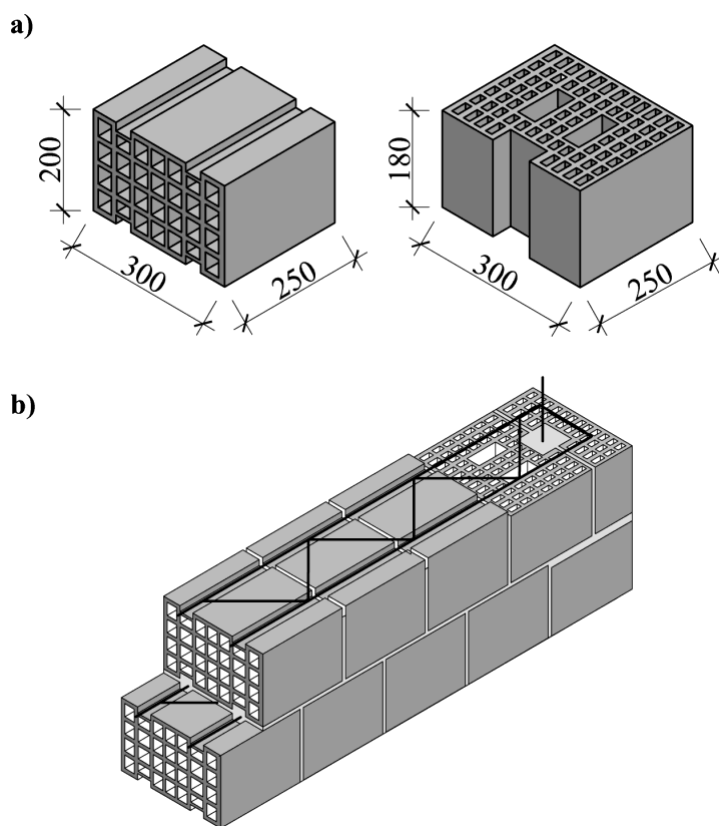


Rys. 4.4.4 Wykresy naprężenie odkształcenie z badań [44]



Badania Da Porto, Mosele i Modena

Da Porto, Mosele i Modena wykonali badania ceramicznych murów ściskanych skrępowanych zbrojeniem pionowym i poziomym [8] i [75]. W badaniach wykorzystano ceramiczne elementy murowe dwóch typów. Typ pierwszy miał drążenia poziome oraz poziome bruzdy na powierzchniach wspornych, w których umieszczane było zbrojenie typu kratowniczka. Drugi typ ceramicznych elementów murowych miał drążenie pionowe, przez które prowadzono zbrojenie pionowe. Elementy murowe i ideę skrępowania badanego systemu pokazano na Rys. 4.4.5.

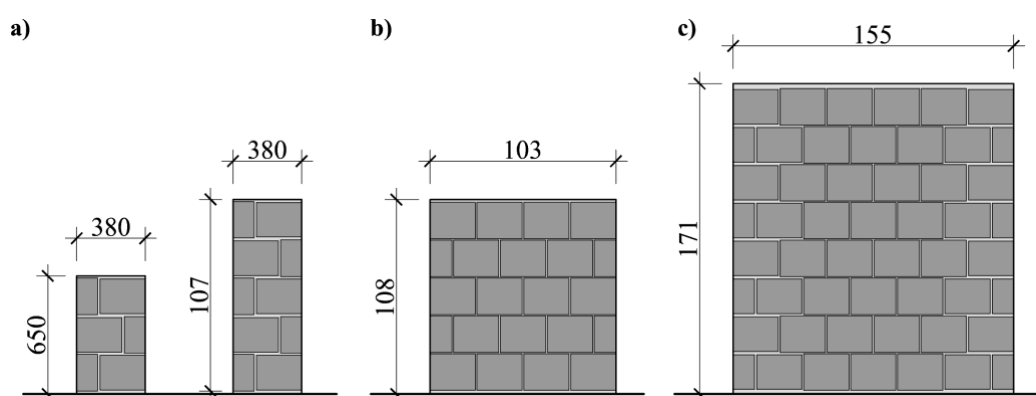


Rys. 4.4.5 Elementy murowe i mur: a) kształt elementu murowego i idea zbrojenia
b) wykonawstwo w badaniach Da Porto, Mosele i Modeny [8], [75]

Badania prowadzono na elementach badawczych obejmujących cały system (ze zbrojeniem poziomym i pionowym) oraz na próbkach zbrojonych tylko pionowo lub tylko poziomo. Badano murowane słupki zbrojone tylko pionowo (Rys. 4.4.6a) o szerokości 38 cm i wysokości 65 cm (seria C3) oraz 107 cm (seria C5). Modele zbrojone tylko pionowo (Rys. 4.4.6b) miały szerokość 103 cm i wysokość 108 cm, i zbrojone były prętami żebrowanymi średnicy 6 mm, niepowiązаныmi wzajemnie (seria SRHC) oraz zbrojeniem typu kratowniczka z prętami głównymi średnicy 5 mm (seria



TRHC). Elementy badawcze obejmujące cały system (zbrojone poziomo i pionowo) miały szerokość 155 cm i wysokość 171 cm (Rys. 4.4.6c). Podobnie jak modele zbrojone tylko poziomo, elementy te zbrojono przy użyciu prętów średnicy 6 mm (seria SRC) i zbrojenia typu kratowniczka (seria TRC). Wyniki badań uśrednione w ramach każdej z serii zestawiono w Tablica 4.4.2.



Rys. 4.4.6 Modele badawcze w badaniach Da Porto, Mosele i Modeny:
a) murowane słupki zbrojone pionowo (serie C3 i C5),
b) murowane ściany zbrojone poziomo (serie SRHC i TRHC),
c) murowane ściany zbrojone pionowo i poziomo (serie SRC i TRC) [8] [75]

Tablica 4.4.2 Wyniki badań Da Porto, Mosele i Modeny [8] [75]

Seria	Wytrzymałość na ściskanie f_c , [N/mm ²]	Moduł sprężystości [N/mm ²]	Współczynnik Poissona
C3	5,44	7781	0,23
C5	5,73	7587	0,23
SRHC	2,95	4225	0,18
TRHC	2,48	4427	0,20
SRC	4,11	6492	0,10
TRC	3,69	5231	0,12

Największą nośność wykazały model słupowe, lecz miały one największy procentowy udział zbrojenia. Modele zbrojone pionowo i poziomo (serie SRC i TRC) miały nośność większą od modeli zbrojonych tylko pionowo odpowiednio o blisko 40% i 50%. Szkoda, że autorzy badań nie przebadali modeli bez zbrojenia.



4.5. Analizy obliczeniowe murów skrępowanych

W niniejszym punkcie opisano modele obliczeniowe wykorzystywane na świecie do analiz murów skrępowanych. Skupiono się na modelach analitycznych, nie opisywano modeli numerycznych. Ponadto opisano założenia modelu obliczeniowego przyjętego w projekcie Eurokodu 6 – PrEN 1996-1-1 [N26] z października 2019 r. (niestety w końcowej wersji projektu Eurokodu 6 zaleceń tych nie ujęto [N18]). Analizy numeryczne opisano również w [16], [26].

Modele prętowe (Strut and Tie)

Modele prętowe typu Strut & Tie (S-T) stosowane są dość powszechnie do analiz murów skrępowanych. Wykorzystuje się je głównie do analiz murów podanych wpływom sejsmicznym [1], [4], [38], [42], [64], [66], [88], nic jednak nie stoi na przeszkodzie, aby modele te stosować przy obciążeniu monotonicznym. Należy tu jednak pamiętać, że norma Eurokod 6 PN-EN 1996-1-1 [N18] nie uwzględnia modeli prętowych. Modele prętowe bywają znacznie częściej stosowane w analizach konstrukcji żelbetowych.

Zasady tworzenia modeli prętowych opisał Starosolski w pracy [89]. W konstrukcji wydziela się tzw. obszary B i D. Obszar B to taki obszar, w którym obowiązuje zasada Bernoulliego (przekroje płaskie przed obciążeniem pozostają płaskie po obciążeniu), a przebieg naprężeń jest liniowy. W obszarze D występują lokalne koncentracje lub/i zaburzenia geometrii generujące krzywoliniowy przebieg naprężeń. Tworzenie modeli prętowych polega na zstępowaniu stref ściskanych i rozciąganych konstrukcji prętami ściskanymi (strut) i rozciąganymi (tie). O ile w strefach B przyjęcie przebiegu tych elementów jest stosunkowo łatwe, to w obszarach D nie jest już takie oczywiste. W ustaleniu ich przebiegu można wspomóc się modelami MES lub tzw. metodą ścieżek sił, która jednak wymaga dobrego wyczucia rozkładu naprężeń w analizowanym obszarze.

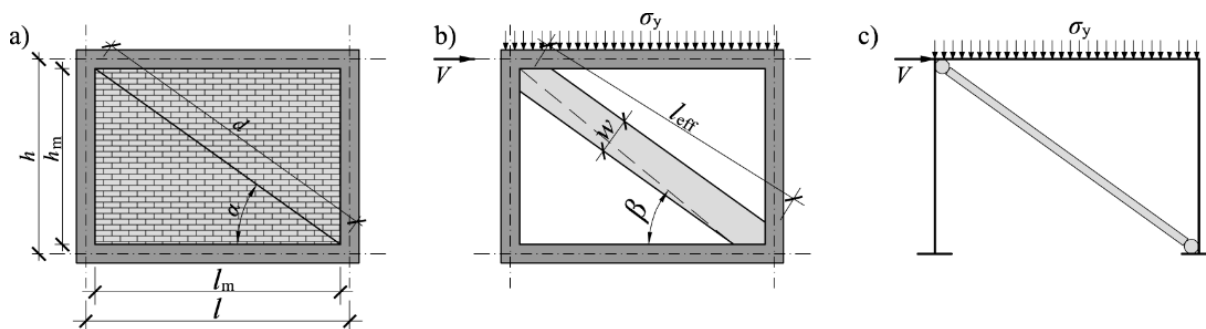
Tworzenie modelu prętowego muru skrępowanego różni się nieco od tworzenia modeli prętowych w konstrukcjach żelbetowych czy klasycznych konstrukcjach murowych. Należy tu bowiem uwzględnić różną sztywność betonu i muru. Dlatego w pierwszej kolejności zastępuje się żelbetowe rygle i rdzenie krępujące prętami, a następnie w tak skonstruowaną ramę wprowadza się przegubowo podparte pręty odwzorowujące przebieg ściskania w murze.

Modele prętowe najczęściej stosuje się w analizie skrępowanych murów ścinanych, choć spotyka się również przypadki analiz murów ściskanych [38]. Na Rys. 4.5.1 pokazano sposób tworzenia prętowego modelu ścinanego muru skrępowanego. W skrępowanych murach ścianach strefa ściskana konstrukcji murowej kształtuje się wzdłuż przekątnej. Zazwyczaj przyjmuje się,



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

że mur nie ma wytrzymałości na rozciąganie, wobec tego w strefach muru nie zakłada się występowania prętów rozciąganych.



Rys. 4.5.1 Założenia modelu prętowego muru ściskanego:

- a) geometria konstrukcji,
- b) zastępczy pręt ściskany,
- c) model prętowy

Zniszczenie ściskanego i ściskanego muru skrępowanego może wystąpić na skutek poślizgu w płaszczyźnie spoin wspornych, zarysowania ukośnego, ściskania ukośnego lub miażdżenia muru w strefie narożnika. W literaturze znaleźć można wiele analiz dotyczących modeli prętowych skrępowanych murów ściskanych. Dla podstawowego schematu pokazanego na Rys. 4.5.1c wyprowadzono wzory analityczne, które następnie modyfikowano w zależności od wyników badań. W Tablica 4.5.1 zestawiono wybrane wzory na nośność ściskanego i ściskanego muru skrępowanego.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 4.5.1 Wzory na nośność muru skrępowanego

Badacz / norma	Nośność muru skrępowanego
Decanini L.D., Fantin G.E [9]	$N_s = [(1,2\sin\alpha + 0,45\cos\alpha)f_{v0} + 0,3\sigma_y]td$ (1)
	$N_{dt} = (0,6\tau_{mv} + 0,3\sigma_y)td$ (2)
	$N_{dc} = \frac{1,16tg\alpha}{\lambda_h}ftd$ (3)
	$N_{cc} = \frac{1,12\sin\alpha\cos\alpha}{\lambda_n^{0,88}}ftd$ (4)
Priestley M.J.N., Calvi M. [77]	$N_s = \frac{f_{v0}}{1-0,3h/l}td$ (5)
	$N_{dt} = \frac{\pi}{2}f_ttd$ (6)
	$N_{dt} = \frac{2}{3}ztf\sec\alpha, \quad z = \frac{\pi}{2}\frac{h}{\lambda_h}$ (7)
Saneinejad A., Hobbs B. [86]	$N_s = \min\left\{\frac{\gamma f_{v0}td}{1-0,45\tan\beta}, 0,83\gamma td\right\}$ (8)
	$N_{dt} = 2\sqrt{2}th_m f_t \cos\alpha$ (9)
	$N_{dc} = \frac{0,5h_m f_a}{\cos\alpha}, \quad f_a = 0,39f\left[1 - \left(\frac{l_{eff}}{40t}\right)^2\right]$ (10)
FEMA 306 [N3]	$N_s = \frac{(f_{v0} + \mu\sigma_y)}{\cos\alpha}lt$ (11)
	$N_{dt} = 2\sqrt{2}th_m f_t \cos\alpha$ (12)
	$N_{dt} = wtf_{90}$ (13)
<p>gdzie:</p> <p>N_s – siła wywołująca poślizg w spoinie wspornej, N_{dt} – siła wywołująca zarysowanie ukośne, N_{dc} – siła wywołująca zniszczenie z uwagi na nośność ściskanego krzyżulca, N_{cc} – siła wywołująca zniszczenie z uwagi na zmiążdżenie muru w narożniku, σ_y – naprężenie ściskające, f_{v0} – początkowa wytrzymałość muru na ścinanie, τ_{mv} – wytrzymałość na ścinanie uzyskana z badań ukośnego ściskania, f – wytrzymałość muru na ściskanie, f_t – wytrzymałość muru na rozciąganie, λ_h – parametr bezwymiarowy: $\lambda_h = \sqrt[4]{\frac{Ets\sin 2\alpha}{4E_c l_c h_m}}$, E – moduł sprężystości muru, E_c – moduł sprężystości rdzenia krępującego, I_s – moment bezwładności rdzenia krępującego, t – grubość muru, $d, l, h, h_m, l_m, \alpha, l_{eff}, w$ – dane geometryczne</p>	

W metodzie Strut & Tie kluczowe jest przyjęcie szerokości ściskanego pasma muru w . Szerokość ta zależy od stosunku sztywności ramy krępującej do sztywności muru.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Szywność definiuje się zazwyczaj właśnie w zależności od szerokości pasma ściskanego [66]:

$$k = \frac{Etw}{d}. \quad (14)$$

W przypadku braku informacji o wytrzymałości muru na ścinanie uzyskanej z badania ukośnego ścinania w pracy [66] podano przybliżoną zależność:

$$\tau_{mv} = 0,285\sqrt{f} \quad (15)$$

W Tablica 4.5.2 zestawiono propozycje wzorów opisujących szerokość w pasma ściskanego muru. We wzorach tych występuje wytrzymałość muru na rozciąganie. Niestety obowiązujące obecnie normy do projektowania konstrukcji murowych, z Eurokodem [N18] na czele, nie definiują wytrzymałości muru na rozciąganie f_t . W archiwalnej krajowej normie PN-B-03002:1999 [N9] opartej na projekcie Eurokodu 6, zamieszczono zapis, że wytrzymałość charakterystyczną na rozciąganie f_{tk} należy przyjmować równą wytrzymałości na zginanie z płaszczyzny ściany. Każdorazowo należy określić kierunek działania głównych naprężeń rozciągających względem płaszczyzny spoin wspornych i w zależności od tego przyjmować z licy zamieszczonej w normie wartości wytrzymałości $f_{tk} = f_{xk1}$ lub też $f_{tk} = f_{xk2}$. Co ciekawe, w przypadku zniszczenia w płaszczyźnie równoległej do spoin wspornych, przy murach wykonanych z większości rodzajów elementów murowych norma PN-B-03002:1999 [N9] podawała zerową wytrzymałość f_{xk1} . W obowiązującej normie PN-EN 1996-1-1 [N18] wartości te nie są już zerowe, a same lice definiujące wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu uległy znacznej rozbudowie. Wartości wytrzymałości f_{xk2} , gdy zniszczenie (zarysowanie) następuje prostopadle do spoin wspornych mają podobny rząd wielkości jak w normie archiwalnej. Dlatego wydaje się dopuszczalne przyjęcie definiowanej przez Eurokod-6 [N18] wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu jako wartości granicznej powstania zarysowań przy rozciąganiu osiowym [35].



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 4.5.2 Wzory opisujące szerokość pasma ściskanego muru

Badacz / norma	Szerokość pasma ściskanego
Decanini L.D., Fantin G.E [9]	$w = \left(\frac{k_1}{\lambda_h} + k_2 \right) d \quad (16)$ $\lambda_h < 3,14 \Rightarrow k_1 = 1,3, k_2 = -0,178.$ $3,14 < \lambda_h < 7,85 \Rightarrow k_1 = 0,707, k_2 = 0,01$ $\lambda_h > 7,85 \Rightarrow k_1 = 0,47, k_2 = 0,04$
Priestley M.J.N., Calvi M. [77]	$w = \frac{d}{4} \quad (17)$
Saneinejad A., Hobbs B. [86]	$w = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \frac{h_m \frac{f_a}{0,39f}}{\cos \alpha} \\ \frac{(1-\alpha_c) \alpha_c h \frac{\sigma_c}{0,39f} + \alpha_b l \frac{\tau_b}{0,39f}}{\cos \alpha} \end{array} \right. \quad (18)$
FEMA 306 [N3]	$w = 0,175 \lambda_h^{-0,4} d \quad (19)$
<p>gdzie: α_c – procentowy zakres kontaktu między rdzeniem a murem pod deformacji, α_b – procentowy zakres kontaktu między rygłem a murem pod deformacji, σ_c – naprężenie wzdłuż słupa, τ_b – naprężenie wzdłuż rygla</p>	

Budowa prostego modelu prętowego wymaga przestrzegania pewnych podstawowych założeń. W pracach [59], [60], [78], [79] znaleźć można wytyczne do budowy modeli muru nieskrępowanego. Mają one następującą postać:

- Modele powinny być tak proste jak to możliwe to znaczy, że liczba prętów ściskanych i rozciąganych powinna być ograniczona do minimum.
- Stosowane w modelu krzyżulce opisujące pola ściskań mogą być zdefiniowane w postaci rozmytej lub w postaci dyskretnej.
- W celu odwzorowania obciążenia skupionego w węźle powinny zbiegać się co najmniej dwa krzyżulce ściskane.
- Skoncentrowane lub równomiernie rozłożone obciążenia wywołują w ścianie rozkład pól ściskań w kształcie równoległoboku z poziomymi rozciąganymi ściągami.
- Maksymalne nachylenie ściskanych krzyżulców względem płaszczyzny spoin czołowych jest ograniczone przez maksymalne naprężenia styczne w spoinach wspornych. Jeżeli do opisu maksymalnych naprężeń ścinających przyjmie się liniową zależność Coulomba-Mohra, wtedy iloraz maksymalnych naprężeń ścinających i średnich naprężeń ściskających w ścianie wyznacza tangens kąta maksymalnego pochylania krzyżulców według zależności:



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

$$tg\alpha = \frac{\tau_R}{\sigma_y} = \frac{f_{v0} + tg\gamma\sigma_y}{\sigma_y} = tg\gamma + \frac{f_{v0}}{\sigma_y}, \quad (20)$$

gdzie:

$tg\gamma$ – współczynnik tarcia zaprawy w płaszczyźnie spoin wspornych.

- Kąt pochylenia rozciąganych prętów zależy od stosunku wytrzymałości muru na rozciąganie w kierunku prostopadłym i równoległym do spoin wspornych. Ponieważ wytrzymałość na rozciąganie w kierunku prostopadłym do spoin wspornych jest bliska zeru, dlatego przyjmuje się, że ściągi mogą mieć tylko kierunek poziomy.
- Siła rozciągająca w ściągu zależy od pochylenia ściskanych krzyżulców zbiegających się w węzłach i nie powinna przekroczyć nośności ściągu na rozciąganie. W praktyce wytrzymałość muru na rozciąganie w spoinach czołowych jest znikomo mała w związku z tym wytrzymałość na rozciąganie zależy od wytrzymałości muru na ścinanie w płaszczyznach spoin wspornych. Maksymalna siła rozciągająca T w ściągu określa się z następującego warunku:

$$T \leq N_i tg\alpha, \quad (21)$$

w którym N_i jest minimalną siłą w krzyżulcu zbiegającym się w rozpatrywanym węźle. Ponadto rozciągająca siła w ściągu nie powinna być większa od nośności elementów murowych na rozciąganie:

$$T \leq A_{bt} f_{bt}, \quad (22)$$

gdzie:

A_{bt} – pole powierzchni przekroju poprzecznego elementów murowych,

f_{bt} – wytrzymałość na rozciąganie elementów murowych wyznaczona w kierunku równoległym do powierzchni wspornej,

- W wewnętrznych węzłach typu dyskretnego (CCT) składającego się z dwóch ściskanych krzyżulców i rozciąganej siłą T ściągu, spełniony powinien być następujący warunek:

$$T = N_i (tg\beta_1 - tg\beta_2) \leq N_i tg\alpha, \quad (23)$$

w którym β_1 i β_2 są kątami pochylenia ściskanych krzyżulców zbiegających się w rozpatrywanym węźle.



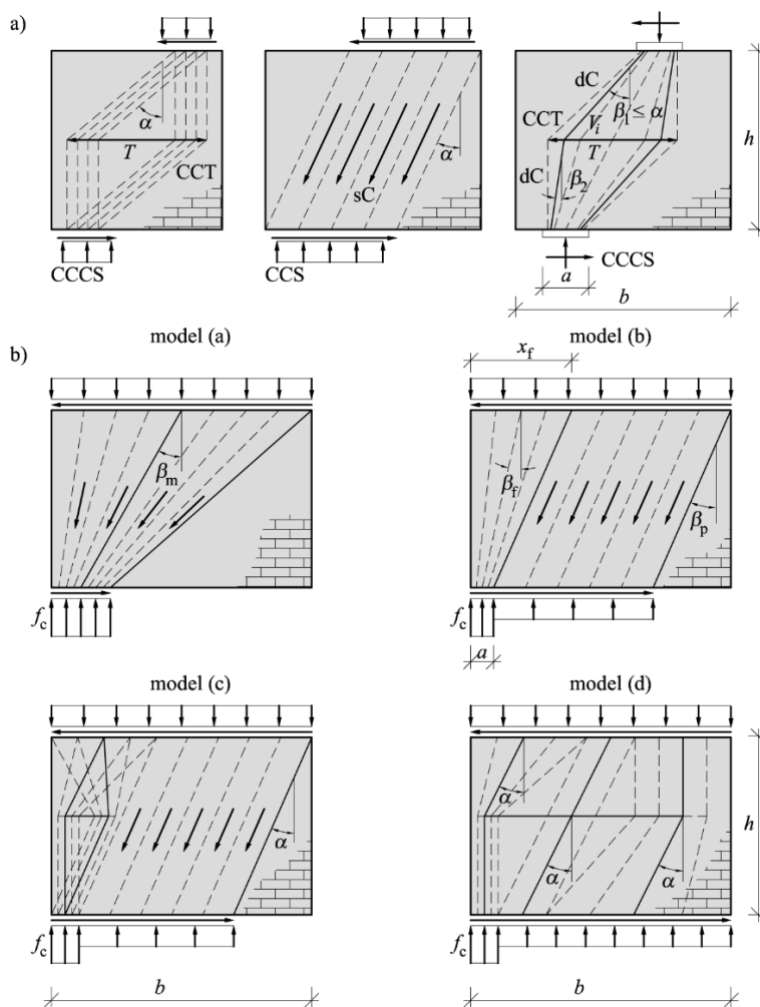
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

- Minimalną długość zewnętrznego węzła, w którym przyłożone jest skupione obciążenie lub reakcja podporowa i występuje jeden rozmyty ściskany krzyżulec (CCS) lub dwa dyskretne ściskane krzyżulce (CCCS) oblicza się z zależności:

$$a \geq \frac{N}{t f'_c} \quad (24)$$

- Kształt i położenie prętów ściskanych oraz rozciąganych ściągów powinny być dostosowane do obserwowanego w badaniach sposobu zarysowania i zniszczenia.

Uwzględniając powyższe założenia w praktyce stosuje się dwa typy modeli kratownicowych z dyskretnymi prętami – modele typu I (Rys. 4.5.2a) i z rozmytymi prętami – modele typu II (Rys. 4.5.2b).



Rys. 4.5.2 Modele prętowe ścian: a) modele obciążone siłami skupionymi (modele typu I), b) modele obciążone równomiernie (modele typu II)



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Jasiński w pracy [57] podaje, że nośność na ścinanie modeli typu I z dyskretnymi prętami kratownicy wyraża następująca zależność:

$$V_I = \min \left\{ \begin{array}{l} N \frac{b-d-m}{h} \\ \frac{2}{3} N t g \alpha \\ \frac{2dN}{4m} t g \beta_1 \end{array} \right. , \quad (25)$$

w której:

N – całkowite pionowe obciążenie ściany,

d – minimalna odległość od pola zewnętrznego obciążenia do pionowej krawędzi ściany zależną od mimośrodu zewnętrznego obciążenia ($d = b/2 - e - m/2$),

b – długość ściany,

$m = \frac{N}{t f_c}$ – minimalna szerokość, na której przekazywane są zewnętrzne obciążenia ściskające

przy założeniu pełnego uplastycznienia muru,

t – grubość ściany,

$x = b - d + m$ – odległość między pionowymi wypadkowymi siłami działającymi na górnej i dolnej krawędzi ściany,

f_c – wytrzymałość na ściskanie muru.

Nośność ściany z rozmytymi krzyżulcami – model typu II oblicza się natomiast ze wzoru:

$$V_I = \min \left\{ \begin{array}{l} N t g \alpha \left[1 - \frac{h}{2b} t g \alpha \left(\frac{1}{1-\nu} \right) \right] \quad \text{gdy } m \leq b - h t g \alpha \text{ oraz } x \leq b \\ V \frac{b-m}{2h} \quad \text{gdy } m > b - h t g \alpha \end{array} \right. , \quad (26)$$

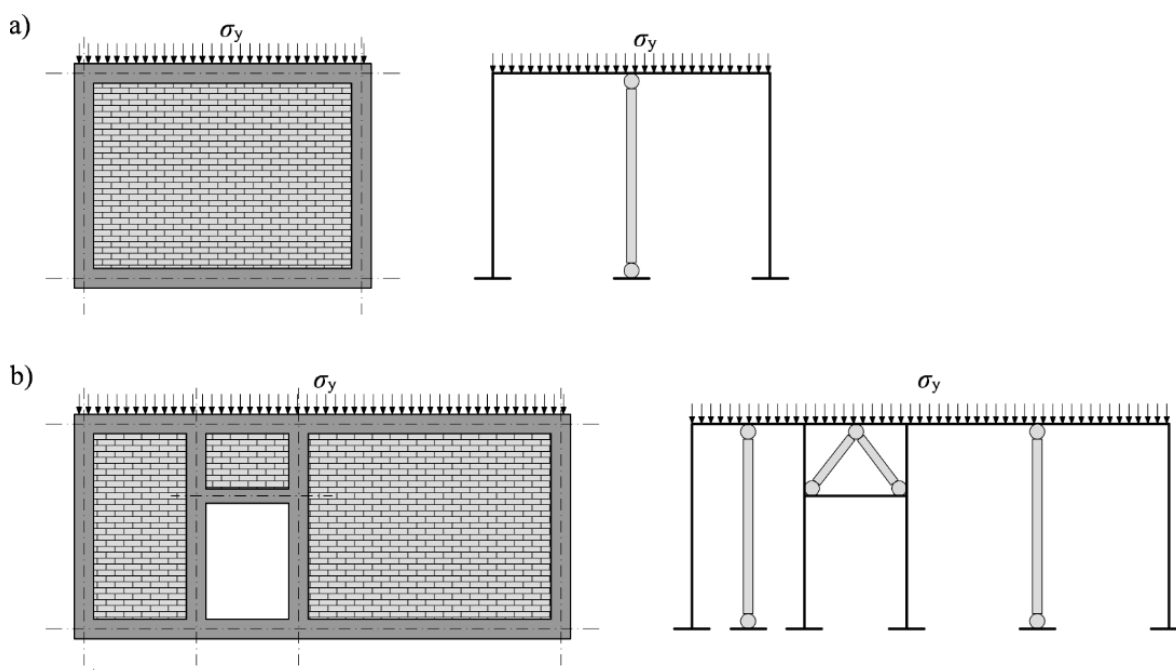
Powyższe zalecenia można z powodzeniem adoptować w prętowych modelach murów skrępowanych, z tą różnicą, że zazwyczaj w takich modelach nie uwzględnia się stref rozciąganych muru (rozciąganie przejmuje żelbet). Wyjątek stanowią jedynie murowe elementy zbrojone (np. nadproża z betonu komórkowego). Na Rys. 4.5.3 oraz Rys. 4.5.4 za [38] pokazano przykładowe modele prętowe wybranych ścian skrępowanych poddanych ściskaniu i ścinaniu. W modelach tych kolorem ciemnym zaznaczono ramy żelbetowe, a grubsze pręty z jasnoszarym wypełnieniem



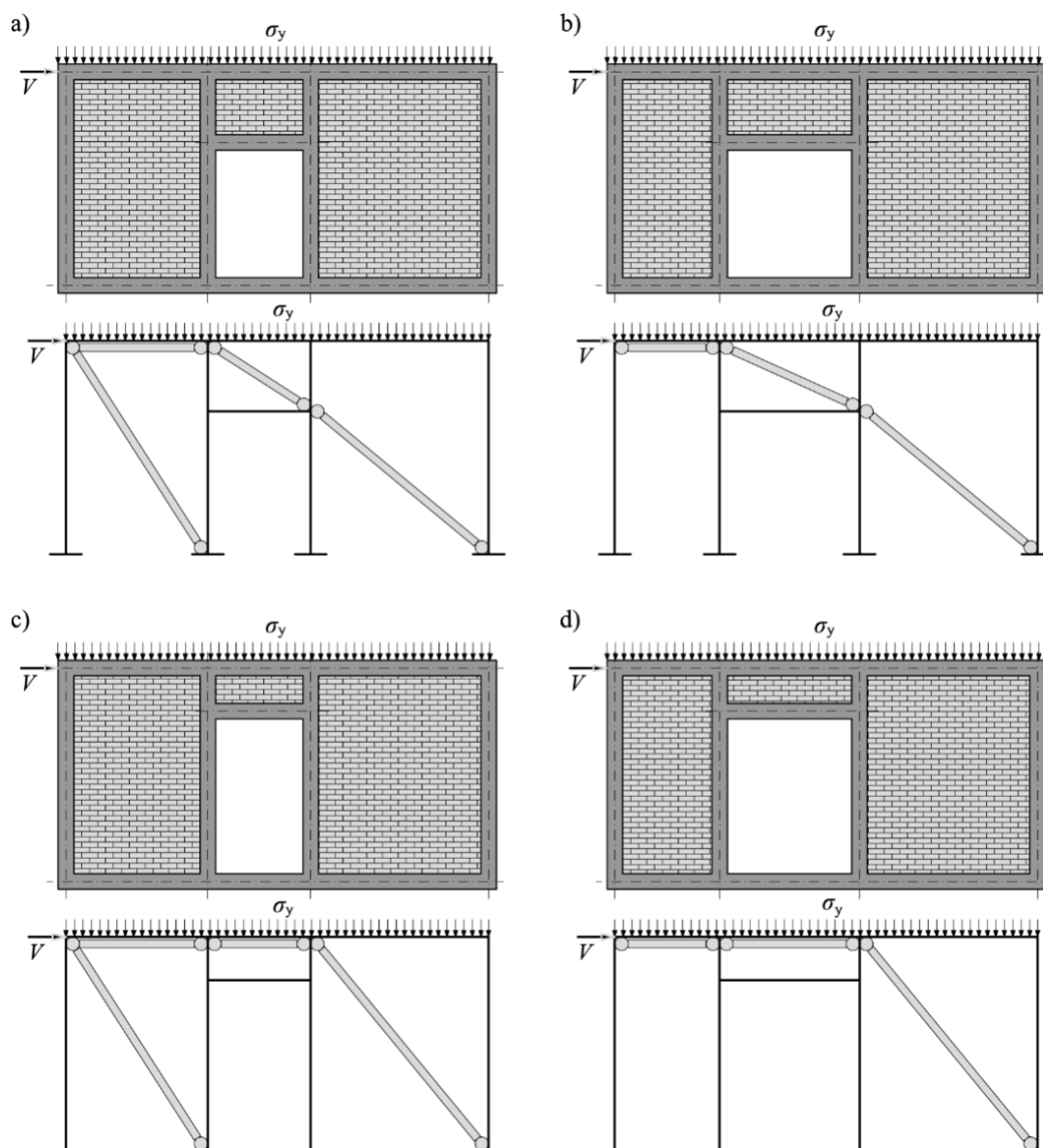
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

oznaczają ściskany mur. W przypadku ścinanych ścian z otworami w pracy [38], na podstawie analizy wyników obliczeń numerycznych przyjęto, że pracę ściany można modelować wzdłuż przekątnej w wypadku, gdy stosunek jej wysokości h_m do długości l_m mieści się w przedziale $0,3 < h_m / l_m < 2,0$. W ścianach niespełniających tego warunku (wąskich) założono możliwość występowania tylko pracy w kierunku obciążenia poziomego.

Więcej informacji na temat prętowych modeli ścinanych murów znaleźć można w pracach [50] i [57].



Rys. 4.5.3 Przykładowe modele prętowe skrępowanych ścian ściskanych [38]:
a) ściana bez otworu, b) ściana z otworem



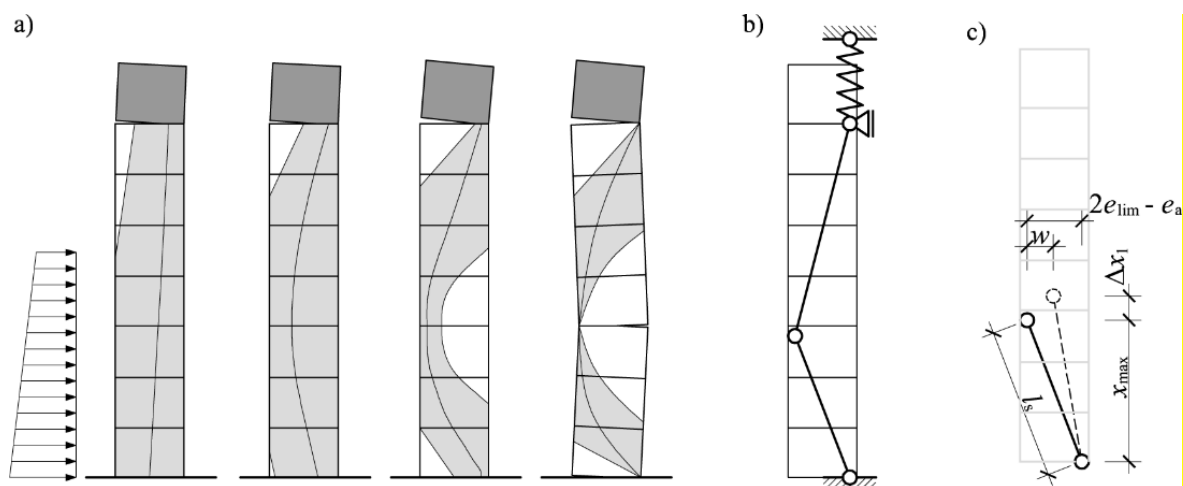
Rys. 4.5.4 Przykładowe modele prętowe skrępowanych ścian ściskanych [38]:

- a) wszystkie pasma muru spełniają warunek $0,3 < h_m / l_m < 2,0$,
- b) w lewym paśmie $h_m / l_m > 2,0$,
- c) w środkowym paśmie $h_m / l_m < 0,3$,
- d) w lewym paśmie $h_m / l_m > 2,0$ i w środkowym paśmie $h_m / l_m < 0,3$

Modele prętowe stosować można również w analizie skrępowanych murów zginanych z płaszczyzny. Jäger i Schöps w pracach [50] i [51] zaprezentowali rozwiązanie modelu prętowego ściany skrępowanej obciążonej parciem gruntu (zginanej z płaszczyzny). Na Rys. 4.5.5a pokazano fazy zniszczenia muru i zmiany położenia obszaru ściskanego, natomiast na Rys. 4.5.5b pokazano przyjęty model prętowy.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.5.5 Model obliczeniowy przyjęty przez Jägera i Schöpsa [51] i [50]:

- a) fazy zniszczenia muru zginanego z płaszczyzny i przebieg ściskań,
- b) model prętowy,
- c) analiza deformacji dolnej części modelu

Analizie poddano deformację modelu na skutek zarysowania i przemieszczenia ściany. Przyjmując, że dolny fragment muru ma stałą wysokość można napisać, że:

$$(x_{max} + \Delta x_1)^2 = l_s^2 - (2e_{lim} - e_a - w)^2, \quad (27)$$

stąd:

$$\Delta x_1 = x_{max} \pm \sqrt{x_{max}^2 + w(4e_{lim} - 2e_a - w)}. \quad (28)$$

Oznaczenia we wzorach (27) i (28) jak na Rys. 4.5.5b. Mimośród niezamierzony $e_a = h_m / 450$, a $e_{lim} = 0,45t$.

Podobną analizę można przeprowadzić dla górnej części modelu, uzyskując Δx_2 . Całkowita deformacja modelu wyniesie:

$$u_x = \Delta x_1 + \Delta x_2, \quad (29)$$

Moment zginający w niezdeformowanej ścianie:

$$M = N(2e_{lim} - e_a), \quad (30)$$



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Natomiast moment w ścianie po deformacji wyniesie:

$$M = N_w(2e_{lim} - e_a - w), \quad (31)$$

Po deformacji ścina musi być zdolna przejąć większą siłę pionową N_w , z uwagi na zmniejszone ramie sił wewnętrznych. Porównując równania (26) i (27) można wyznaczyć wartość tej siły:

$$N_w = N \frac{2e_{lim} - e_a}{2e_{lim} - e_a - w}. \quad (32)$$

Modele bazujące na analizie równowagi sił w przekroju

Lu i Unger w pracy [67] przyjęli założenie, że ścinany mur skrępowany (poddany działaniu siły pionowej, siły poziomej i momentu zginającego działającego w płaszczyźnie) można rozpatrywać zgodnie z normą PN-EN 1996-1-1 [N18] jako dwa przypadki: mur ścinany oraz mur podany zginaniu lub/i obciążony pionowo. W wypadku ścinania założyli oni, że nośność muru skrępowanego V_{Rd} można zapisać w postaci sumy nośności na ścinanie muru V_{Rd1} i elementów żelbetowych V_{Rd2} :

$$V_{Rd} = V_{Rd1} + V_{Rd2} \geq V_{Ed}, \quad (33)$$

gdzie:

V_{Ed} – ścinające obciążenie obliczeniowe działające na ścianę.

Nośność muru na ścinanie, zgodnie z PN-EN 1996-1-1 [N18] można określić z zależności:

$$V_{Rd1} = f_{vd} t l_c, \quad (34)$$

gdzie:

t – grubość ściany przenoszącej ścinanie,

l_c – długość ściskanej części ściany, którą w wypadku murów skrępowanych zalecono w pracy [67] przyjmować równą długości muru l_m .



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Nośność krępujących żelbetowych elementów na ścinanie zalecono w [67] przyjmować według Eurokodu 2 (EC2) [N17] jak minimalną wartość dla elementów nie wymagających zbrojenia na ścinanie:

$$V_{Rd2} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) t d, \quad (35)$$
$$k_1 = 0,15.$$

Wartość v_{min} można obliczyć ze wzoru:

$$v_{min} = 0,035 k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}}, \quad (36)$$

a pozostałe potrzebne parametry z zależności:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 0,2, \quad (37)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{M_{sd}}{t l^2} + \frac{M_{sd}}{t l} \leq 0,2 f_{cd}, \quad (38)$$

gdzie:

f_{ck} – charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie,

f_{cd} – obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie,

d – wysokość użyteczna przekroju.

Nośność uzyskaną ze wzoru (35) należy pomnożyć przez liczbę pionowych elementów krępujących występujących w analizowanej ścianie.

W wypadku elementów zginanych i ściskanych nośność muru skrępowanego zależy według [67] od wielkości sił ściskających. Jeżeli obliczeniowe naprężenie ściskające σ_d nie jest większe od 30% obliczeniowej wytrzymałości muru na ściskanie f_d ($\sigma_d \leq 0,3 f_d$) to występuje czyste zginanie, w przeciwnym przypadku zginanie i ściskanie. Przy czystym zginaniu Lu i Unger [67] proponują dwa podejścia. Pierwsze to określenie nośności muru skrępowanego na podstawie wzorów zawartych w Eurokodzie 6 [N18], przyjmując zależności podane dla murów zbrojonych. Przy założeniu, że mamy do czynienia z zespoloną konstrukcją murowo-żelbetową, przyjmując jako



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

pole zbrojenia A_c i granicę plastyczności f_{yd} parametry zbrojenia w rdzeniu rozciągającym, można zastosować zależność:

$$M_{Rd} = A_s f_{yd} z \geq M_{Sd}, \quad (39)$$

w której:

M_{Rd} – nośność na zginanie (w tym przypadku muru skrępowanego),

M_{Sd} – obliczeniowy moment zginający działający w płaszczyźnie ściany,

z – ramię sił wewnętrznych określone wzorem:

$$z = d \left(1 - 0,5 \frac{A_s f_{yd}}{b d f_d} \right) \leq 0,95d, \quad (40)$$

gdzie:

d – wysokość użyteczna przekroju.

Należy wówczas spełnić dalsze wymagania Eurokodu 6 [N18] w postaci ograniczenia nośności na zginanie, które w przypadku ścian z elementów murowych grupy 1, innych niż wykonane na lekkich kruszywach należy obliczyć ze wzoru:

$$M_{Rd} = 0,4 f_b t d^2 \geq M_{Sd}, \quad (41)$$

a w przypadku ścian z pozostałych elementów ze wzoru:

$$M_{Rd} = 0,3 f_b t d^2 \geq M_{Sd}. \quad (42)$$

Drugie podejście proponowane przez Lu i Ungera [67] w przypadku czystego zginania polega na wyprowadzeniu wzoru na nośność dla założeń pokazanych na Rys. 4.5.6. Z sumy momentów względem środka ciężkości zbrojenia rozciąganego rdzenia, przyjmując, że $M_{Rd} = M_{Sd}$ można wyliczyć:

$$M_{Rd} = t x_u f_d z = t x_u f_d \left(d - \frac{x_u}{2} \right). \quad (43)$$



Wysokość strefy ściskanej przekroju można wyznaczyć z zależności:

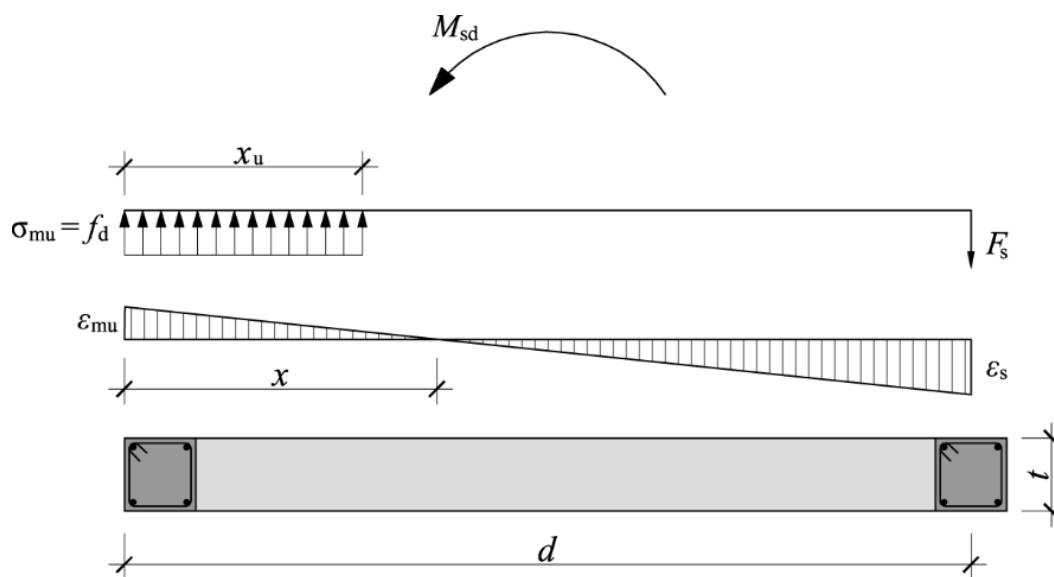
$$x_u = 0,8x, \quad (44)$$

$$x = \frac{\varepsilon_{mu}}{\varepsilon_{mu} + \varepsilon_s} d, \quad (45)$$

gdzie:

ε_{mu} – graniczne odkształcenie muru,

ε_s – odkształcenie plastyczne stali zbrojeniowej.

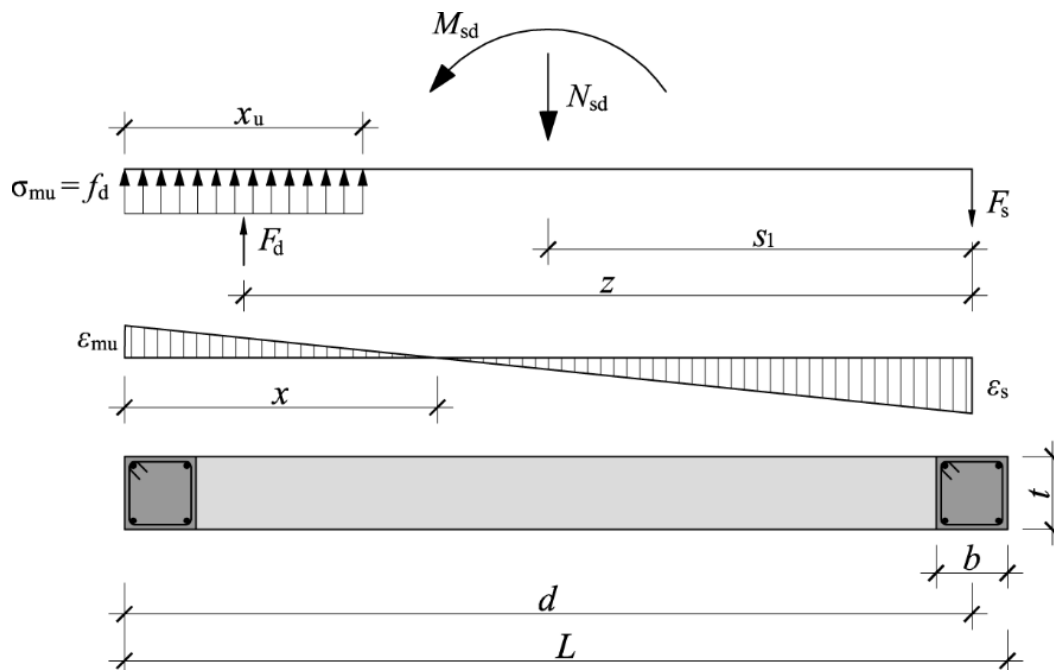


Rys. 4.5.6 Założenia do wyprowadzenia wzoru (43)

W przypadku kombinacji momentu zginającego i siły ściskającej Lu i Unger [67] proponują wyznaczenie nośności w podobny sposób. Różnica polega tu na dodatkowym uwzględnieniu siły pionowej jak na Rys. 4.5.7.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.5.7 Założenia do wyprowadzenia określenia nośności skrępowanych murów zginanych i ściskanych

Wykorzystując równania na sumę rzutów sił na oś pionową i sumę momentów względem środka ciężkości zbrojenia rozciąganego można określić równanie opisujące wielkość ramienia sił wewnętrznych:

$$z = \frac{M_{sd} + N_{sd} \left(\frac{L}{2} - \frac{b}{2} \right)}{N_{sd} + f_{yd} A_s} \quad (46)$$

Siła w ściskanej części przekroju wynosi:

$$F_d = \frac{M_{sd} + N_{sd} \left(\frac{L}{2} - \frac{b}{2} \right)}{z}, \quad (47)$$

i nie powinna ona być większa od wytrzymałości muru na ściskanie:

$$F_d \leq F_{Rd} = x_u t f_d, \quad (48)$$

gdzie:

$$x_u = 2(d - z). \quad (49)$$



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Dodatkowo należy sprawdzić, czy odkształcenia stali nie przekraczają wartości granicznych. W tym celu należy sprawdzić nierówność:

$$\varepsilon_s = \frac{0,8\varepsilon_{mu}d - \varepsilon_{mu}x_u}{x_u} \leq \varepsilon_{s,lim} = 0,1. \quad (50)$$

Wartości granicznego odkształcenia muru można za Eurokodem 6 [N18] przyjmować równe:

$$\varepsilon_{mu} = -0,0035 \quad \text{dla elementów murowych grupy 1,} \quad (51)$$

$$\varepsilon_{mu} = -0,002 \quad \text{dla pozostałych elementów murowych.} \quad (52)$$

Wadą metody zaproponowanej przez Lu i Ungera [67] jest przyjęcie pełnej współpracy betonu i muru oraz nieuwzględnianie wytrzymałości betonu na ściskanie. Metoda nie uwzględnia ponadto wpływu zbrojenia poprzecznego rdzeni na wytrzymałość muru na ścinanie ani efektów drugiego rzędu.

Zalecenia instrukcji i norm

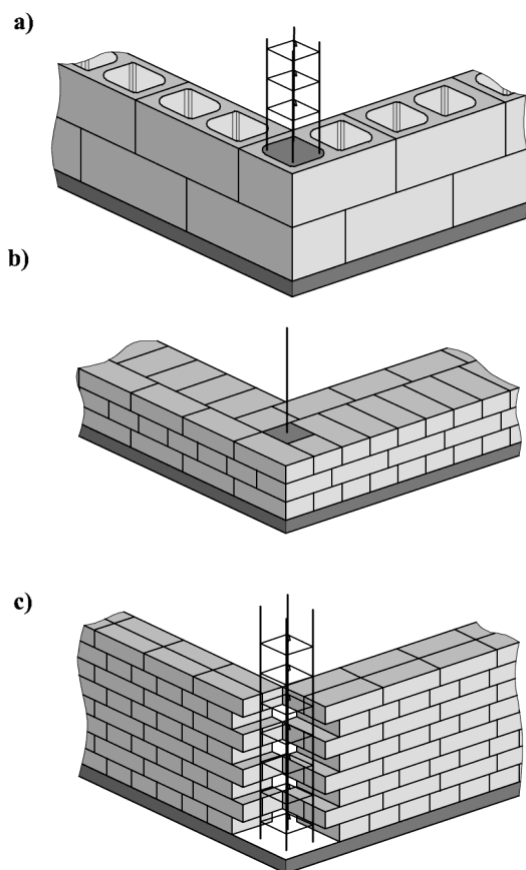
Przed wprowadzeniem Eurokodu 6 [N18] w kraju projektowano i wykonywano mury skrępowane w oparciu o wytyczne ITB, publikacje oraz lokalne tradycje. Pomimo powszechnego stosowania w Polsce murów skrępowanych instrukcja ITB 391/2003 [N6] jest jednym z nielicznych dokumentów określających zasady ich projektowania. Instrukcja ta [N6] rozróżnia trzy sposoby kształtowania pionowych elementów krępujących:

- usytuowanie zbrojenia w drążeniach elementów murowych (Rys. 4.5.8a),
- wykształcenie w murze możliwości przeprowadzenia pojedynczego pręta (Rys. 4.5.8b),
- wykonanie w ścianie żelbetowego słupka / rdzenia (Rys. 4.5.8c).

Najczęściej stosuje się żelbetowe rdzenie.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.5.8 Pionowe elementy krępujące wg instrukcji ITB nr 391/2003 [N6]:

- a) rdzeń w pionowych otworach elementów krępujących,
- b) rdzeń wykształcony przez odpowiednie ułożenie elementów murowych,
- c) rdzeń w między murowanymi ścianami

Zgodnie z instrukcją [N6] stosowanie pionowych elementów krępujących (zwanymi w instrukcji pionowymi wieńcami) jest konieczne, gdy budynek podlega wpływom wstrząsów wywołanych eksploatacją górniczą. Pionowe elementy krępujące należy stosować, gdy wstrząsy o intensywnościach charakteryzowanych przez przyspieszenia podłoża są większe od 500 mm/s^2 . Konieczność stosowania pionowych elementów krępujących w murach narażonych na działanie wstrząsów o znacznej intensywności potwierdza również literatura [65]. W praktyce pionowe żelbetowe rdzenie projektuje się i wykonuje często przy mniejszych wartościach przyspieszenia podłoża oraz w obiektach narażonych na ciągłe i nieciągłe deformacje terenu.

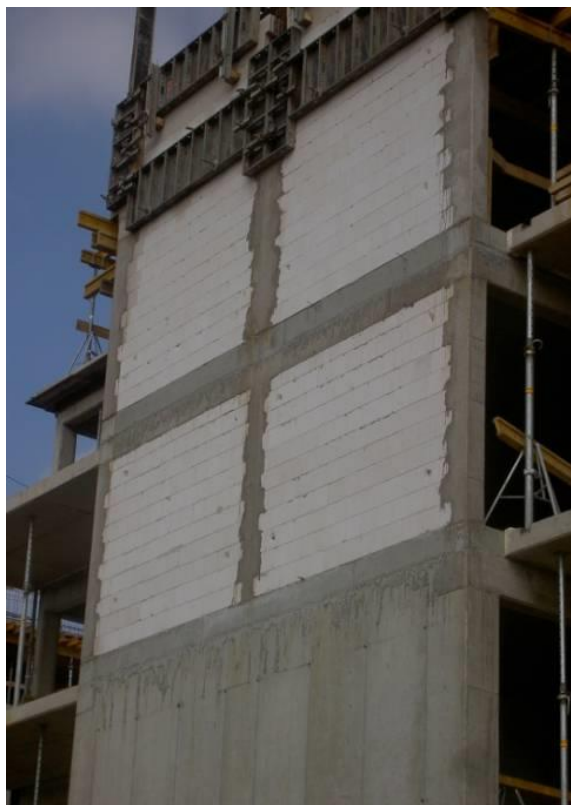
Przekrój poprzeczny żelbetowego rdzenia wynika z grubości ściany, dlatego zazwyczaj stosuje się rdzenie o przekroju od $18 \times 18 \text{ cm}$ do $40 \times 40 \text{ cm}$. W wypadku większych grubości ścian rdzenie



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

bywają od strony zewnętrznej ocieplane styropianem w taki sposób, aby suma grubości ocieplenia i rdzenia była równa grubości ściany. W celu zapewnienia odpowiedniej współpracy między rdzeniem, a murem w ścianie murowanej często pozostawia się strzępia, które są wypełniane betonem podczas betonowania rdzenia (Rys. 4.5.9., Rys. 4.5.10, Rys. 4.5.11). W wypadku murowania ściany bez strzępi odpowiednie połączenie można zapewnić przez wpuszczenie zbrojenia ze spoin wspornych ściany w żelbetowy rdzeń.

a)



b)



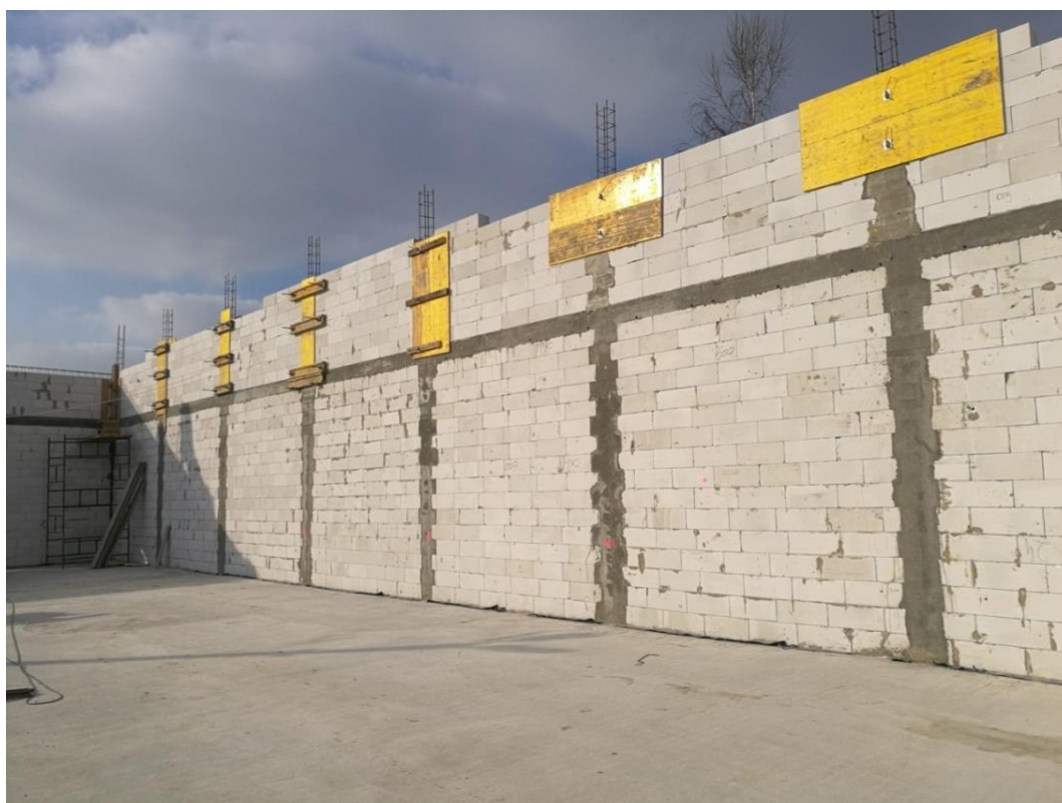
Rys. 4.5.9 Przykłady murów skrępowanych w budynkach wielokondygnacyjnych (fot. Łukasz Drobiec) [80]



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.5.10 Przykład murów skrępowanych w budynku mieszkalnym jednorodzinny (fot. Tomasz Rybarczyk)



Rys. 4.5.11 Przykład murów skrępowanych w budynku komercyjnym jednokondygnacyjnym (fot. Tomasz Rybarczyk)



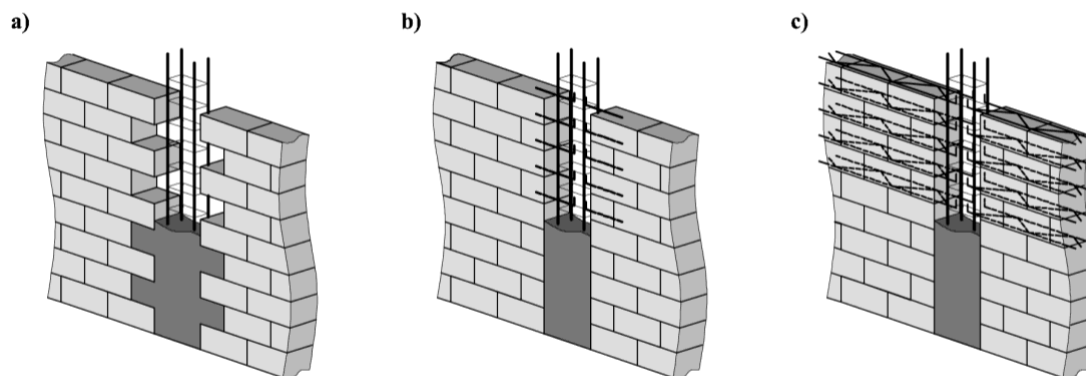
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Pionowe rdzenie żelbetowe w budynkach narażonych na wstrząsy od eksploatacji górniczej powinny przenosić w ścianach usztywniających siły rozciągające powstające pod działaniem momentów zginających w płaszczyźnie ścian oraz współpracować przy przenoszeniu sił poprzecznych wzbudzanych przez drgania podłoża. Zgodnie z instrukcją ITB nr 391/2003 [N6] odległości między rdzeniami powinny wynikać z analizy obliczeniowej ściany obciążonej głównie poziomo (zginanej z płaszczyzny). Rdzenie powinny być sytuowane w połączeniach ścian nośnych z usztywniającymi, a więc w narożnikach ścian oraz w miejscach połączeń nośnych ścian zewnętrznych ze ścianami nośnymi wewnętrznymi. Zbrojenie wieńców i rdzeni przyjmuje się najczęściej z warunku na minimalny procent zbrojenia według normy żelbetowej. Instrukcja [N6] zaleca, aby minimalny przekrój zbrojenia pionowego rdzenia wynosił $A_{SV,min} = 0,0004 \text{ m}^2$.

Obowiązująca norma Eurokod 6 (PN-EN 1996-1-1 [N18]) podaje jedynie wytyczne konstrukcyjne, a nie określa sposobu obliczania ścian skrępowanych. Norma ta zaleca, aby murowane ściany skrępowane miały pionowe i poziome elementy krępujące wykonane z żelbetu lub z muru zbrojonego w sposób zapewniający pełną współpracę w przenoszeniu oddziaływań. Aby zapewnić taką współpracę górne i boczne elementy krępujące powinny być wykonywane po wybudowaniu muru w sposób zapewniający ich połączenie ze ścianą. Uzyskuje się to przez pozostawienie w murze strzępi (Rys. 4.5.12a), które są wypełniane betonem lub przez zastosowanie w spoinach wspornych ścian zbrojenia, wpuszczanego w monolityczne rdzenie (Rys. 4.5.12b). Eurokod 6 (PN-EN 1996-1-1 [N18]) zaleca stosowanie strzępi w murach wykonanych z elementów murowych grupy 1 i grupy 2. Jako zbrojenie łączące mur z rdzeniem przyjąć można pręty o średnicy nie mniejszej niż 6 mm lub odpowiadającej, w rozstawie nie większym niż 300 mm. Gdy w ścianach projektuje się zastosowanie zbrojenia spoin wspornych (np. z uwagi na zginanie) zakotwienie może być zrealizowane przez przedłużenie tego zbrojenia do wnętrza rdzenia (Rys. 4.5.12c, Rys. 4.5.13) na długość zakotwienia. Długość zakotwienia pręta prostego w żelbetowym rdzeniu należy obliczyć ze wzoru (10.1) normy [N18], w którym f_{bok} charakterystyczna przyczepność według tablicy 5.7 normy. Z uwagi na małe wymiary poprzeczne rdzenia najczęściej stosuje się zakotwienia prętów w postaci haków prostych lub półokrągłych.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.5.12 Przykłady sposobów połączenia żelbetu i muru: a) przez strzępia, b) przez zbrojenie, c) przez zbrojenie spoin wspornych



Rys. 4.5.13 Połączenie rdzenia i muru: przez zbrojenie wypuszczone ze spoin (fot. Łukasz Drobiec)

Zgodnie z normą Eurokod 6 (PN-EN 1996-1-1 [N18]) elementy krępujące powinny być wykonane na poziomie każdej kondygnacji. Pionowe elementy krępujące (rdzenia) należy sytuować w połączeniach ścian nośnych oraz na obydwu bokach każdego otworu o powierzchni większej niż $1,5 \text{ m}^2$. Poziome elementy krępujące (wieńce) wykonuje się w poziomach stropów (jeśli są). Jeśli stropów nie ma, to wieńce umieszcza się w ścianach w odległościach zapewniających odpowiednią sztywność ścianie. Dodatkowe elementy krępujące mogą być potrzebne w ścianach, w których maksymalna rozpiętość zarówno w pionie, jak i poziomie wynosi $4,0 \text{ m}$. Należy zwrócić uwagę, że zalecenia normy Eurokod 6 [N18] dotyczące sytuowania elementów krępujących przy otworach o powierzchni większej niż $1,5 \text{ m}^2$ oraz co $4,0 \text{ m}$ w poziomie i pionie są bardzo rygorystyczne. Chcąc spełnić te wymogi trzeba w ścianach wykonywać znacznie więcej rdzeni



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

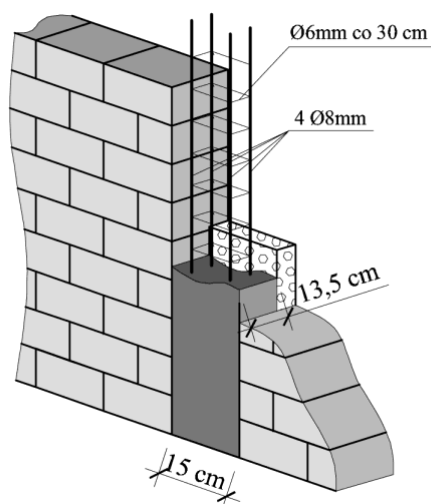
w porównaniu do liczby wynikającej z dotychczasowych zaleceń. Na szczęście zalecenie dotyczące rozstawu wieńców i rdzeni co 4,0 m nie jest obligatoryjne i norma [N18] przyjmowanie tych rozstawów pozostawia projektantowi. Należy podkreślić, że norma [N18] nie dotyczy projektowania na wpływy sejsmiczne, którym zajmuje się PN EN 1998-1 Eurokod 8 (EC8) [N19]. Wpływ skrępowania muru na zachowanie się ścian obciążonych statycznie lub quasi-statycznie nie jest dobrze rozeznany, ponieważ badań oraz analiz takich konstrukcji jest znacznie mniej niż murów skrępowanych poddanych wpływom sejsmicznym. Co ciekawe według normy [N19] maksymalny rozstaw elementów krępujących na terenach sejsmicznych wynosi 5,0 m, czyli więcej niż podano w [N18]. Zapis o możliwej potrzebie stosowania elementów krępujących w rozstawie 4,0 m, wobec braku dostatecznej liczby badań, przyjęto bowiem w [N18] bezpiecznie na podstawie ogólnych zaleceń zamieszczonych w literaturze i wielu normach (np. meksykańskiej [N8], argentyńskiej [N5], kolumbijskiej [N7]). Trzeba podkreślić, że maksymalny rozstaw elementów krępujących co 4,0 m jest jednym z najmniejszych jakie przyjmują normy do projektowania na terenach sejsmicznych, a wiele z nich (łącznie z EC8 [N19]) pozwala przyjmować ten rozstaw jako 5,0 m (np. norma włoska [N4]) i więcej.

O ile w wypadku rozstawu rdzeni co 4,0 m norma [N18] używa określenia, że „mogą być potrzebne”, tak w wypadku otworów o powierzchni większej niż 1,5 m² norma podaje, że rdzenie przy takich otworach „powinno się” stosować. Z tego zapisu wynika, że rdzenie należy stosować przy prawie każdym otworze okiennym i każdym otworze drzwiowym. Zdaniem Tomazevica 1,5 m² jest wielkością za małą i w pracy [91] proponuje on zwiększenie maksymalnego pola otworu, przy którym nie trzeba wykonywać elementów krępujących do 2,5 m². W normie meksykańskiej [N8] przyjęto, że elementy krępujące należy projektować, gdy szerokość otworu jest większa od ¼ odległości między pionowymi rdzeniami.

Według Eurokodu 6 [N18] elementy krępujące powinny mieć przekrój poprzeczny nie mniejszy niż 0,02 m², z najmniejszym wymiarem nie mniejszym niż 150 mm w płaszczyźnie ściany oraz mieć zbrojenie podłużne o minimalnym przekroju równym 0,8 % przekroju poprzecznego elementu krępującego, ale nie mniej niż 200 mm². Należy stosować strzemiona o średnicy nie mniejszej niż 6 mm, w rozstawie nie większym niż 300 mm. Przykład rozwiązania najmniejszego, dopuszczalnego przez Eurokod 6 rdzenia pokazano za [19] na Rys. 4.5.14.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 4.5.14 Minimalny przekrój i minimalne zbrojenie elementu krępującego wg Eurokodu 6 [N18]

W murowych ścianach skrępowanych, w których zastosowano elementy murowe grupy 1 i grupy 2, elementy przylegające do elementów krępujących powinny zachodzić na siebie zgodnie z zasadami przewiązania muru przedstawionymi w Eurokodzie 6 [N18]. Alternatywnie, można przyjąć zbrojenie o średnicy nie mniejszej niż 6 mm lub odpowiadającej, w rozstawie nie większym niż 300 mm, zakotwione w betonie wypełniającym i spoinach wypełnionych zaprawą murarską.

Zbrojenie pionowych rdzeni i poziomych rygli oraz wieńców należy wykonstruować zgodnie z zaleceniami Eurokodu żelbetowego [N17]. Niezmiernie istotne jest zrealizowanie odpowiednich sposobów zakotwień prętów, szczególnie w rejonie naroży wieńców i rygli oraz połączenia elementów poziomych z rdzeniami.

W wycofanej normie [N10], dotyczącej konstrukcji zespolonych zamieszczono wytyczne wykonywania zespolenia murowanych ścian z elementami żelbetowymi. Zalecono między innymi, aby mur od strony przyszłego żelbetowego rdzenia wykonywać na niepełne spoiny lub strzępia o wysięgu 60 mm. W wypadku wykonywania rdzeni w bruzdach muru zalecano stosowanie dodatkowych strzemion zbrojenia pionowego umieszczanych częściowo w spoinach wspornych muru.



Ustalenia przyjęte w projektach Eurokod 6

W ostatnich latach w Grupach Projektowych CEN/TC 250 trwały prace nad nowymi wersjami Eurokodów. W przypadku Eurokodu 6 prace zakończono i wprowadzono normę EN 1996-1-1:2023 [N2]. Norma ta została przetłumaczona w PKN na język polski PN-EN 1996-1-1:2023-08 [N18]. W normie zawarto zalecenia, wymagania dotyczące projektowania i wykonawstwa murów skrępowanych. Norma nie obejmuje jednak murów skrępowanych wykonanych z elementów murowych z grupy 4. Wytyczne dotyczące murów skrępowanych zawierał jednak projekt tej normy, lecz w finalnej wersji z nich zrezygnowano.

Zgodnie z normą [N18] górne i boczne elementy krępujące powinny być wykonywane po wykonaniu muru, tak aby działały razem. Połączenie pomiędzy elementami krępującymi, a ścianą murowaną, uzyskuje się dzięki przyczepności pomiędzy tymi elementami. Elementy krępujące mogą zawierać zazębienia w celu poprawy połączenia między nimi a ścianą murowaną. Pionowe i poziome elementy krępujące powinny być połączone ze ścianą, tak aby pod wpływem oddziaływań współdziałały razem jako jeden element konstrukcyjny. Nowa edycja normy utrzymała ponadto zalecenia swojej poprzedniczki dotyczące lokalizacji i rozstawów rdzeni, oraz wymagań dla samych rdzeni.

W kontekście sprawdzenia obliczeniowego murów skrępowanych przyjmuje się, że mur skrępowany sprawdza się obliczeniowo jako jeden zespolony element i przy spełnieniu wymagań konstrukcyjnych nie ma konieczności dodatkowego sprawdzania nośności elementów krępujących. Nośność ścian skrępowanych powinna być sprawdzana oddzielnie na efekty oddziaływań pionowych, sił ścinających i momentów zginających w płaszczyźnie ściany oraz w razie potrzeby na obciążenia działające z płaszczyzny ściany.

Mimo, iż w normie [N18] znaleźć można informacje o murach skrępowanych poddanym obciążeniom działającym z płaszczyzny, to nie zamieszczono w niej żadnych wytycznych dotyczących sprawdzania nośności na takie obciążenia. Podano natomiast informację, że nośność ścian na inne obciążenia należy sprawdzać jak dla ścian nieskrępowanych.

We wcześniejszych wersjach normy zamieszczono ciekawe zalecenia dotyczące projektowania murów skrępowanych, które nie znalazły się w końcowej wersji normy. Ponieważ w niniejszej pracy analizowano wyniki badań własnych między innymi na podstawie zaleceń projektu EC6 poniżej opisano te zalecenia z projektu [N26].



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Skrępowane mury obciążone głównie pionowo

Podstawowy wzór na nośność ściany skrępowanej obciążonej głównie pionowo jest identyczny jak wzór dla murów nieskrępowanych i niezbrojonych:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}, \quad (53)$$

gdzie:

N_{Ed} – obliczeniowa siła pionowa działająca na ścianę,

N_{Rd} – obliczeniowa nośność ściany skrępowanej obciążonej głównie pionowo.

Obliczeniową nośność ściany obciążonej głównie pionowo (nieskrępowanej) należy wyznaczyć z zależności:

$$N_{Rd} = \Phi f_d A_t, \quad (54)$$

w której:

Φ – jest współczynnikiem redukcyjnym nośności,

odpowiednio: Φ_i u góry i u dołu ściany lub Φ_m w środku ściany, uwzględniającym wpływ smukłości i mimośród obciążenia, określonym jak dla ścian niezbrojonych nieskrępowanych,

f_d – obliczeniowa wytrzymałość muru na ściskanie,

A_t – pole powierzchni poziomego przekroju ściany.

Analiza obliczeniowa skrępowanych ścian obciążonych głównie pionowo przyjęta w projekcie normy jest dość prosta i opiera się na znanym algorytmie dla ścian niezbrojonych. Nośność skrępowanej murowanej ściany obciążonej głównie pionowo należy sprawdzać w trzech przekrojach: górnym, środkowym i dolnym.

W projekcie normy [N26] z 2019 r. wzór (54) miał postać:

$$N_{Rd} = \Phi (f_d A_t + \sum A_s f_{yd}), \quad (55)$$

w której:

A_t – pole powierzchni poziomego przekroju ściany, wraz z krępującymi rdzeniami,

f_{yd} – obliczeniowa granica plastyczności podłużnego zbrojenia krępujących rdzeni,

A_s – pole powierzchni podłużnego zbrojenia w każdym krępującym ścianę rdzeniu.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Wzór (55) uwzględniał w dość prosty sposób wpływ skrępowania. Do nośności muru niezbrojonego nieskrępowanego wystarczyło dodać nośność zbrojenia, pomnożoną przez współczynnik redukcyjny Φ . Co ciekawe, wzór (55) nie uwzględniał wytrzymałości betonu rdzeni na ściskanie, przyjmując jakby zbrojenie ułożono w murze (oczywiście taki przypadek również może mieć miejsce w wypadku układania prętów elementów krępujących w pionowych drążeniach elementów murowych). Z powyższych wzorów wynika, że analiza muru skrępowanego nie może być prowadzona dla pasma o szerokości 1,0 m, jak to często wykonuje się w przypadku ścian nieskrępowanych obciążonych pionowo. Wzór (55) wymaga przyjęcia całego przekroju muru wraz z przekrojem elementów krępujących. W związku z tym obciążenia również trzeba zestawić na całą długość ściany. W przypadku ściany z otworem należy rozpatrywać długość od elementu krępującego do krawędzi otworu. W projekcie normy [N26] nie podano zasad postępowania w przypadku dwóch sąsiadujących ścian skrępowanych. Należy jednak sądzić, że wówczas jako A_s przyjętą trzeba było połowę zbrojenia rdzenia łączącego sąsiednie ściany, natomiast drugą połowę należało wliczyć do nośności ściany sąsiedniej.

Niestety w ostatecznej wersji normy [N18] i [N2] wzór (55) został zastąpiony wzorem (54), który nie uwzględnia wpływu skrępowania. W ten sposób, zgodnie z ostatecznym projektem Eurokodu, wynik obliczeń ściskanych murów skrępowanych i nieskrępowanych będzie taki sam. Jest to oczywisty błąd logiczny – zastosowanie żelbetowych rdzeni z pewnością spowoduje wzrost nośności ściany.

Skrępowane ściany poddane obciążeniom ścinającym

W najnowszej edycji normy EN 1996-1-1:2023 [N26][N18] i [N2], a więc podobnie jak w przypadku ścian poddanych obciążeniom pionowym, podstawowy wzór na nośność ścinanych ścian skrępowanych jest taki sam jak dla ścian nieskrępowanych:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}, \quad (56)$$

gdzie:

V_{Ed} – obliczeniowa siła ścinająca działająca na ścianę,

V_{Rd} – obliczeniowa nośność ściany skrępowanej na ścinanie.



Nośność na ścinanie muru skrępowanego należy wyznaczać z zależności:

$$V_{Rd} = f_{vd}td \leq V_{Rdlt} = 0,3f_dtd, \quad (57)$$

w której:

f_{vd} – obliczeniowa wytrzymałość nieskrępowanego muru na ścinanie dla średnich naprężeń pionowych nad całą analizowaną ścianą,

f_d – obliczeniowa wytrzymałość na ściskanie muru w kierunku pionowym,

V_{Rdlt} – wartość nośności granicznej przy ścinaniu,

d – użyteczna wysokość przekroju ściany.

Podobnie jak w wypadku ścian obciążonych pionowo nie uwzględnia się obecności betonu. Przyjęto nośność skrępowanego muru ścinanego jako sumę nośności muru o zastępczej długości zwiększonej o 1,5 szerokości rdzenia. Nie uwzględnia się również nośności betonu i zbrojenia poprzecznego rdzenia na ścinanie. Jedyną różnicą, w porównaniu do ścian nieskrępowanych jest przyjęcie, że cały poziomy przekrój ściany jest ściskany. Do projektowania skrępowanych ścian ścinanych można zatem wykorzystać algorytm projektowania ścian ścinanych, z uwzględnieniem wzoru (57). Tok projektowania ścian ścinanych podano w pracy [20].

Skrępowane ściany zginane w płaszczyźnie i ściskane

W przypadku murów skrępowanych zginanych w płaszczyźnie należy wykazać, że moment zginający M_{Ed} jest mniejszy od nośności muru skrępowanego na zginanie M_{Rd} :

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}, \quad (58)$$

Wzór na nośność muru skrępowanego na zginanie wyprowadzono przyjmując następujące założenia:

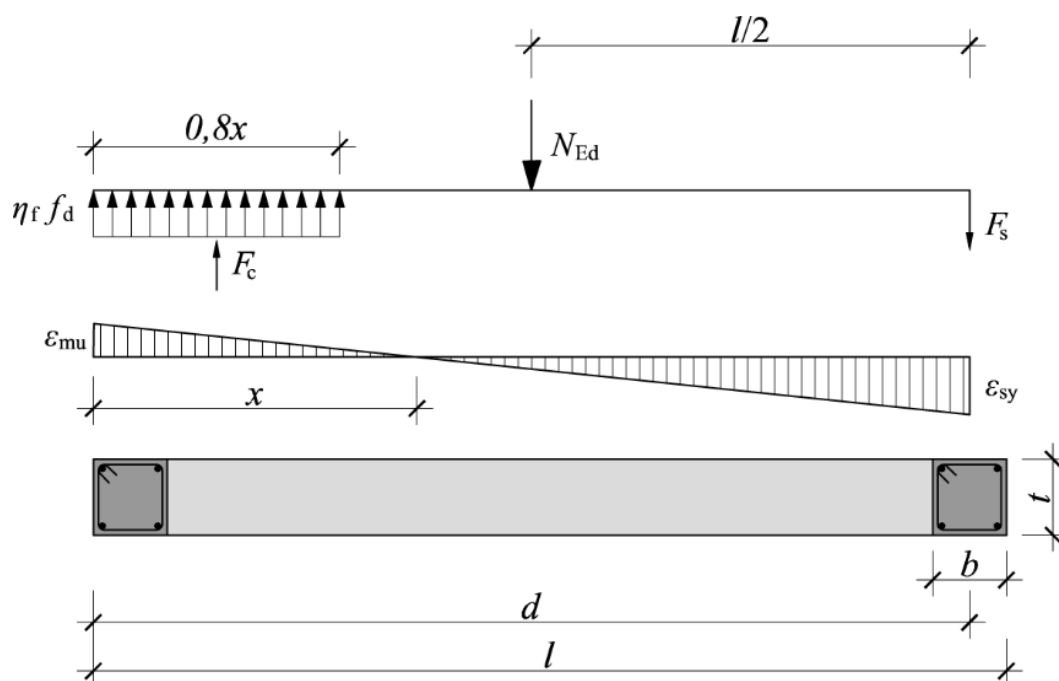
- Nośność skrępowanej ściany murowanej poddanej łącznemu działaniu obciążenia osiowego i momentu zginającego zaleca się określić tylko pod warunkiem, że wypełnienie murowane traktuje się jako ścianę ścinaną działającą w połączeniu z przylegającymi do niej słupami ryglowymi. Nośność ściany na zginanie można obliczyć zgodnie z wykresem naprężeń i równowagą sił wewnętrznych, z pominięciem zbrojenia ściskanego.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

- Gdy strefa ściskania obejmuje zarówno mur, jak i beton, wytrzymałość na ściskanie zaleca się obliczyć z użyciem bryły naprężeń opartej na wytrzymałości na ściskanie słabszego z tych dwóch materiałów.

Przyjęto tu zatem podobne założenia jak w pracy Lu i Ungera [67]. Wzór (59) wyprowadzono z warunku sumy momentów względem środka strefy ściskanej Rys. 4.5.15.



Rys. 4.5.15 Założenia do wyprowadzenia wzoru na nośność ściany skrępowanej poddanej zginaniu i ściskaniu według EC6 [N26][N26]

Nośność na zginanie muru skrępowanego można wyznaczyć z zależności:

$$M_{Rd} = A_s f_{yd} (d - 0,4x) + N_{Ed} \left(\frac{l}{2} - 0,4x \right), \quad (59)$$

a wysokość strefy ściskanej można obliczyć z warunku równowagi rzutu sił:

$$x = \frac{N_{Ed} + A_s f_{yd}}{0,8 \eta f_d}, \quad (60)$$



gdzie:

η_f – współczynnik określający równoważny prostokątny blok naprężeń. Norma zezwala przyjmować $\eta_f = 1,0$ w przypadku wypełnienia betonem, dlatego wydaje się, że taką wartość można przyjąć w murach skrępowanych żelbetowymi rdzeniami.

4.6. Podsumowanie stanu wiedzy

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy wykazała, że:

- Skrępowanie muru polega na wprowadzeniu w murowaną ścianę naprężeń ściskających będących wynikiem skurczu betonu elementów krępujących. Naprężenia w murowanej ścianie od skurczu betonu rygli i rdzeni mogą mieć wartość $0,2 \div 0,3 \text{ N/mm}^2$.
- Mury skrępowane wznosi się na świecie na terenach poddanych wpływom sejsmicznym.
- W kraju mury skrępowane stosowane były dotychczas na terenach poddanych wpływom od eksploatacji górniczej, terenach narażonych na wystąpienie osuwisk oraz na terenach zalewowych. Obecnie mury skrępowane wykonuje się również na obszarach pozbawionych podobnych wpływów.
- Prowadzone na świecie badania laboratoryjne murów skrępowanych dotyczą ścian poddanych wpływom sejsmicznym. Badania prowadzi się zwykle na stołach wibracyjnych lub pod obciążeniem cyklicznym.
- Na świecie wykonano bardzo mało badań skrępowanych murów ściskanych obciążonych monotonicznie, a w kraju takich badań dotąd nie wykonywano. Badania prowadzone na świecie były wykonywane na małych elementach próbnych. Nie badano ścian w skali naturalnej. W związku z tym nie wiadomo jak duży jest wpływ elementów krępujących na nośność i odporność na zarysowania skrępowanych murowanych ścian poddanych ściskaniu.
- Analizy obliczeniowe ścian skrępowanych można wykonać stosując modele prętowe typu Strut & Tie. Zasady budowania takich modeli są jednak nieco inne niż modeli elementów żelbetowych czy murów nieskrępowanych. W pierwszej kolejności prętami zastępuje się żelbetowe rygle i rdzenie, a następnie w tak skonstruowaną ramę wprowadza się przegubowo podparte pręty odwzorowujące przebieg ściskania w murze. Nie modeluje się prętów rozciąganych w murze, z wyjątkiem elementów zbrojonych (np. nadproży z betonu komórkowego lub żelbetowych).



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

- Przepisy obecnych i archiwalnych norm oraz instrukcji ITB, w aspekcie konstrukcji murowych skrępowanych, dotyczyły tylko warunków konstrukcyjnych. Wyjątek stanowi tu projekt Eurokodu 6, a w szczególności jego wersja z 2019 r. [N26], gdzie podano wzór na nośność ściskanego muru skrępowanego. Niestety w ostatecznej wersji projektu Eurokodu z 2021r. [N2] wzór ten usunięto.

5. Cele naukowe pracy

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury oraz analizy obecnego stanu wiedzy w zakresie skrępowanych murowanych ścian obciążonych głównie pionowo (ściskanych) przyjęto następujące cele naukowe pracy:

- Wykonanie pierwszych w kraju i na świecie badań laboratoryjnych ściskanych monotonicznie skrępowanych ścian z ABK w skali naturalnej.
- Wykazanie rzeczywistego wpływu skrępowania na wartość naprężeń ściskających w murze z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK).
- Określenie w badaniach laboratoryjnych wpływu skrępowania na nośność i odkształcalność ścian z ABK.
- Weryfikacja badań doświadczalnych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Wyznaczenie w modelu numerycznym trajektorii naprężeń ściskających w murze.
- Porównanie nośności ściskanych murów skrępowanych obliczonych zgodnie z postanowieniami normy EC6 [N18] oraz projektu normy EC6 [N26] z wynikami badań modeli murów.
- Stworzenie propozycji analitycznego modelu prętowego (Strut & Tie) do określania nośności skrępowanych ścian z ABK.

Do realizacji przyjętych celów naukowych pracy zaplanowano:

- Wykonanie badań materiałowych komponentów muru (elementów murowych i zaprawy), komponentów elementów krępujących: betonu zwykłego i lekkiego, zbrojenia oraz materiałów z prefabrykowanych nadproży: betonu komórkowego i zwykłego oraz zbrojenia.
- Wykonanie badań laboratoryjnych mających na celu pomiar skurczu betonu i muru w wybranych dojrzewających elementach badawczych (badania wstępne).



- Wykonanie badań laboratoryjnych skrępowanych i nieskrępowanych ścian ściskanych z ABK (badania zasadnicze). Przyjęto, że ściany będą badane w skali naturalnej oraz że badania prowadzone będą na ścianach pełnych i z otworem. W ścianach z otworem przyjęto zastosowanie prefabrykowanych nadproży z betonu komórkowego (badania zasadnicze) i prefabrykowanych nadproży żelbetowych (badania dodatkowe). Przyjęto ponadto, że skrępowanie będzie realizowane betonem zwykłym (badania zasadnicze) i betonem lekkim (badania dodatkowe).
- Zbudowanie modeli badanych ścian w programie bazującym na metodzie elementów skończonych i przeanalizowanie trajektorii naprężeń ściskających w murze. Przyjęcie na tej podstawie modeli prętowych do metody Strut & Tie.
- Analizy obliczeniowe modeli prętowych.

W dalszej części niniejszej dysertacji opisano wyniki wykonanych badań i analiz.

6. Wyniki badań materiałowych

6.1. Wprowadzenie

Wstępem do badań murów były badania materiałowe. Fundamentalną kwestią jest bowiem rozpoznanie najważniejszych dla badań zasadniczych właściwości użytkowych materiałów, z których wykonano modele badawcze. W celu poznania i potwierdzenia właściwości materiałów, z których wykonano modele badawcze przeprowadzono badania materiałowe poszczególnych materiałów oraz gotowych wyrobów. W ramach badań materiałowych wykonano badania:

- elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego w celu sprawdzenia spełnienia wymagań określonych normą PN-EN 771-4+A1:2015-10 [N21],
- zaprawy murarskiej do cienkich spoin w celu sprawdzenia spełnienia wymagań określonych normą PN-EN 998-2:2016-12 [N24],
- zbrojenia zastosowanego do elementów żelbetowych,
- betonów zwykłego i lekkiego w celu sprawdzenia spełnienia wymagań określonych normą PN-EN 206+A2:2021-08 [N20],
- prefabrykowanych zbrojonych belek nadprożowych z betonu komórkowego.

Wykorzystane w badaniach laboratoryjnych materiały zbadano w zakresie:

- badania wytrzymałości elementów murowych na ściskanie według zaleceń normy PN- EN 772-1+A1:2015-10 [N22],



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

- badania wytrzymałości zaprawy murarskiej na zginanie i ściskanie według zaleceń normy PN-EN 1015-11:2020-04 [N11],
- badania wytrzymałości muru na ściskanie według zaleceń normy PN-EN 1052-1:2000 [N12],
- badania prętów stalowego zbrojenia według zaleceń normy PN-EN ISO 6892-1:2020-05 [N25],
- badania wytrzymałości betonu zwykłego i lekkiego według zaleceń norm PN-EN 12390-2:2019-07 [N13] i PN-EN 12390-3:2019-07 [N14],
- badania materiałowe prefabrykowanych zbrojonych belek nadprożowych z betonu komórkowego według zaleceń PN-EN 12602:2016-11 [N15].

Sposób prowadzenia podstawowych badań materiałowych oraz szczegółowe wyniki tych badań opisano w pracach [11], [21], [54], [84].

6.2. Badania wytrzymałości elementów murowych na ściskanie

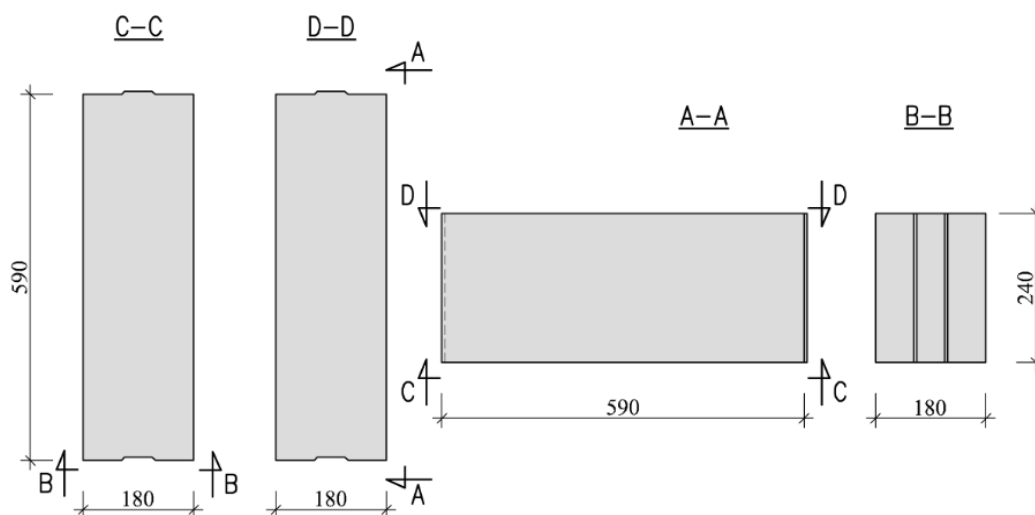
Podstawowym parametrem wytrzymałościowym elementów murowych, w kontekście wykonywanych badań, jest zadeklarowana wytrzymałość elementów murowych na ściskanie. Badania elementów murowych z betonu komórkowego na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 772-1+A1:2015-10 [N22]. Badaniom poddano całe elementy murowe – bloczki oraz próbki sześciennie o wymiarach 100x100x100 mm, wycięte z elementów murowych – bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego. Do badań wykorzystano elementy o nazwie handlowej Solbet Optimal. Z dostarczonej partii materiału do badań pobrano losowo 14 elementów murowych – bloczków. Oprócz badań zgodnych z [N22] wykonano również badania na czterech walcach smukłych o średnicy 55 mm i wysokości 120 mm, wyciętych z dwóch elementów murowych.

Badania prowadzono na bloczkach z betonu komórkowego typu Solbet Optimal o szerokości 180 mm, z uchwytem montażowym, oznaczonych symbolem PW (pióro i wpust). Z tego typu elementów murowych wykonuje się mury na zaprawie murarskiej do cienkich spoin oraz zaprawie zwykłej według PN-EN 998-2:2016-12 [N24] z wypełnionymi i niewypełnionymi zaprawą murarską spoinami czołowymi (pionowymi). Zadeklarowana klasa gęstości elementów murowych to $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$, średnia wytrzymałość na ściskanie $f_b = 4 \text{ N/mm}^2$, a kategoria elementu murowego I według [N21].



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Elementy murowe miały wymiary: 180×240×590 mm. Geometrię stosowanych w badaniach bloczków przedstawia Rys. 6.2.1 oraz Rys. 6.2.2.



Rys. 6.2.1 Element murowy – bloczek z autoklawizowanego betonu komórkowego zastosowany w badaniach



Rys. 6.2.2 Widok elementu murowego zastosowanego w badaniach

Z dostarczonej partii pobrano losowo 14 elementów murowych – bloczków. Sześć całych bloczków przeznaczono do badań zgodnych z normą PN-EN 772-1+A1:2015-10 [N22] i oznaczono symbolem U. Z pozostałych 8 bloczków wycięto 18 elementów sześciennych (po trzy z jednego



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

bloczka, zgodnie z załącznikiem B do normy PN-EN 771-4+A1:2015-10 [N21] o wymiarach 100x100x100 mm i cztery walce średnicy 55 mm i wysokości 120 mm (po dwa z jednego bloczka). Próbkę sześcienną oznaczono symbolami CX, CY, CZ. Litera X, Y lub Z oznacza kierunek przyłożenia obciążenia odpowiednio: prostopadle do płaszczyzny licowej, prostopadle do płaszczyzny wspornej oraz prostopadle do płaszczyzny czołowej. Walce oznaczono symbolem W.

Całe elementy sześciennie oraz walce przechowywano do czasu badania (min. 14 dni) w warunkach powietrzno-suchych, w temperaturze $\geq 15^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $\leq 65\%$. Elementy sześciennie po docięciu piłą suszono w temperaturze $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ do stałej masy, a następnie poddawano badaniom.

Wszystkie badane bloczki miały profilowane powierzchnie czołowe na pióro i wpust. Norma [N22] nakazuje przed badaniem usunięcie piór i wpustów z powierzchni badanych bloczków. Dlatego pióra i wpusty usunięto przez odpowiednie docięcie bloczków wzdłuż ich szerokości w taki sposób, aby linia cięcia pokrywała się z wewnętrzną pionową płaszczyzną wpustu.

Badane próbki ustawiano wspólosiowo z przegubem głowicy prasy po uprzednim oczyszczeniu powierzchni głowicy. Obciążenie przekazywano w takim tempie, aby zniszczenie próbki nastąpiło w okresie nie krótszym niż jedna minuta licząc od rozpoczęcia obciążania. Tym samym uwzględniono zalecenia zawarte w tablicy 2 normy [N22].

Tablica 6.2.1 zawiera wyniki badań. W tablicy podano nazwę serii, prędkość obciążania, siłę niszczącą i wytrzymałość na ściskanie każdej z badanych próbek oraz wytrzymałość średnią i współczynnik zmienności każdej z badanych serii. Przykładowy widok próbek podczas badania pokazano na Rys. 6.2.3.

Zniszczenie całych elementów murowych (seria U) przebiegało przez pionowe zarysowania koncentrujące się w okolicach narożników elementów murowych. Widok wybranych elementów próbnych serii U po badaniu pokazano na Rys. 6.2.4.

Próbki sześciennie niszczyły się przez zarysowania pionowe i ukośne, tworząc wewnątrz próbek ścięte stożki. Widok wybranych próbek serii CX po badaniu pokazano na Rys. 6.2.5, wybranych próbek serii CY na Rys. 6.2.6, a serii CZ na Rys. 6.2.7.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 6.2.1 Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie elementów murowych

Rodzaj elementu badanego	Pole obciążanej powierzchni [mm ²]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na ściskanie [N/mm ²]	Współczynnik zmienności %	Wytrzymałość średnia na ściskanie [N/mm ²]
Całe elementy Seria U	90360	302,00	3,34	9,95	3,65
	90270	321,00	3,56		
	90000	356,00	3,96		
	90360	335,00	3,71		
	90180	375,00	4,16		
	90000	288,00	3,20		
Próbki sześciennie 10x10x10 cm Seria CX (obciążone prostopadłe do powierzchni licowej)	9751,5	54,42	5,58	6,38	5,13
	9653	46,27	4,79		
	9950	52,52	5,28		
	9900	46,70	4,72		
	10201	53,90	5,29		
	10201	51,90	5,09		
Próbki sześciennie 10x10x10 cm Seria CY (obciążone prostopadłe do płaszczyzny wspornej)	10000	51,63	5,16	6,76	5,05
	9849	53,00	5,38		
	9850	52,16	5,30		
	9554,5	50,00	5,23		
	9651,5	45,12	4,67		
	9900,25	45,28	4,57		
Próbki sześciennie 10x10x10 cm Seria CZ (obciążone prostopadłe do płaszczyzny czołowej)	10201	55,28	5,42	7,71	5,13
		53,76	5,27		
		54,13	5,31		
		47,79	4,68		
		46,84	4,59		
		56,41	5,53		
Próbki walcowe ϕ5,5, h12 cm Seria W (obciążone prostopadłe do powierzchni licowej)	2375,8	10,03	4,22	2,64	4,14
		9,57	4,03		
		9,64	4,06		
		10,07	4,24		



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)



Rys. 6.2.3 Badanie wytrzymałości na ściskanie elementów murowych:
a) badanie całych elementów, b) badanie próbek sześciennych

a)

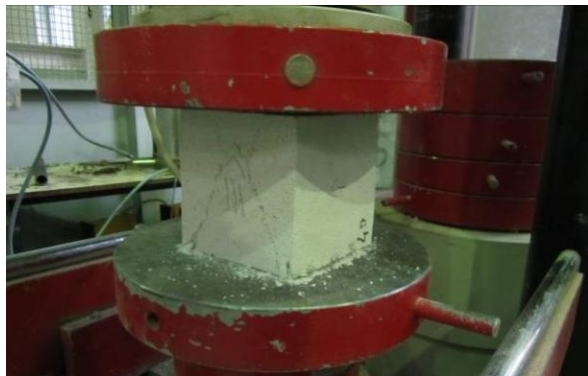


b)

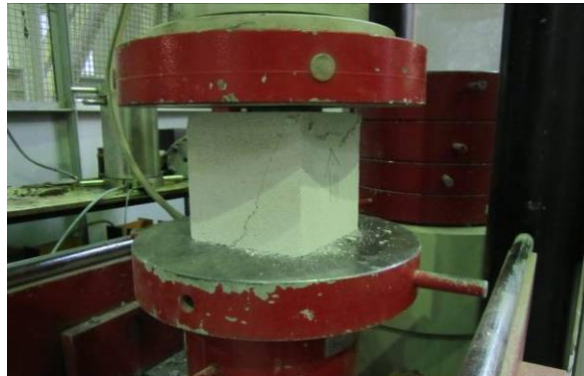


Rys. 6.2.4 Zniszczenie ściskanych elementów murowych serii U: a) próbka S1, b) próbka S2,

a)



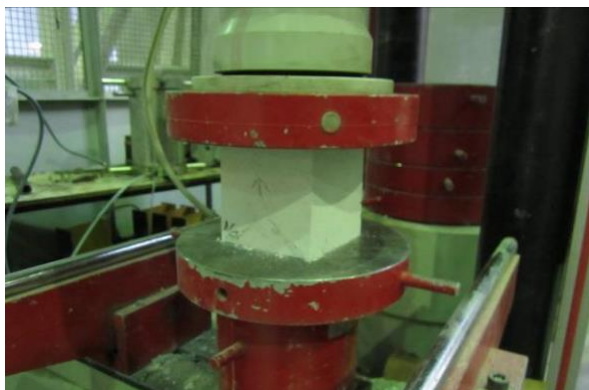
b)



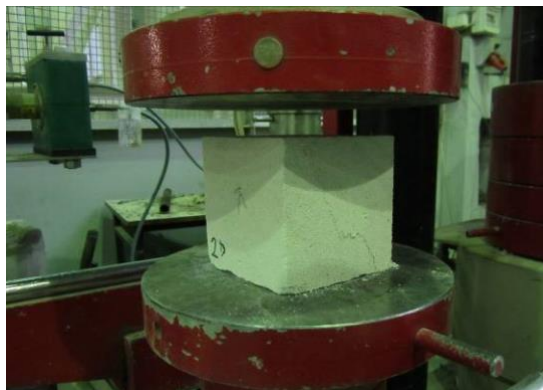
Rys. 6.2.5 Zniszczenie ściskanych elementów próbných serii CX: a) próbka CX-1, b) próbka CX-2



a)



b)



Rys. 6.2.6 Zniszczenie ściskanych elementów próbnych serii CY: a) próbka CY-1, b) próbka CY-2

a)



b)



Rys. 6.2.7 Zniszczenie ściskanych elementów próbnych serii CZ: a) próbka CZ-1, b) próbka CZ-5

Na podstawie uzyskanych wyników badań na ściskanie elementów murowych w zależności od wyodrębnionych z nich próbek sześciennych i walcowych przeprowadzono przeliczenie uzyskanych wytrzymałości na znormalizowaną wytrzymałość na ściskanie zgodnie z załącznikiem A do normy [N22]. Ze względu na sposób sezonowania badanych elementów ekwiwalentna wytrzymałość na ściskanie próbek serii U i W równa była wytrzymałości uzyskanej z badań (współczynnik przeliczeniowy równy 1,0). Próbkę sześcienną (serie CX, CY i CZ) przycinano z użyciem wody, a następnie suszono do stałej masy. Dlatego w tym wypadku, w celu uzyskania ekwiwalentnej wytrzymałości na ściskanie należało zastosować współczynnik 0,8. W przypadku próbek serii U, na podstawie załącznika A do normy [N22] określono dodatkowo współczynnik kształtu δ . W podobny sposób określono współczynnik δ dla elementów serii W, przyjmując jako szerokość elementu jego średnicę.



Następnie na podstawie tablicy NA.2 zamieszczonej w Załączniku Krajowym do normy [N21], przeprowadzono klasyfikację badanych elementów murowych i dla każdej serii określono klasę wytrzymałości na ściskanie. Wyniki przedstawiono w Tablica 6.2.2.

Tablica 6.2.2 Wytrzymałość znormalizowana i klasa wytrzymałości na ściskanie

Numer serii	Wymiary elementu, [mm]	Wytrzymałość średnia [N/mm ²]	Wsp. przeliczeniowy	Wsp. kształtu δ	Znormalizowana wytrzymałość na ściskanie f_b , [N/mm ²]	Klasa wytrzymałości na ściskanie
U	180x240x500	3,65	1,0	1,27	4,64	4,5
CX	100x100x100	5,13	0,8	1,0	4,10	4
CY	100x100x100	5,05	0,8	1,0	4,04	4
CZ	100x100x100	5,13	0,8	1,0	4,10	4
W	$\phi = 55, h=120$	4,46	1,0	1,19	4,95	4,5

Z badań próbek sześciennych uzyskano klasę wytrzymałości 4, natomiast z badań całych elementów murowych i walców, przy których stosowano normowy współczynnik przeliczeniowy δ uzyskano klasę wytrzymałości 4,5. Do dalszych analiz przyjmowana będzie wartość $f_b = 4,04 \text{ N/mm}^2$, którą uzyskano z badań próbek sześciennych obciążonych prostopadle do płaszczyzny spoin wspornych. Badania próbek sześciennych są zalecane do określania wytrzymałości znormalizowanej.

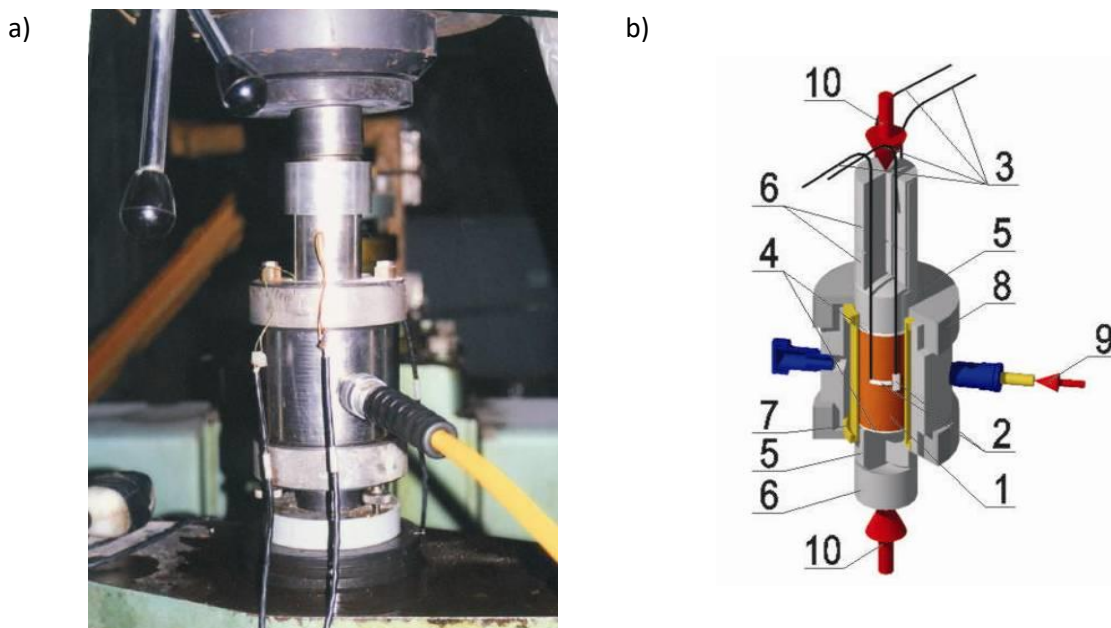
6.3. Badania elementów murowych w trójosiowym stanie naprężenia

Próbki do badań w trójosiowym stanie naprężenia, ze względu na wymagania aparatury badawczej, muszą mieć średnicę równą $60 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. W związku z tym, w tych badaniach nie można było zastosować próbek wyciętych wiertłem koronowym. Próbki z elementów murowych wytoczono więc na tokarce. W ten sposób uzyskano walce o wymiarach $\phi 60 \text{ mm}$ i $h=120 \text{ mm}$. Na pobocznice próbek naklejono po 4 tensometry elektrooporowe, a przewody wyprowadzono w kierunku podstaw w wyłobionych pionowych bruzdach. Badania prowadzono w Aparacie Trójosiowego Ściskania. Istotą działania aparatu była możliwość badania próbek



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

(oznaczonych 1 na Rys. 6.3.1) w trójosiowym stanie naprężenia, w których oprócz obciążenia pionowego, które można wywoływać w każdej maszynie wytrzymałościowej istniała możliwość wywoływania jednoczesnego obciążenia poziomego, czyli prostopadłego do pionowej osi próbki.



Rys. 6.3.1 Aparat trójosiowego ściskania: a) widok, b) szkic – opis w tekście

Obciążenia pionowe – „10” przekazywano na próbki – „1” z maszyny wytrzymałościowej o zakresie 4000 kN przez stalowe tłoki – „6”, łożyska sferyczne – „5” i podkładki teflonowe – „4”. Natomiast poziome obciążenia boczne próbki wywoływano w sposób hydrauliczny – wprowadzając pod ciśnieniem pomiędzy stalowy korpus aparatu – „8” a odkształcalną poliuretanową osłonkę próbki – „7” płyn z siłownika hydraulicznego – „9”. Przed przystąpieniem do badań powierzchnie podstaw próbek – „1” dodatkowo wyrównywano, a na pobocznicach wykonywano cztery pionowe bruzdy. Następnie na walcach naklejono po dwa pionowe i poziome tensometry elektrooporowe – „2” o bazie 20 mm, służące do pomiaru odkształceń próbki a przewody tensometrów – „3” wyprowadzono na zewnątrz aparatu przez uprzednio wykonane pionowe bruzdy znajdujące się na próbkach i stalowym tłoku aparatu.

Aby uchronić tensometry przed bezpośrednim obciążeniem z poliuretanowej osłonki, próbki zabezpieczono dodatkowym oplotem z taśmy klejącej a pionowe bruzdy wypełniono klejem epoksydowym.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Możliwość generowania obciążenia pionowego i poziomego pozwalała na realizację badań w trzech ścieżkach obciążenia.

- Pierwszy sposób polega na doprowadzeniu do zniszczenia próbki, w wyniku zwiększania obciążenia pionowego, przy stałym obciążeniu bocznym (promieniowym).
- W drugim, do zniszczenia doprowadzić można poprzez zwiększanie obciążenia bocznego (promieniowego), utrzymując jednocześnie niezmiennie obciążenie pionowe.
- Trzeci sposób, zdecydowanie najtrudniejszy w interpretacji, polega na doprowadzeniu do zniszczenia badanej próbki zwiększając równomiernie co do wartości i intensywności obciążenie pionowe i poziome.

Mając na uwadze możliwości aparatury, zdecydowano się na wykonanie badań w dwóch ścieżkach obciążenia doprowadzając do zniszczenia próbki poprzez zwiększanie obciążenia pionowego przy stałym obciążeniu poziomym (pierwszy sposób) oraz zwiększanie obciążenia poziomego przy stałym obciążeniu pionowym (drugi sposób).

Łącznie przebadano 12 próbek wytoczonych z elementów murowych z betonu komórkowego. Pierwszą serię, obejmującą sześć próbek przeprowadzono przy stałym ciśnieniu zewnętrznym σ_{rad} w komorze aparatu i zmiennym naprężeniu pionowym σ_{ver} , natomiast drugą serię niszczone przez wzrost naprężeń σ_{rad} , przy stałej wartości σ_{ver} . Wartości stałych naprężeń σ_{rad} serii pierwszej i σ_{ver} serii drugiej były inne dla każdej próbki i wynosiły odpowiednio około 2, 4 i 6 N/mm² oraz 0, 2 i 4 N/mm². W początkowej fazie badania obciążenia pionowe i poziome starano się przykładać równomiernie tak, by wyeliminować do minimum powstawanie naprężeń stycznych. Po osiągnięciu założonego obciążania stałego prowadzono badania do zniszczenia próbki. Próbki badane przy stałym obciążeniu pionowym oznaczono symbolem SV, a próbki badane przy stałym ciśnieniu poziomym oznaczono symbolem SH. Wytrzymałość elementów badawczych serii SV oraz serii SH wzrasta wraz z wartością stałych naprężeń σ_{ver} i σ_{rad} .

Tablica 6.3.1 przedstawia wyniki badań w aparacie trójosiowego ściskania. Zniszczenie walców przy obu ścieżkach obciążenia następowało przez powstanie zarysowań poziomych i ukośnych. Wyniki tych badań wykorzystano w modelu numerycznym. Widok próbek po badaniu pokazano na Rys. 6.3.2.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 6.3.1 Wyniki badań w trójosiowym stanie naprężenia

Próbka		Naprężenie pionowe σ_{ver} [N/mm ²]	Naprężenie poziome σ_{hor} [N/mm ²]
$\sigma_{ver} = \text{const.}$	SV1	0	5,27
	SV2	0	5,32
	SV3	9,70	9,81
	SV4	9,70	10,21
	SV5	11,5	7,35
	SV6	13,0	8,88
$\sigma_{hor} = \text{const.}$	SH1	9,51	2,30
	SH2	9,80	2,50
	SH3	10,51	2,20
	SH4	10,73	3,60
	SH5	12,06	4,00
	SH6	12,16	5,00



Rys. 6.3.2 Sposób zniszczenia próbek serii SV (u góry) i SH (na dole)

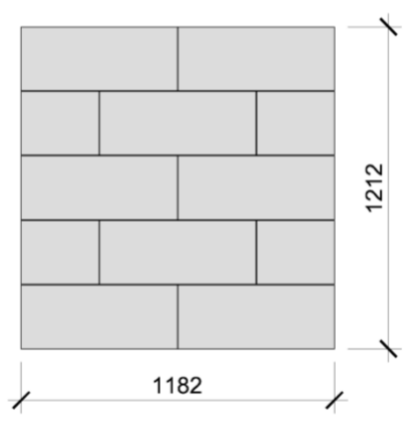
6.4. Badania wytrzymałości muru na ściskanie

Badania wytrzymałości muru na ściskanie prowadzono zgodnie z normą PN-EN 1052-1:2000 [N12]. Z bloczków z betonu komórkowego wykonano elementy próbne na zaprawie murarskiej Solbet 0.1. Wymurowano 6 elementów próbnych z niewypełnionymi spoinami pionowymi, które oznaczono symbolem S1N i 6 elementów próbnych z wypełnionymi zaprawą murarską



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

spoinami pionowymi, które oznaczono symbolem S2N. Geometrie modeli ustalono zgodnie z normą [N12] i pokazano na Rys. 6.4.1.



Rys. 6.4.1 Układ elementów murowych w elementach próbnych S1N i S2N

Elementy próbne murowano na płaskiej poziomej powierzchni płyty wielkich sił Laboratorium Budownictwa Politechniki Śląskiej, na cienkiej podsypce piaskowej. Przez pierwsze trzy dni elementy chroniono przed nadmiernym wysychaniem przez okrycie folią PE o grubości 0,2 mm. Po tym okresie, do czasu badania, elementy przechowywano w warunkach powietrzno-suchych w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej (Rys. 6.4.2).



Rys. 6.4.2 Widok elementów próbnych



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Elementy próbne badano po 28 dniach od wymurowania. Badanie prowadzono w prasie hydraulicznej o zakresie 200 ton. Elementy próbne ustawiano między głowicami prasy centralnie, bez mimośrodów. Zapewniono pełny kontakt między górną i dolną powierzchnią elementów a powierzchniami głowic maszyny wytrzymałościowej.

Podczas badań prowadzono pomiar siły ściskającej za pomocą siłomierza o dokładności 0,01 kN oraz przemieszczeń pionowych i poziomych przy użyciu czujników indukcyjnych o dokładności 0,002 mm. Wymiary bazy do pomiarów przemieszczeń muru ustalono według zaleceń zawartych w normie PN-EN 1052-1:2000 [N12]. Pomiar odkształceń pionowych posłużył do wyznaczenia wykresu zależności naprężenie pionowe σ_y – odkształcenie pionowe ϵ_y , natomiast pomiar odkształceń poziomych posłużył do wyznaczenia współczynnika Poissona ν muru.

Przed przystąpieniem do badania każdy model poddano szczegółowym oględzinom w celu określenia występowania ewentualnych uszkodzeń. Następnie każdy model zmierzono z dokładnością do ± 1 mm. Pomiarom poddano wszystkie zewnętrzne krawędzie modeli. Widok wybranego modelu w stanowisku badawczym przed badaniem pokazano na Rys. 6.4.3. Na tej właśnie fotografii widoczne są stalowe ramki do pomiaru przemieszczeń.



Rys. 6.4.3 Widok wybranego elementu próbnego



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Wartości naprężeń rysujących i niszczących określano dzieląc siłę przez zmierzone pole przekroju poprzecznego elementu próbnego. Wartości modułu sprężystości i współczynnika Poissona określano jako średnią ze średniej wartości odkształceń uzyskanych z czujników pomiarowych przy naprężeniu równym 1/3 naprężenia maksymalnego.

Tablica 6.4.1 zestawia wartości naprężenia, przy którym nastąpiło zarysowanie elementów próbnych, wytrzymałości na ściskanie, modułu sprężystości i współczynnika Poissona. W Tablica 6.4.2 zamieszczono natomiast parametry uśrednione w ramach każdej z serii. Wykresy zależności naprężenie σ_y – odkształcenie pionowe ε_y i poziome ε_x pokazano na Rys. 6.4.4 oraz Rys. 6.4.5.

Tablica 6.4.1. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie elementów próbnych muru

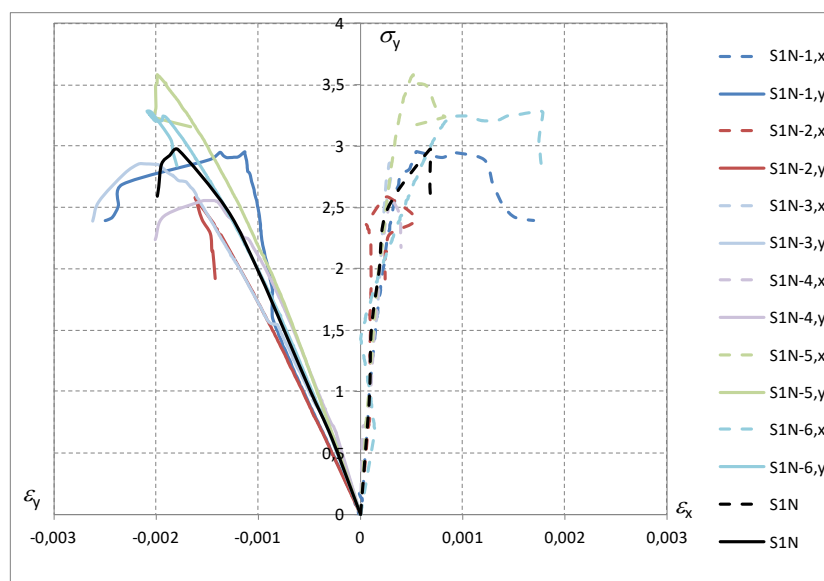
Nr serii	Naprężenie rysujące, [N/mm ²]	Naprężenie maksymalne, [N/mm ²]	Moduł sprężystości, [N/mm ²]	Współczynnik Poissona
S1N-1	2,35	2,95	1799	0,15
S1N-2	2,40	2,58	1766	0,19
S1N-3	2,28	2,86	2143	0,19
S1N-4	2,25	2,56	2106	0,20
S1N-5	2,42	3,58	2346	0,20
S1N-6	2,40	3,29	2083	0,14
S2N-1	1,88	2,18	2672	0,18
S2N-2	2,40	3,03	2360	0,11
S2N-3	1,97	2,26	2385	0,21
S2N-4	2,07	2,38	2347	0,24
S2N-5	2,15	2,81	2566	0,23
S2N-6	2,02	2,98	2355	0,13

Tablica 6.4.2. Uśrednione wyniki badań wytrzymałości na ściskanie elementów próbnych muru

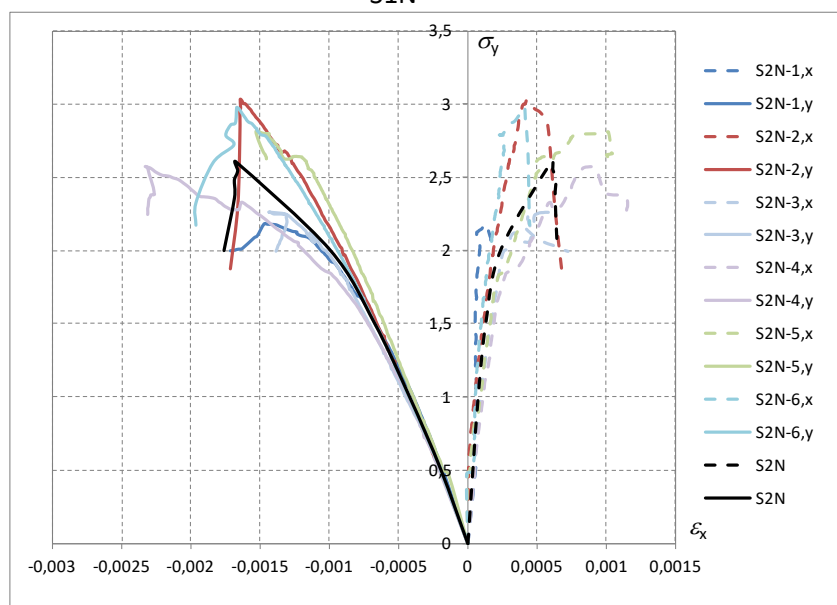
Nr serii	Naprężenie rysujące, [N/mm ²]	Naprężenie maksymalne, [N/mm ²]	Moduł sprężystości, [N/mm ²]	Współczynnik Poissona
S1N	2,35	2,97	2040	0,18
S2N	2,08	2,61	2447	0,18



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 6.4.4 Wykres zależności naprężenie σ_y – odkształcenie pionowe ε_y i poziome ε_x modeli serii S1N



Rys. 6.4.5 Wykres zależności naprężenie σ_y – odkształcenie pionowe ε_y i poziome ε_x modeli serii S2N

Norma PN-EN 1052 1:2000 [N12] zakłada, że wytrzymałość charakterystyczną muru przyjmuje się jako wartość mniejszą z wytrzymałości średniej z serii podzielonej przez 1,2 lub wartości minimalnej wytrzymałości w danej serii:



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

$$f_k = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f}{1,2} \\ f_{i,\min} \end{array} \right. \quad (61)$$

gdzie:

f – średnia wytrzymałość muru na ściskanie w danej serii (Tablica 6.4.2, kolumna 3),

$f_{i,\min}$ – najmniejsza wytrzymałość na ściskanie pojedynczego elementu próbnego w danej serii, (Tablica 6.4.1, kolumna 3).

Wyznaczone wartości wytrzymałości charakterystycznej każdej z serii zestawiono w Tablica 6.4.3. W każdej z serii decydował pierwszy z warunków równania (61), co świadczy o dużej jednorodności murów poddanych badaniu.

Tablica 6.4.3. Charakterystyczna wytrzymałość muru na ściskanie

Nr serii	$f_{k,\text{test}}$ [N/mm ²]
S1N	2,48
S2N	2,17

6.5. Badania materiałowe nadproży zbrojonych z betonu komórkowego

W modelach badawczych stosowane były również systemowe prefabrykowane nadproża zbrojone z betonu komórkowego, oznaczone przez producenta jako Solbet NS R30 180x240x2000.

Według deklaracji właściwości użytkowych producenta nadproża mają następujące właściwości:

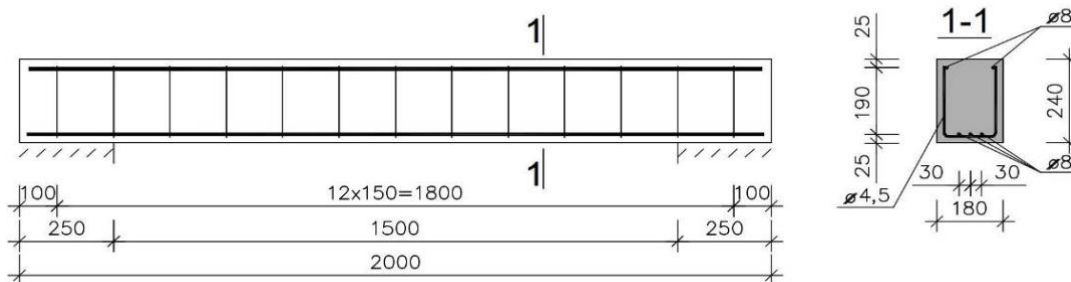
- nośność na zginanie: 30 kN [N23],
- maksymalne obciążenie obliczeniowe: 19,8 kN/m [N23],
- paroprzepuszczalność (współczynnik dyfuzji pary wodnej): 5/10 [N16], [N23],
- masa na jednostkę przekroju poprzecznego: 163 [kg/m²] [N23],
- deklarowany współczynnik przewodzenia ciepła ($\lambda_{10,\text{dry}}$) 0,180 W/mK [N16], [N23],
- odporność ogniowa R 30 [N15],
- wg producenta: zbrojenie nadproży wykonane było ze stali gatunku St3S-b-500 (klasy B według EC2). Podłużne pręty miały średnicę 8 mm (trzy pręty dołem oraz dwa pręty górą). Zbrojenie poprzeczne w postaci strzemion otwartych wykonano z prętów o średnicy 4,5 mm. Strzemiona na całej długości elementu rozmieszczono w stałym rozstawie co 150 mm. Zbrojenie podłużne oraz strzemiona były zgrzane i pokryte



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

ochronną powłoką antykorozyjną. Zbrojenie podłużne znajdowało się wewnątrz strzemion.

W przekroju poprzecznym nadproża miały szerokość $b = 180$ mm i wysokość $h = 240$ mm oraz całkowitą długość wynoszącą 2000 mm. Układ zbrojenia nadproża przedstawia Rys. 6.5.1.



Rys. 6.5.1 Nadproże NS R30 180x240x2000 wykorzystywane w badaniach

Badania materiałowe nadproży wykonał Mazur na potrzeby pracy doktorskiej [69]. Polegały one na zbadaniu paramentów betonu komórkowego i zbrojenia, z których nadproża były wykonane. Próbki do badań materiałowych elementu nadprożowego pobrano po jego zbadaniu pobierając materiał z nieuszkodzonych fragmentów strefy przypodporowej. Badania wytrzymałości na ściskanie betonu komórkowego przeprowadzono według normy PN- EN 772-1+A1:2015-10 [N22] na sześciangach ($100 \times 100 \times 100$ mm) i wyniosła ona $f_c = 4,19$ MPa, ($v = 32,2\%$).

Badanie prętów zbrojenia podłużnego zastosowanego w nadprożach przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2020 [N25]. Zbadano 9 próbek prętów podłużnych wyciętych z kosza zbrojeniowego nadproża. Pomiar odkształceń wykonano przy pomocy zewnętrznego ekstensometru. Badane pręty nie miały wyraźnej granicy plastyczności. Średnia umowna granica plastyczności $R_{p0,2} = 566$ N/mm², a średnia wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 612$ N/mm². Uzyskano $R_m/R_{p0,2} = 1,081$, co pozwoliło zaklasyfikować stal do klasy ciągliwości B według [N25]. Niewielka długość prętów zbrojenia poprzecznego (< 300 mm) wykluczała wykonanie badań wytrzymałościowych, dlatego w dalszych analizach przyjmowano parametry dla strzemion, jak dla stali zbrojenia podłużnego (identyczne uźebrowanie). Wyniki badań wytrzymałościowych nadproży opublikowano w pracach [69], [71] i [72].



6.6. Badania wytrzymałości zaprawy murarskiej na zginanie i ściskanie

Modele badawcze – mury wznoszone były na systemowej zaprawie murarskiej, przeznaczonej do murowania ścian z betonu komórkowego na ciekłą spoinę. Zaprawa nosi oznaczenie producenta Solbet 0.1. i jej nominalna klasa wytrzymałości to M5 (5N/mm^2). Wyniki badań zaprawy murarskiej zamieszczono w pracach [21], [81], [82].

Badania laboratoryjne zapraw murarskich przeprowadzono na próbkach pobranych podczas wykonywania elementów badawczych. Ponieważ zaprawy murarskie przygotowywano precyzyjnie, dozując składniki w sposób wagowy zdecydowano, że badania wykonane zostaną dla jednego zarobu zaprawy.

Zgodnie z normą PN-EN 1015-11:2020-04 [N11] zaprawę uformowano w próbki o wymiarach $40 \times 40 \times 160$ mm w formach bateryjnych, powleczonych olejem mineralnym (Rys. 6.6.1). każdą formę napełniano w równych dwóch warstwach, a każdą warstwę zagęszczano 25 uderzeniami ubijaka.



Rys. 6.6.1 Przygotowane próbki zaprawy

Formę umieszczono w komorze wilgotnościowej i przechowywano w temperaturze $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $95\% \pm 5\%$ przez 5 dni. Następnie próbki rozformowano i przechowywano w komorze klimatycznej w tych samych warunkach jeszcze przez 2 dni. Do chwili badania próbki przechowywano w temperaturze $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $65\% \pm 5\%$. Przygotowane do badań próbki przedstawiono na Rys. 6.6.2.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 6.6.2 Próbki przygotowane do badań

Badanie próbek na ściskanie i zginanie przeprowadzono w trakcie dojrzewania po 3 i 7 dniach oraz pod 28 dniami. Zgodnie z normą [N11] najpierw wykonano badania wytrzymałości na zginanie na całych beleczkach (Rys. 6.6.3a), a następnie wytrzymałości na ściskanie na przepołowionych w wyniku zginania próbkach (Rys. 6.6.3b).

a)



c)



Rys. 6.6.3 Badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie zaprawy:
a) badanie na rozciąganie zginanie, b) badania na ściskanie

Wytrzymałość na zginanie obliczono z poniższej zależności:

$$f_{m,i} = 1,5 \frac{Fl}{bd^2} \text{ N/mm}^2, \quad (62)$$

w której:

F – wartość siły niszczącej wyrażona w niutonach N,

b, d – wymiary przekroju poprzecznego próbki w mm,



l – osiowy rozstaw podpór $l = 100$ mm.

Wytrzymałość na ściskanie obliczono z poniższej zależności:

$$f_{m,i} = \frac{F_c}{1600} \text{ N/mm}^2, \quad (63)$$

w której:

f_c – wartość siły niszczącej wyrażona w niutonach, N.

Tablica 6.6.1 zestawia wartości wytrzymałości na zginanie i ściskanie uzyskane z badań.

Tablica 6.6.1 Wyniki badań zaprawy murarskiej do cienkich spoin

Dzień dojrzewania	Wytrzymałość na zginanie				Wytrzymałość na ściskanie				
	Nr próbki	$f_{mt,i}$ [N/mm ²]	$f_{mt,mv}$ [N/mm ²]	σ [N/mm ²]	Nr próbki	$f_{m,i}$ [N/mm ²]		$f_{m,mv}$ [N/mm ²]	σ [N/mm ²]
						½ „belecзки”	„belecзка”		
3	1	1,120	1,2	0,050	1	3,18	3,203	3,2	0,025
					2	3,23			
	2	1,195			3	3,11			
					4	3,38			
	3	1,214			5	3,07			
					6	3,33			
7	4	1,378	1,4	0,071	7	4,56	4,544	4,3	0,405
					8	4,53			
	5	1,291			9	3,51			
					10	4,26			
	6	1,432			11	4,29			
					12	4,94			
28	7	1,936	2,0	0,060	13	6,52	6,313	6,1	0,374
					14	6,11			
	8	2,044			15	5,85			
					16	6,31			
	9	2,048			17	6,66			
					18	6,31			
	10	2,018			19	5,51			
					20	5,27			
	11	2,034			21	6,61			
					22	5,56			
	12	2,121			23	6,41			
					24	5,86			



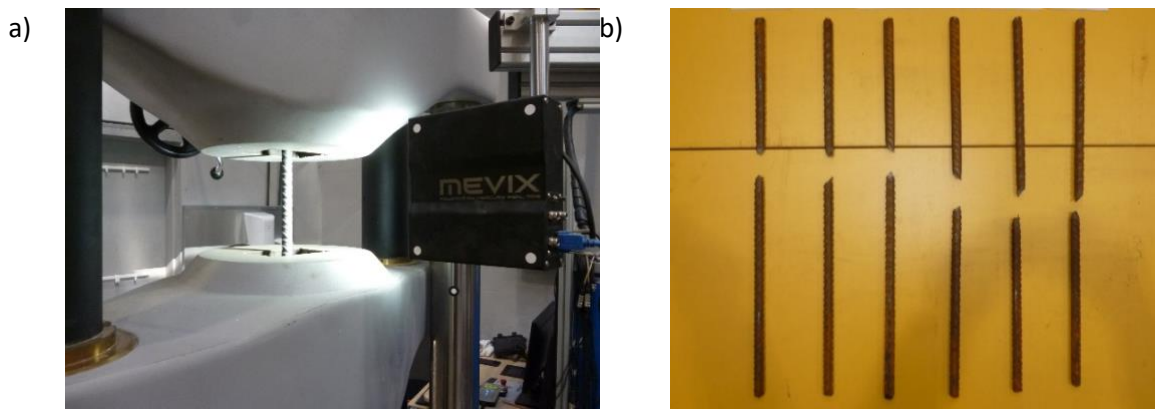
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Na podstawie przeprowadzonych badań zaprawy murarskiej do cienkich spoin o nominalnej klasie wytrzymałości równej M5 uzyskano średnią wytrzymałość na ściskanie wynoszącą $f_m = 6,1 \text{ N/mm}^2$ i na zginanie $f_{mt} = 2,0 \text{ N/mm}^2$. Zaprawę zgodnie z normą [N11] zakwalifikować można do klasy wytrzymałościowej M5, dla której minimalna wytrzymałość na ściskanie wynosi $f_m = 5 \text{ N/mm}^2$. Wykorzystana w badaniach zaprawa charakteryzowała się więc nieco większą wytrzymałością od deklarowanej przez producenta.

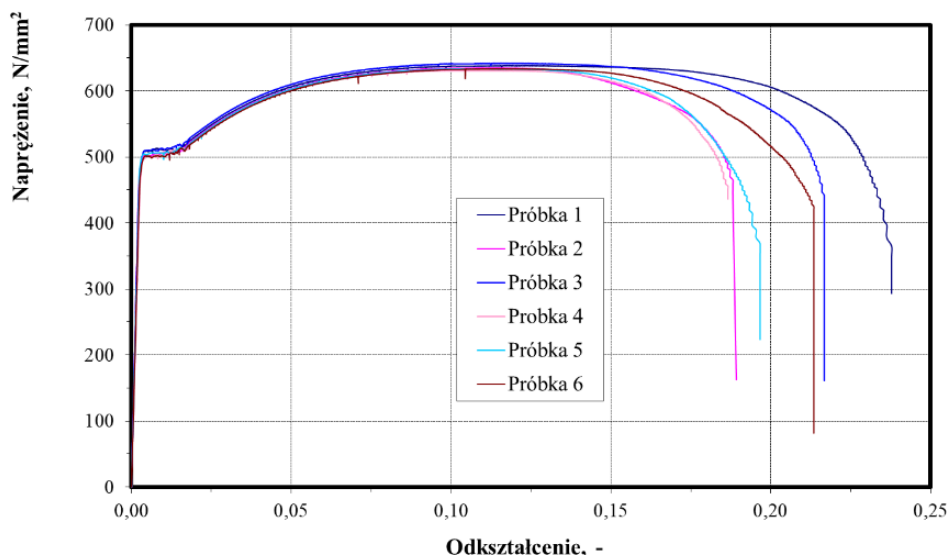
6.7. Badanie zbrojenia

Do wykonania zbrojenia elementów krępujących (trzpieni i wieńców) a także żelbetowych nadproży zastosowano tę samą stal zbrojeniową, podchodzącą z jednej partii produkcyjnej. Badaniu poddano 6 prętów średnicy 10 mm, ze stali gatunku BSt500S, klasy A-IIIN, wykorzystane jako zbrojenie główne trzpieni, wieńców oraz nadproży.

Podobnie jak w przypadku badań zbrojenia nadproży z ABK przeprowadzano próbę rozciągania zgodnie z normą zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2020 [N25], z tą różnicą, że pomiar odkształceń wykonano przy pomocy ekstensometru optycznego. Badane pręty miały wyraźną granicę plastyczności. Średnia górna granica plastyczności wyniosła $R_{eH} = 513 \text{ N/mm}^2$, a średnia wytrzymałość na rozciąganie to $R_m = 636 \text{ N/mm}^2$. Uzyskano $R_m/R_{eH} = 1,081$, $f_{tk}/f_{yk} = 1,24$, co pozwoliło zaklasyfikować stal do klasy ciągliwości C według [N25]. Na Rys. 6.7.1 pokazano widok zbrojenia podczas badań i po badaniach, a na Rys. 6.7.2 uzyskany z badań wykres naprężenie-odkształcenie.



Rys. 6.7.1 Badania stali zbrojeniowej nadproży: a) widok pręta w maszynie wytrzymałościowej, b) próbki po badaniu



Rys. 6.7.2 Wykres zależności naprężenie-odkształcenie z badań prętów zbrojeniowych

6.8. Badania betonu zwykłego

Do wykonania żelbetowych elementów krępujących (rdzeni, wieńców) oraz żelbetowych nadproży zastosowano beton klasy C20/25 wg [N20]. Każdy model badawczy był betonowany z dwóch zarobów, najpierw część dolna modelu, a później część górna. Z każdego zarobu betonowano (częściowo) po dwa modele. Sposób wykonania skrępowania opisano szczegółowo w punkcie „Modele badawcze”. Jeden zarób wykonano do betonowania żelbetowych nadproży wykorzystanych w badaniach dodatkowych. W związku z tym zarobów betonu było o jeden więcej od liczby modeli badawczych z betonem zwykłym, czyli 27. Beton był przygotowywany w laboratorium według tej samej receptury i z tych samych składników. Zastosowano cement CEM I 42,5 R. Podczas betonowania z każdego zarobu pobierano po 3 próbki sześciennie o długości boku 15 cm. Próbki badano po 28 dniach w prasie wytrzymałościowej (Rys. 6.8.1). W tTablica 6.8.1 przedstawiono wyniki badań betonu dla każdego zarobu. W tablicy tej podano również oznaczenie modelu badawczego, w którym wykorzystano beton danego zarobu.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 6.8.1 Wyniki badań betonu zwykłego

Nr zarobu	Oznaczenie modelu badawczego, w którym miejscu wykorzystano beton	Wytrzymałość próbki [N/mm ²]	Wytrzymałość średnia zarobu [N/mm ²]
1	MNS-Z1-1, MNS-Z1-2 (wieńce modeli)	24,2	24,03
		22,6	
		25,3	
2	MNS-Z1-1, MNS-Z1-2 (wieńce modeli)	26,6	26,23
		25,3	
		26,8	
3	MNS-Z2-1, MNS-Z2-2 (wieńce modeli)	25,9	24,67
		26,1	
		22,0	
4	MNS-Z2-1, MNS-Z2-2 (wieńce modeli)	24,0	24,23
		24,6	
		24,1	
5	MNSO-Z1-1, MNSO-Z1-2, (wieńce modeli)	25,6	25,30
		25,0	
		25,3	
6	MNSO-Z1-1, MNSO-Z1-2, (wieńce modeli)	24,2	24,03
		23,1	
		24,8	
7	MNSO-Z2-1, MNSO-Z2-2, (wieńce modeli)	25,8	24,80
		24,1	
		24,5	
8	MNSO-Z2-1, MNSO-Z2-2, (wieńce modeli)	24,7	24,70
		24,5	
		24,9	
9	MS-Z1-1, MS-Z1-2 (dół rdzeni)	25,1	24,77
		24,5	
		24,7	
10	MS-Z1-1, MS-Z1-2 (górze rdzeni, rygle)	26,1	25,27
		26,5	
		23,2	
11	MS-Z2-1, MS-Z2-2 (dół rdzeni)	24,7	24,87
		25,1	
		24,8	
12	MS-Z2-1, MS-Z2-2 (górze rdzeni, rygle)	24,8	24,50
		24,3	
		24,4	
13	MSO-Z1-1, MSO-Z1-2 (dół rdzeni)	25,3	25,13
		25,4	
		24,7	
14	MSO-Z1-1, MSO-Z1-2 (górze rdzeni, rygle)	24,7	24,67
		24,8	
		24,5	



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 6.8.1 (cd) Wyniki badań betonu zwykłego

Nr zarobu	Oznaczenie modelu badawczego, w którym miejscu wykorzystano beton	Wytrzymałość próbki [N/mm ²]	Wytrzymałość średnia zarobu [N/mm ²]
15	MSO-Z2-1, MSO-Z2-2 (dół rdzeni)	24,9	25,07
		25,1	
		25,2	
16	MSO-Z2-1, MSO-Z2-2 (górze rdzeni, rygle)	24,2	24,60
		24,7	
		24,9	
17	M2SO-Z1-1, M2SO-Z1-2 (dół rdzeni)	26,2	25,23
		26,1	
		23,4	
18	M2SO-Z1-1, M2SO-Z1-2 (górze rdzeni, rygle)	25,9	26,00
		25,8	
		26,3	
19	M2SO-Z2-1, M2SO-Z2-2 (dół rdzeni)	24,6	24,67
		24,9	
		24,5	
20	M2SO-Z2-1, M2SO-Z2-2 (górze rdzeni, rygle)	25,7	25,67
		25,4	
		25,9	
21	Nadproża żelbetowe	25,1	24,77
		25,3	
		23,9	
22	MNSO-LC-1, MNSO-LC-2 (dół rdzeni)	24,4	25,90
		26,7	
		26,6	
23	MNSO-LC-1, MNSO-LC-2 (górze rdzeni, rygle)	26,5	26,60
		26,5	
		26,8	
24	MSO-SC-1, MSO-SC-2 (dół rdzeni)	27,4	27,43
		26,8	
		28,1	
25	MSO-SC-1, MSO-SC-2 (górze rdzeni, rygle)	24,2	24,33
		24,5	
		24,3	
26	M2SO-SC-1, M2SO-SC-1 (dół rdzeni)	24,7	24,03
		25,6	
		21,8	
27	M2SO-SC-1, M2SO-SC-1 (górze rdzeni, rygle)	25,3	25,47
		25,4	
		25,7	
Wytrzymałość średnia ze wszystkich zarobów, $f_{c,mean}$ [N/mm ²]			25,07
Odchylenie standardowe, S_c [N/mm ²]			1,11
Wytrzymałość minimalna ze wszystkich zarobów, $f_{c,min}$ [N/mm ²]			21,80



a)



b)



Rys. 6.8.1 Widok próbki betonu przed (a) i po badaniu (b)

Zgodnie z zalecaniami normy PN-EN-206:2021-08 [N20] przeprowadzono klasyfikację betonu do klasy wytrzymałościowej oraz obliczono 5% kwantyl wytrzymałości betonu na ściskanie.

5% kwantyl wytrzymałości betonu na ściskanie dla rozkładu t – niecentralne przy jednostronnym obszarze odrzuceń można wyznaczyć z zależności:

$$f_{c;0,05} = f_{c,mean} - t_{n-1,\alpha} \frac{S_c}{\sqrt{n}}, \quad (63)$$

gdzie: n – liczba próbek – $n=81$,

$f_{c,mean}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie ze wszystkich zarobów,

S_c – odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie,

$t_{n-1,\alpha}$ – przy poziomie ufności $\alpha = 0,05$, dla próbek ($n - 1 = 80$) $t_{80;0,05} = 3,14$.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

$$f_{c;0,05} = f_{c,mean} - t_{n-1,\alpha} \frac{s_c}{\sqrt{n}} = 24,68 \text{ N/mm}^2$$

Zgodnie z normą PN-EN-206:2021-08 [N20] kryterium podwójne przyjmuje postać:

$$f_{c,l,min} \geq f_{ck} - 4, \quad f_{c,mean} \geq f_{ck} + 4 \quad (64)$$

Na podstawie podwójnego kryterium badany beton można zakwalifikować do klasy wytrzymałościowej C20/25.

6.9. Badania betonu lekkiego

Do serii badań dodatkowych do wykonania elementów krępujących (rdzeni, wieńców) zastosowano lekki beton kruszywowy Astra Termolite o nominalnej klasie LC16/18. Beton był gotowym produktem przywiezionym w workach i wymagał tylko dodania superplastyfikatora i wody oraz wymieszania. Jako superplastyfikator zastosowano Astrament SPL10/600 w ilości 0,6 kg na 100 kg cementu. Podobnie jak w przypadku betonu zwykłego model badawczy był betonowany z dwóch zarobów betonu lekkiego, najpierw część dolna modelu, a później część górna. Z każdego zarobu betonowano po dwa modele (ich części górne lub dolne). W związku z tym zarobów betonu lekkiego było tyle, ile modeli badawczych, czyli 6. Podczas betonowania z każdego zarobu pobierano po 3 próbki sześciennie o długości boku 15 cm. Próbkę badano po 1, 3, 7 i 28 dniach w prasie wytrzymałościowej Controls z prędkością przyrostu obciążenia 0,5 MPa/s. Tablica 6.9.1 zestawia wytrzymałości betonu lekkiego na ściskanie.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 6.9.1 Wyniki badań wytrzymałościowych betonu lekkiego po 1, 3 7 i 28 dniach dojrzewania w temperaturze 20°C i wilgotności powietrza 60 %

Czas [dni]	Masa [g]	Gęstość [kg/m ³]	Średnia gęstość [kg/m ³]	Wytrzymałość na ściskanie [N/mm ²]	Średnia wytrzymałość na ściskanie [N/mm ²]
1	1130	1130	1086	3,44	3,02
	1042	1042		2,47	
	1085	1085		3,16	
3	1030	1030	1010	4,14	4,17
	976	976		4,09	
	1025	1025		4,28	
7	1043	1043	1027	6,66	6,16
	1025	1025		5,82	
	1012	1012		5,99	
28	994	994	1035	10,98	10,87
	1047	1047		10,44	
	1063	1063		11,20	

Badany beton lekki można zakwalifikować do klasy LC8/10. Nie uzyskano zatem klasy deklarowanej przez producenta, co może być związane z zastosowaniem superplastyfikatora.

7. Badania murów w skali naturalnej

7.1. Wprowadzenie

Założono, że badania będą prowadzone na murach skrępowanych betonem zwykłym, cechującym się klasycznym skurczem oraz na murach skrępowanych betonem lekkim, który nie powinien wykazywać skurczu. Badania skrępowanych i nieskrępowanych ścian z betonu komórkowego podzielono na trzy etapy:

- **Badania wstępne.** Obejmowały dwie ściany pełne skrępowane betonem zwykłym oraz betonem lekkim. Podczas wiązania betonów mierzono odkształcenia elementów krępujących oraz odkształcenia muru. Po przeprowadzeniu badań odkształceń obie ściany użyto w badaniach zasadniczych.
- **Badania zasadnicze.** Obejmowały 26 modeli ścian nieskrępowanych i skrępowanych bez otworu i z otworem (13 serii po dwie ściany). W elementach krępujących zastosowano beton zwykły lub beton lekki. Jako nadproże w modelach z otworem zastosowano



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

prefabrykowaną belkę nadprożową ze zbrojonego betonu komórkowego. Badano ściany z niewypełnionymi i wypełnionymi zaprawą murarską do cienkich spoin spoinami pionowymi (czołowymi).

- **Badania dodatkowe.** Powstały one po badaniach zasadniczych i stanowiły uzupełnienie tych badań. W badaniach zasadniczych ścian z otworem pierwsze rysy powstawały w nadprożu z betonu komórkowego, dlatego postanowiono sprawdzić jak będą zachowywały się ściany z nadprożami sztywniejszymi i bardziej odpornymi na zarysowania. Wykonano łącznie 6 dodatkowych ścian, w których zamiast nadproża z betonu komórkowego zastosowano prefabrykowane nadproża żelbetowe. W badaniach dodatkowych, z uwagi na brak istotnych różnic w badaniach zasadniczych między wynikami ścian z niewypełnionym i wypełnionymi spoinami czołowymi, zdecydowano się na wznoszenie ścian tylko z niewypełnionymi spoinami pionowymi.

Jako badania dodatkowe wykonano również badania fragmentów ścian. Celem tych badań o poznanie właściwości mechanicznych układu występującego nad otworem - warstwy od góry: wieńca z betonu lekkiego, nadmurowanej warstwy bloczków z ABK, nadproża z betonu komórkowego. Informacje z tych badań zostały wykorzystane do obliczeń metodą Strut and Tie.

7.2. Badania wstępne

Przyjęte założenia i geometria modeli

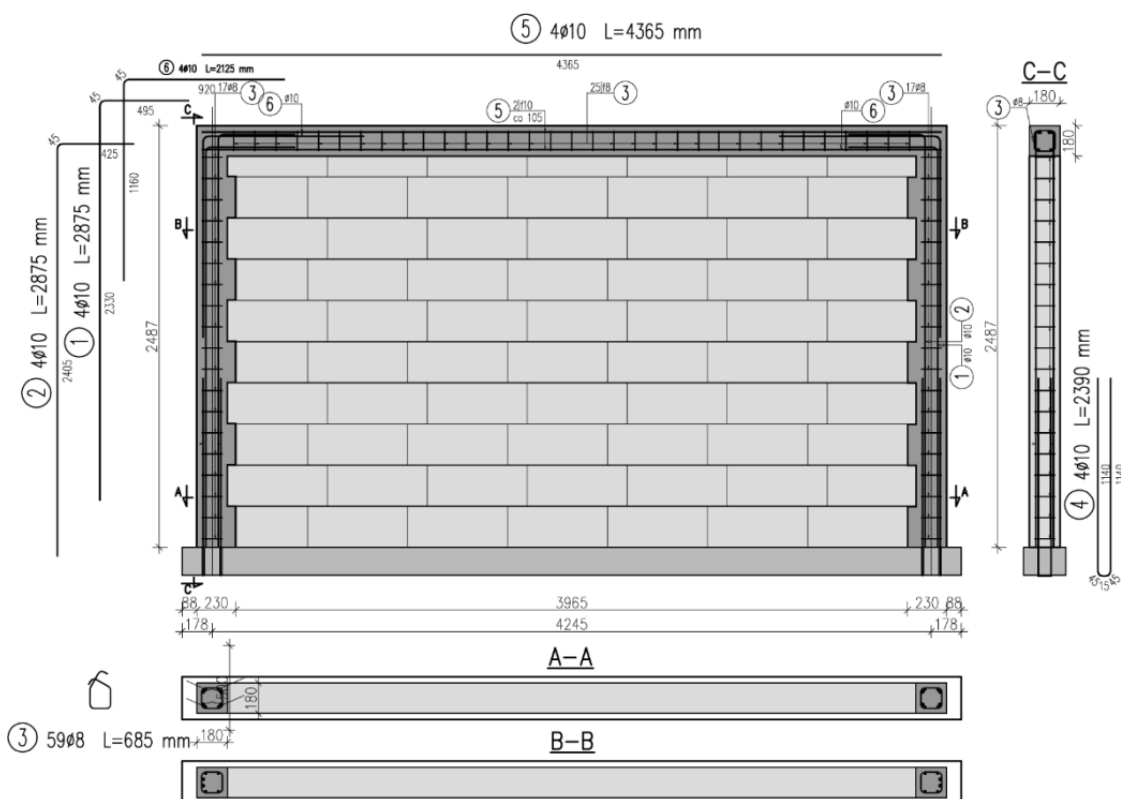
Przed rozpoczęciem badań modeli, prowadzono na dwóch murach wstępny pomiar odkształceń wywołanych skurczem / pęcznieniem betonu rdzeni i rygla. Pomiar wykonywano na jednej ścianie skrępowanej betonem zwykłym oraz na jednej ścianie skrępowanej betonem lekkim. Celem badań było określenie wpływu skrępowania murów na wytrzymałość muru na ściskanie, jednak w pierwszej kolejności postanowiono przeanalizować wpływ samego skurczu na odkształcenia ścian.

W modelu oznaczonym jako MS-Z1-1 (mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi) zastosowano beton zwykły wykonany na cemencie CEM-I 42,5 R i nominalnej klasie wytrzymałości C20/25 oraz konsystencji S3. W modelu oznaczonym jako MSL-Z1-1 w elementach krępujących stosowano niekurczliwy beton lekki o klasie wytrzymałości LC8/10.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Geometria obu badanych ścian była taka sama. Długość modeli wynosiła 4,43 m, a wysokość 2,49 m (Rys. 7.2.1). Wzniesiono je na prefabrykowanej żelbetowej belce podwalinowej zaopatrzonej w otwory do przepuszczenia zbrojenia startowego rdzeni. Trzpienie żelbetowe jako elementy krępujące były wykonane ze strzępiami o głębokości 5cm. Dzięki temu zapewnione było wypełnienie mieszanką betonową szalunków.



Rys. 7.2.1 Geometria skrępowanych obwodowo modeli badawczych wykorzystanych w badaniach wstępnych

Elementy żelbetowe z betonu zwykłego i lekkiego miały wymiary przekroju poprzecznego 180x180 mm (górny rygiel i rdzenie) oraz 180x230 mm – rdzenie w miejscach występowania strzępi. Głębokość strzępi wynosząca 5cm umożliwiła prawidłowe ułożenie mieszanki betonowej, która je szczelnie wypełniła. Do wykonania murów zastosowano system składający się z bloczków Solbet Optimal o szerokości 180 mm oraz zaprawy murarskiej do cienkich spoin do betonu komórkowego na cemencie białym Solbet 0.1. Zbrojenie wszystkich elementów żelbetowych stanowiły cztery pręty podłużne o średnicy 10 mm ze stali gatunku BSt500S i klasy A-IIIN oraz zbrojenie poprzeczne z prętów o średnicy 8 mm z tej samej stali. Otulina zbrojenia wynosiła 25 mm.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Skrępowanie murów realizowano w czterech etapach:

- **Etap I** polegał na osadzeniu w uprzednio wywierconych w dolnym ryglu prętów starterów i uzupełnieniu powstałych między prętami a betonem szczelin zaprawą cementową (c:p 1:1) - Rys. 7.2.2.
- W **etapie II** między osadzonymi prętami starterami wzniesiono murowaną ścianę z pozostawieniem strzępi - Rys. 7.2.3.
- W **etapie III** pionowe rdzenie zazbrojono, zaszalowano i zabetonowano do wysokości około 1,5 m - Rys. 7.2.4 i Rys. 7.2.5.
- **Etap IV** polegał na zazbrojeniu górnej części rdzeni i rygla oraz zabetonowaniu.



Rys. 7.2.2 Etap I – osadzanie starterów zbrojenia rdzeni w prefabrykowanej belce



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrzepowanych konstrukcją żelbetową



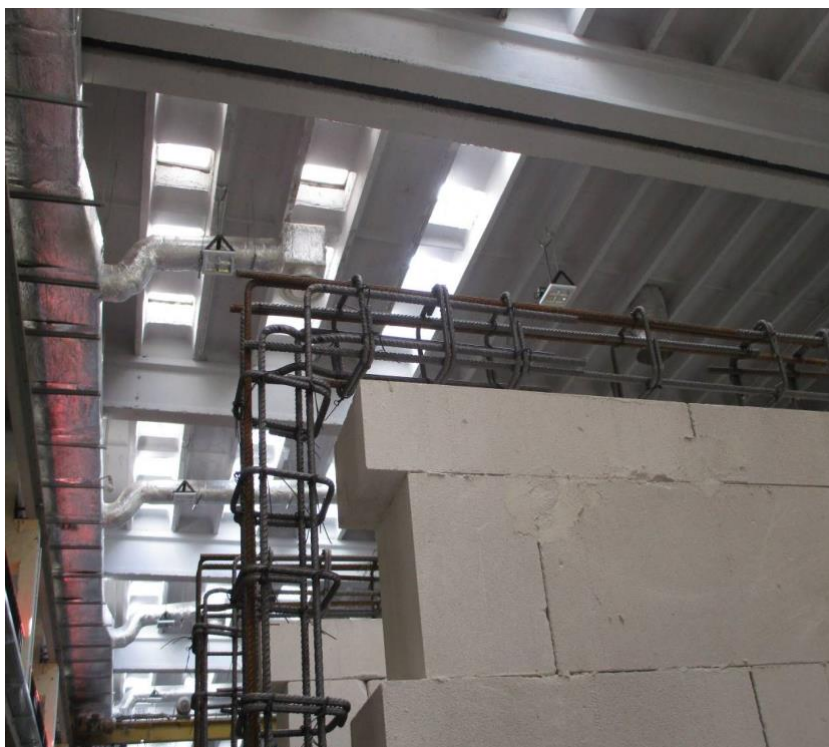
Rys. 7.2.3 Etap II – murowanie ścian



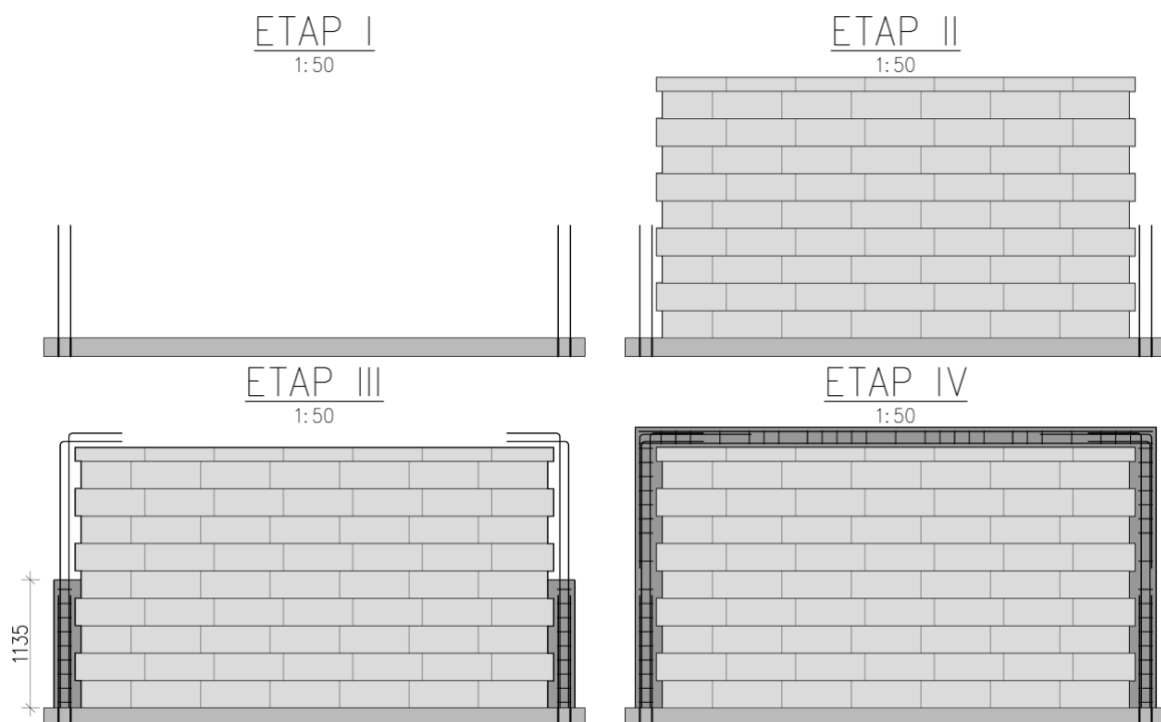
Rys. 7.2.4 Etap III – Zbrojenie rdzeni, przygotowanie szalunku do połowy wysokości rdzenia



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.2.5 Etap IV – Zbrojenie naroży rdzeni i rygla górnego

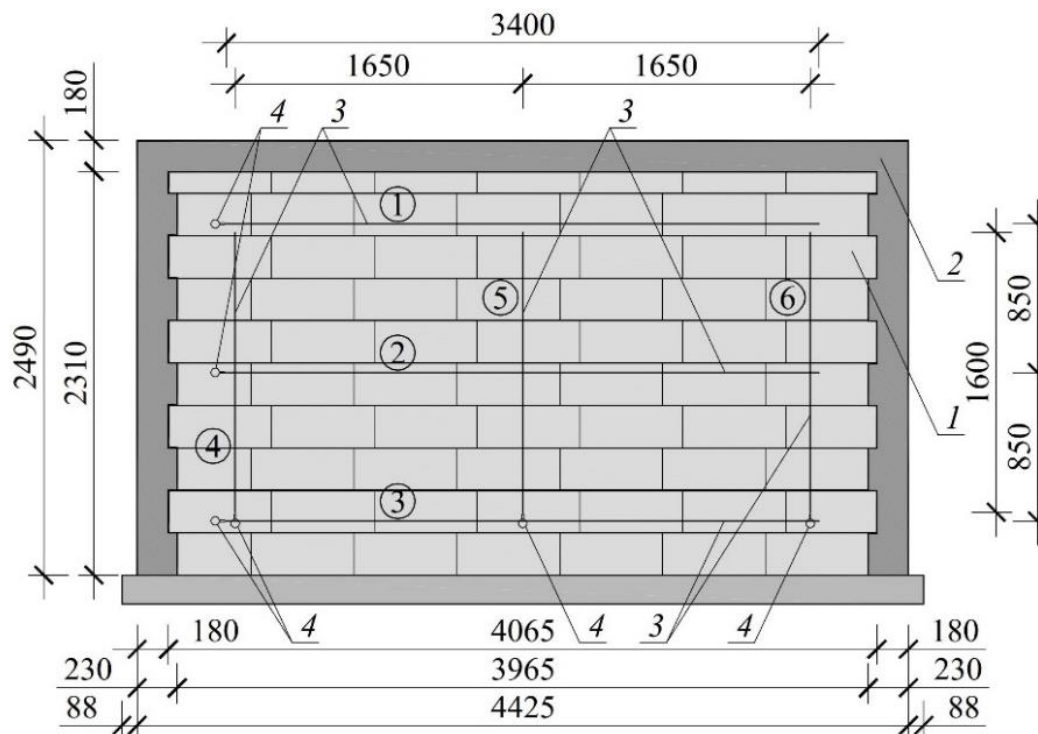


Rys. 7.2.6 Etapy wykonywania modeli skrępowanych bez otworu



Technika badań

Podczas dojrzewania ścian mierzono odkształcenia elementów krępujących i muru. Odkształcenia te rejestrowano trzema technikami. Pierwsza polegała na pomiarze przemieszczeń wzdłuż baz pomiarowych przy zastosowaniu czujników przemieszczeń. Po jednej stronie ściany zainstalowano układ sześciu cięgien oraz czujników zegarowych (Rys. 7.2.7). Trzy cięgna pionowe o długości bazy pomiarowej wynoszącej 1600 mm rozlokowano w środku rozpiętości ściany oraz po obu stronach muru w rozstawie co 1650 mm. Pionowe bazy pomiarowe oznaczono numerami 4, 5 i 6. Trzy poziome cięgna pomiarowe o początkowej długości wynoszącej 3400 mm zainstalowano w rozstawie co 850 mm. Bazy te oznaczono numerami 1, 2 i 3. Widok modelu zaopatrzonego w układ cięgien i czujniki zegarowe, podczas układania mieszanki betonowej, pokazano na Rys. 7.2.8. Pomiar odkształceń prowadzono za pomocą standardowych czujników zegarowych o zakresie 1,0 mm i dokładności 0,001 mm. Rejestrację odkształceń muru rozpoczęto niezwłocznie po zakończeniu układania mieszanki betonowej.



Rys. 7.2.7 Stanowisko badawcze do badania odkształceń: 1 – model badawczy; 2 – wieniec lub trzcina (skrępowanie); 3 – ramka do pomiaru przemieszczeń; 4 – czujnik zegarowy przemieszczeń



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.2.8 Widok ściany skrępowanej betonem zwykłym z układem baz pomiarowych i czujników zegarowych (model MS-Z1-1)

Druga technika pomiaru polegała na zastosowaniu optycznego systemu cyfrowej korelacji obrazu (digital image correlation – DIC), przy pomocy, której dokonano rejestracji przemieszczeń połowy muru z drugiej strony modelu (Rys. 7.2.9). W celu rejestracji odkształceń muru wywołanych skurczem betonu naniesiono repery pomiarowe rozmieszczone w rozstawie pionowym co 850 mm oraz poziomym co 1700 mm.

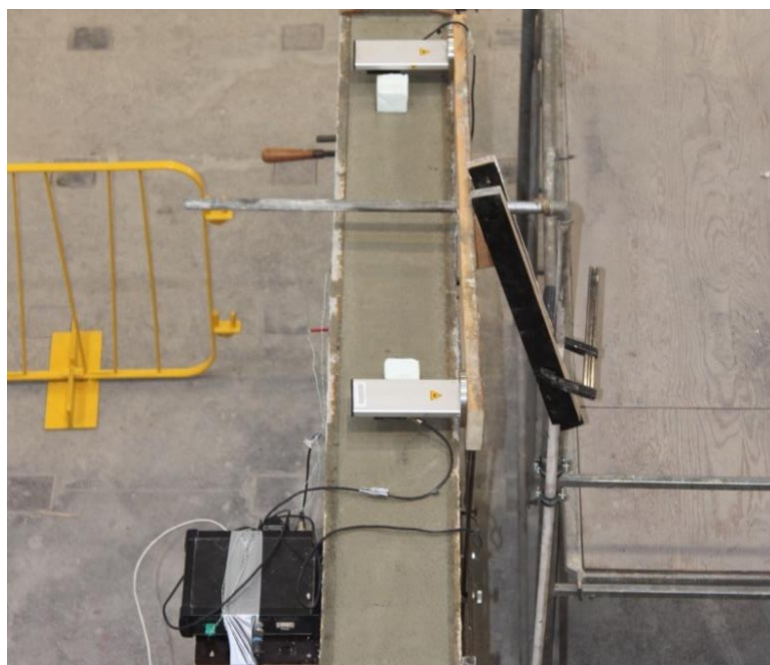
Trzecia technika, prowadzona równolegle z pomiarami muru, polegała na kontroli odkształceń betonu górnego rygla. W tym celu został zainstalowany laserowy układ pomiarowy [39] pozwalający na pomiar przemieszczeń 2 punktów pomiarowych ulokowanych na górnej powierzchni wieńca. W obu modelach punkty ulokowano w rozstawie wynoszącym 850 mm, w środku długości rygla (Rys. 7.2.10).



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.2.9 Pomiar przemieszczeń muru systemem optycznym Aramis (model MS-Z1-1)



Rys. 7.2.10 Pomiar przemieszczeń betonu czujnikiem laserowym (model MS-Z1-1)

W trakcie układania mieszanki betonowej w wieńcu zainstalowano ponadto dwa czujniki temperatury zlokalizowane 20 mm oraz 100 mm od dolnej krawędzi wieńca, a także dodatkowo



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

prowadzono rejestrację temperatury otoczenia. Odczyty zmiany temperatury oraz odkształceń wieńca rejestrowano komputerowo z częstotliwością zapisu danych, co 1 minutę przez okres 108 godzin. W obu modelach kontrolę odkształceń muru przerwano po 340 godzinach.

Z mieszanek betonowych pobrano próbki do przeprowadzenia badań skurczu samego betonu zwykłego i lekkiego. Skurcz swobodny betonu rejestrowano na świadku, który składał się z formy o wymiarach przekroju poprzecznego 100 mm x 100 mm i długości 500 mm wypełnionej mieszanką betonową. W formie wykonano otwory, w których umieszczono repery stykające się z dojrzewającym betonem z jednej strony i zegarowymi czujnikami przemieszczeń (zakres 1,0 mm, dokładność wskazań 0,001 mm) z drugiej strony (Rys. 7.2.11). W celu zapewnienia swobodnego odkształcania próbki i zmniejszenia tarcia formę wyłożono podwójną warstwą folii. Dodatkowo przeprowadzono badanie skurczu za pomocą urządzenia ASTM-Shrinkage Ring zgodnie z amerykańską normą ASTM C1581 / C1581M [N1].



Rys. 7.2.11 Badania skurczu swobodnego. Widok stanowiska badawczego

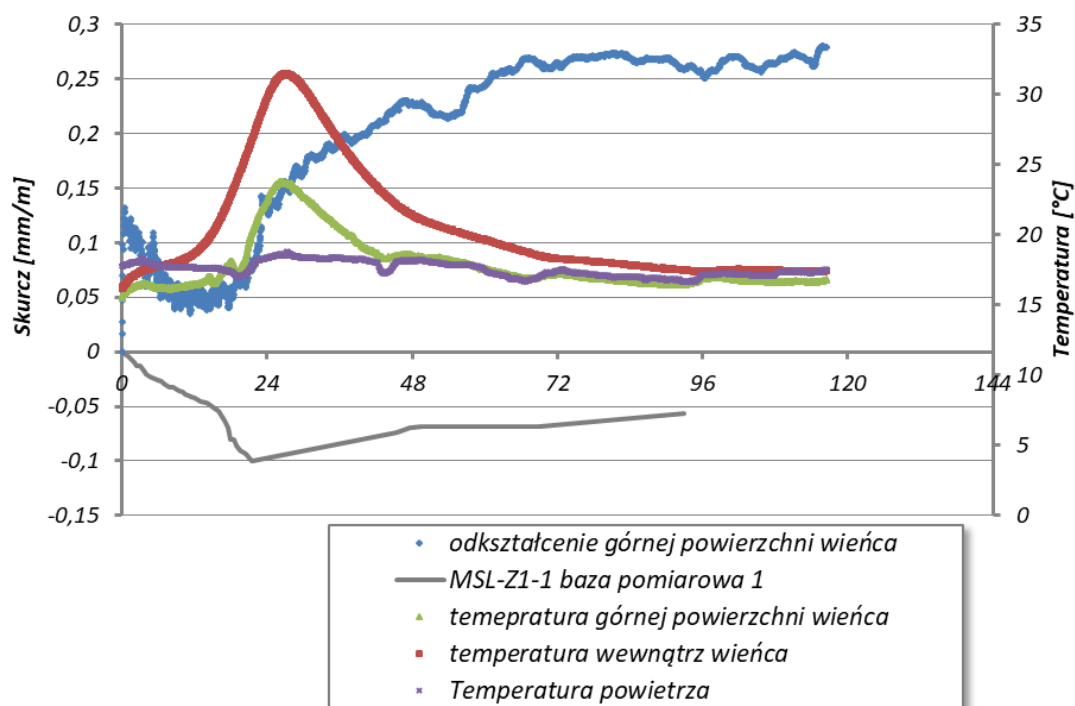
Pomiar zmian długości rejestrowany był poprzez indukcyjne czujniki przemieszczeń. Badania przeprowadzono w komorze klimatycznej zapewniającej stałe warunki cieplno-wilgotnościowe (temperatura $T=20^{\circ}\text{C}$ i wilgotność względna powietrza 60 %). Określono wpływ pielęgnacji (brak lub obecność przykrycia warstwą folii polietylenowej górnej powierzchni próbki) na wielkość odkształceń próbek betonu.



Wyniki badań

Badanie modelu MSL-Z1-1 skrępowanego betonem lekkim wykonano w lutym 2019 r. Wyniki tych badań podsumowano na Rys. 7.2.12 (skurcz oznaczono wartościami dodatnimi, a pęcznienie wartościami ujemnymi). W trakcie badania temperatura powietrza wahała się w ciągu doby od 16°C do 18°C. Temperatura wewnątrz wieńca wzrosła dwukrotnie w ciągu 25 godzin osiągając maksymalny poziom 32°C. Po upływie 100 h temperatura wieńca osiągnęła temperaturę otoczenia.

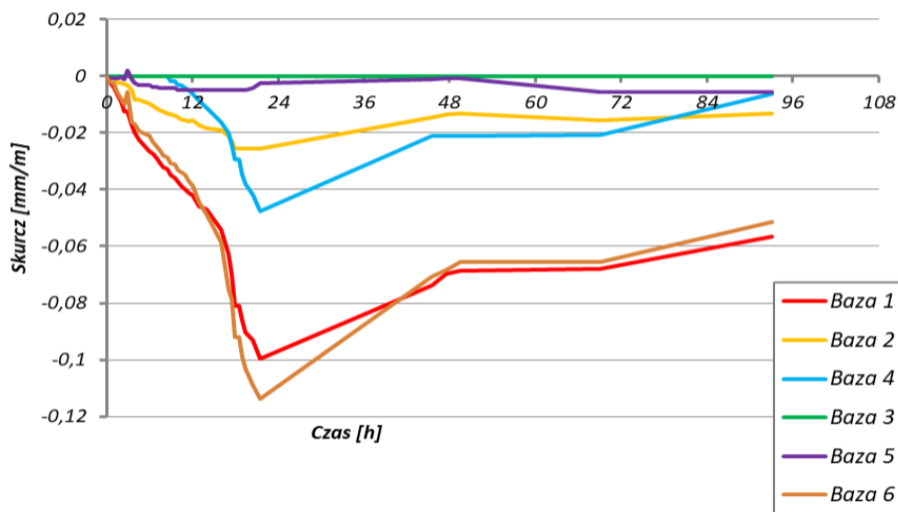
Pomiar deformacji górnej powierzchni wieńca wykazał początkowo przyrost odkształceń, a następnie po 17 godzinach skrócenia (skurcz). Największe odkształcenia skurczowe górnej powierzchni wieńca wyniosły 0,28 mm/m po upływie około 108 godzin. W górnej części ściany (baza pomiarowa 1 – Rys. 7.2.7), od chwili rejestracji odkształceń nastąpiło narastające wydłużenie bazy pomiarowej nr 1 osiągając po 21 godzinach wartość – 0,1 mm/m, następnie wystąpiło skrócenie długości bazy pomiarowej do poziomu około 0,05 mm/m. Niski skurcz betonu lekkiego nie wywołał zatem skurczu muru. Przebieg odkształceń wszystkich baz pomiarowych muru przedstawiono na Rys. 7.2.12.



Rys. 7.2.12 Wyniki modelu MSL-Z1-1

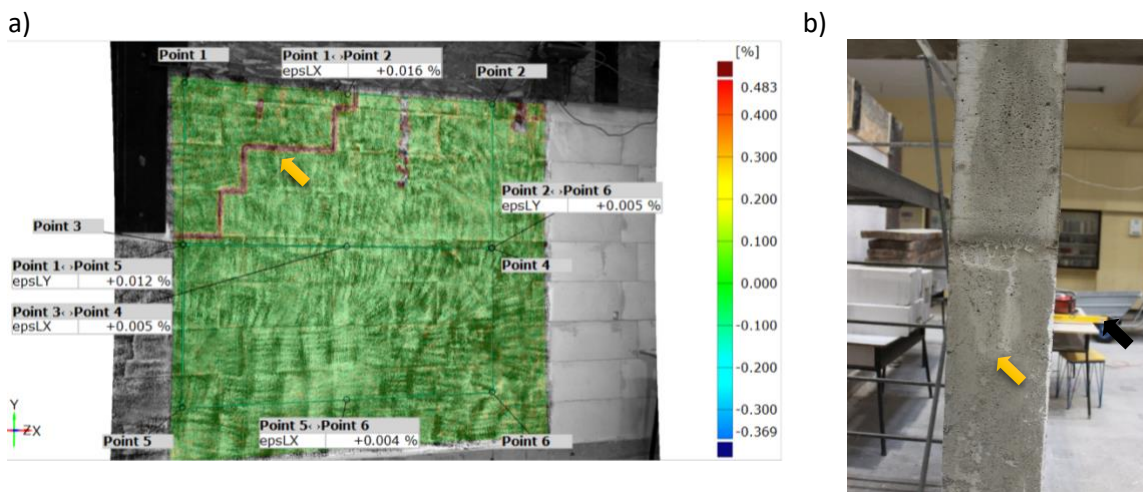


Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.2.13 Odkształcenia baz pomiarowych modelu MSL-Z1-1

Rezultaty uzyskane za pomocą systemu optycznego potwierdziły zjawisko rozciągania ściany w pierwszych kilkunastu godzinach po ułożeniu mieszanki betonowej. Odkształcenia uzyskane po czasie 20 h przedstawiono na Rys. 7.2.13. Wyniki odkształceń baz pomiarowych były zbieżne z wynikami czujników zegarowych. Analiza map odkształceń powierzchni muru wykazała występowanie zarysowania muru spowodowanego wydłużeniem elementów żelbetowych. Powstałe rysy przebiegały w okolicach naroży między elementami krępującymi biegnąc przez spoiny wsporne oraz czołowe nie uszkadzając elementów murowych. Po usunięciu szalunków stwierdzono zarysowanie żelbetowego rdzenia w okolicach poziomego zarysowania muru dochodzącego do rdzenia (Rys. 7.2.14b).



Rys. 7.2.14 Model MSL-Z1-1: a) zarysowanie muru; b) zarysowanie betonu



Ukośny charakter zarysowania muru MSL-Z1-1 wskazywał na ukośne rozciąganie narożnika muru powodujące utratę przyczepności pomiędzy elementami murowymi i zaprawą w spoinach wspornych. Z pewnością zarysowanie muru mogłoby być większe, gdyby w jednym etapie układano mieszankę betonową na całej wysokości rdzenia, a nie od połowy wysokości. Na podstawie zaobserwowanych zarysowań można sądzić, że połączenia przez strzępia spowodowały ukośne ściskanie muru. Takie same zjawisko mogło wystąpić w pierwszym etapie po ułożeniu mieszanki betonowej do połowy wysokości. Jednak nie prowadzono żadnych obserwacji bezpośrednio po wykonaniu pierwszej.

Badanie modelu MS-Z1-1, skrępowanego betonem zwykłym, przebiegało we wrześniu 2019 r. (Rys. 7.2.15). Temperatura wewnątrz hali laboratorium wahała się w ciągu doby od 20°C do 24°C. Temperatura wieńca zmieniała się od 20°C do 30°C osiągając najwyższą temperaturę po upływie około 7 godzin od ułożenia mieszanki betonowej.

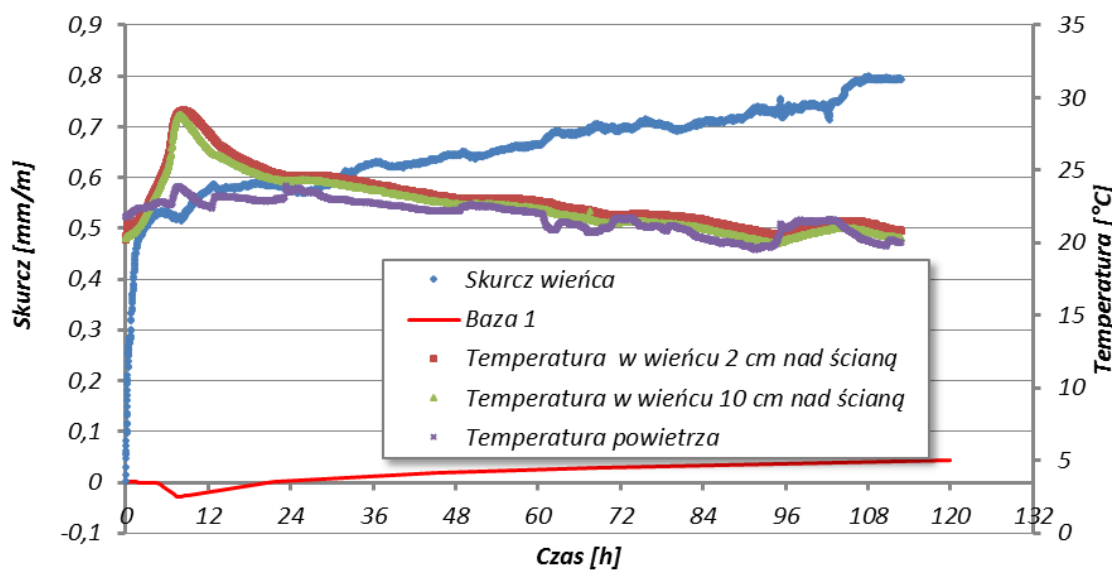
Beton wieńca wykazywał odkształcenia skurczowe od chwili ułożenia mieszanki betonowej. Pomiar laserowy na górnej powierzchni wieńca wykazały, że maksymalne skrócenie wieńca na odcinku 850 mm wyniosło 0,668 mm (0,81 mm/m).

W murze, podobnie jak w modelu MSL-Z1-1, stwierdzono najpierw przyrost odkształceń, a później ich systematyczne zmniejszania. Największy przyrost stwierdzono po upływie około 8 godzin, gdy zarejestrowano wydłużenie bazy pomiarowej nr 1 wynoszące – 0,027 mm/m. Po upływie około 16 godzin odkształcenia wróciły do wartości początkowych, a po upływie 340 godzin baza pomiarowa uległa skróceniu, którego wartość wyniosła 0,067 mm/m. Największe odkształcenia zarejestrowano w czujnikach rozmieszczonych na skrajnych krawędziach modeli. Przebieg odkształceń wszystkich baz pomiarowych muru przedstawiono na Rys. 7.2.16.

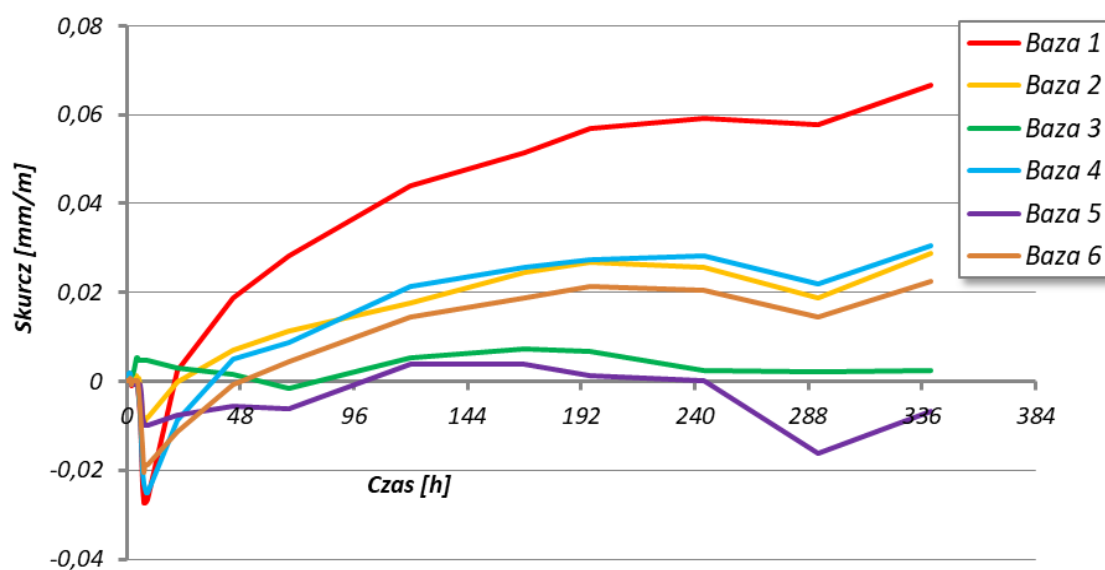
W badaniach skurczu swobodnego betonu zwykłego maksymalne skrócenie modelu świadka wniosło 0,18 mm (0,36 mm/m) po upływie 340 godzin. Przebieg zależności skurczu swobodnego betonu zwykłego w czasie wraz z odkształceniami baz pomiarowych nr 1 muru skrępowanego betonem lekkim (MSL-Z1-1) oraz betonem zwykłym (MS-Z1-1) przedstawiono na Rys. 7.2.17. Pęknięcie pierścienia nastąpiło po 14 dniach.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



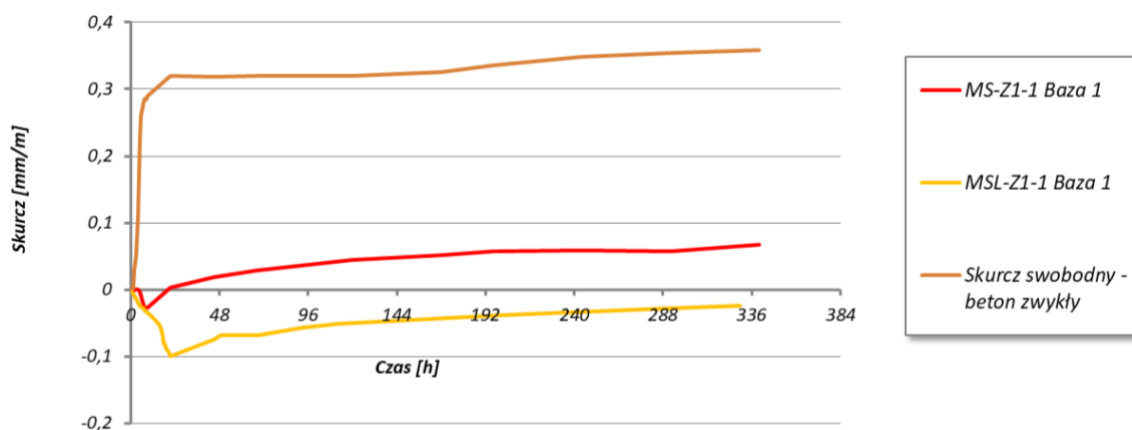
Rys. 7.2.15 Wyniki modelu MS-Z1-1



Rys. 7.2.16 Odkształcenia baz pomiarowych modelu MS-Z1-1



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.2.17 Wyniki pomiarów skurczu swobodnego

Podsumowanie badań wstępnych

Niezależnie od typu zastosowanego betonu do skrępowania murów największe odkształcenia ścian zarejestrowano w czujnikach rozmieszczonych wzdłuż skrajnych pionowych i poziomych krawędzi modeli. Zaobserwowane zmiany temperatury wewnątrz wieńca związane są z występowaniem procesu hydratacji cementu. Wraz z uzyskaniem maksymalnej temperatury wieńca wystąpiły najmniejsze odkształcenia baz pomiarowych (największe rozciąganie muru), które w przypadku skrępowania są zjawiskiem niepożądanym. Z pewnością na występujące zjawiska istotnie wpłynęło wysychanie betonu i pochłanianie wody przez elementy murowe, które mogły zwiększyć swoją objętość przez pęcznienie. Można sądzić, że pęcznienie bloczków mogło wywołać dodatkowe rozciąganie elementów krępujących.

Odształcenia ściany wywołane skurczem betonu, a także odkształcenia żelbetowych elementów krępujących różniły się od skurczowych odkształceń swobodnych betonu. W przypadku ściany oznaczonej jako MSL-Z1-1 skrępowanej betonem lekkim w trakcie pomiarów w pierwszej kolejności nastąpiło rozszerzenie i wydłużenie baz pomiarowych modelu badawczego po jednoczesnym kurczeniu się muru. W trakcie obserwacji modelu badawczego przez okres prawie 340 godzin nie zaobserwowano odkształceń muru większych od początkowego stanu, co oznacza, że mur nie został skrępowany. Ponadto w wyniku pęcznienia betonu doszło do uniesienia (ukośnego rozciągania), a w konsekwencji zarysowania fragmentu muru.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

W przypadku muru skrępowanego elementami z betonu zwykłego również doszło do początkowego rozszerzenia muru, jednak po upływie około 8 h nastąpiło odwrócenie procesu i ściany uległy skróceniu uzyskując odkształcenia skurczowe na poziomie $\varepsilon = 0,067$ mm/m potwierdzając tym samym powstanie skrępowania ściany.

7.3. Badania zasadnicze

Założenia i program badań zasadniczych

W ramach badań zasadniczych zaplanowano i wykonano badania 26 modeli ścian w skali naturalnej. Ściany wzniesiono z tych samych materiałów co w badaniach wstępnych. Badania polegały na porównaniu zachowania się skrępowanych i nieskrępowanych murów pod obciążeniem ściskającym. Ściany wykonano wariantowo jako modele bez otworu i modeli z otworem, w wersjach z niewypełnionymi (Z1) oraz wypełnionymi (Z2) zaprawą murarską do cienkich spoin spoinami czołowymi (pionowymi). Wykonano tzw. świadki, czyli modele nieskrępowane bez otworu i z otworem, oraz odpowiadające świadkom modele skrępowane w różnych wariantach wypełnienia spoin czołowych. Do wykonania rdzeni i rygli użyto betonu zwykłego oraz betonu lekkiego. Skrępowanie wykonano jako obwodowe oraz w odpowiedzi na zalecenia normy PN- EN 1996-1-1 [N18] o krępowaniu otworów o powierzchni co najmniej $1,5 \text{ m}^2$ z dodatkowymi elementami krępującymi przy otworze.

W badaniach modeli ze skrępowaniem z betonu zwykłego okazało się, że wpływ wypełnienia spoin pionowych nie jest istotny. Dlatego w modelach skrępowanych betonem lekkim wykonano jedynie ściany bez wypełnienia spoin pionowych. Wszystkie modele były tych samych wymiarów: długości 4,43 m, wysokości 2,65 m i grubości 0,18 m. Zaplanowano i wykonano badania 10 ścian bez otworu oraz 16 ścian z otworem. Wykonano 8 murów nieskrępowanych (4 wersje bez otworu oraz 4 wersje z otworem), 12 ścian skrępowanych obwodowo (8 skrępowanych betonem zwykłym i 4 ściany skrępowane betonem lekkim) oraz 6 ścian skrępowanych obwodowo z dodatkowymi rdzeniami przy otworach (4 skrępowane betonem zwykłym i 2 betonem lekkim). Wypełnienie spoin pionowych uzyskano przez nałożenie zaprawy murarskiej do cienkich spoin na boczne strefy powierzchni czołowych bloczków, z pominięciem zamka utworzonego przez pióro i wpust. Badane mury w ramach badań zasadniczych zestawiono w Tablica 7.3.1. Wpływ wypełnienia spoin opisano w pracach [84] i [85].



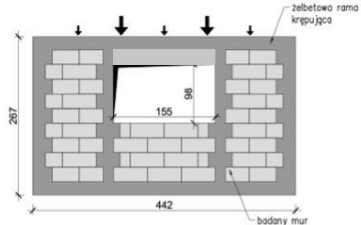
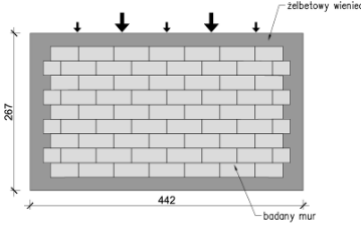
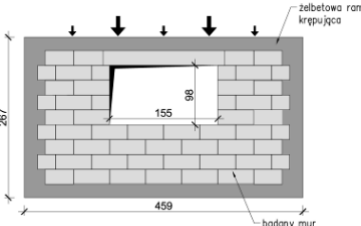
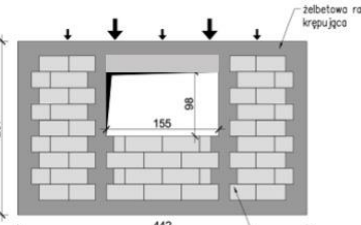
Tablica 7.3.1. Program badań zasadniczych ścian skrępowanych ściskanych

Nazwa serii	Skrępowanie	Rodzaj wypełnienia spoiny czołowej	Liczba modeli [szt.]
MNS-Z1, MNS-Z2 	Brak	I	2
		II	2
MNSO-Z1, MNSO-Z2 	Brak	I	2
		II	2
MS-Z1, MS-Z2 	Wzdłuż obwodu beton zwykły	I	2
		II	2
MSO-Z1, MSO-Z2 	Wzdłuż obwodu beton zwykły	I	2
		II	2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 7.3.1. cd. Program badań zasadniczych ścian skrępowanych ściskanych

Nazwa serii	Skrępowanie	Rodzaj wypełnienia spoiny czołowej	Liczba modeli [szt.]
M2SO-Z1, M2SO-Z2 	Wzdłuż obwodu i przy otworze beton zwykły	I	2
		II	2
MSL-Z1-1, MSL-Z1-2 	Wzdłuż obwodu beton lekki	I	2
MSLO-Z1-1, MSLO-Z1-2 	Wzdłuż obwodu beton lekki	I	2
M2SLO-Z1-1, M2SLO-Z1-2 	Wzdłuż obwodu i przy otworze beton lekki	I	2
Razem			26

Dla prostej identyfikacji modele oznaczono symbolem literowo-liczbowym, powiązany z ich opisem. Mury nieskrępowane oznaczano symbolem **MNS**, a mury skrępowane symbolem **MS**. Mury nieskrępowane z otworem oznaczano symbolem **MNSO**, a mury skrępowane z otworem symbolem **MSO**. Mury skrępowane z otworem i z 2 dodatkowymi wewnętrznymi elementami



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

krępującymi przy otworze oznaczano symbolem **M2SO**. Mur pełny (bez otworu) skrępowany betonem lekkim oznaczono jako **MSL**, mury skrępowane betonem lekkim z otworem symbolem **MSLO**, a mury skrępowane betonem lekkim z otworem i z 2 dodatkowymi wewnętrznymi elementami krępującymi przy otworze oznaczano symbolem **M2SLO**. W oznaczeniu serii występuje dodatkowo oznaczenie techniki wykonania spoin czołowych (**Z1** – mur bez wypełnienia spoin czołowych zaprawą oraz **Z2** – mur z wypełnionymi zaprawą spoinami czołowymi) oraz numer modelu w danej serii.

Modele badawcze

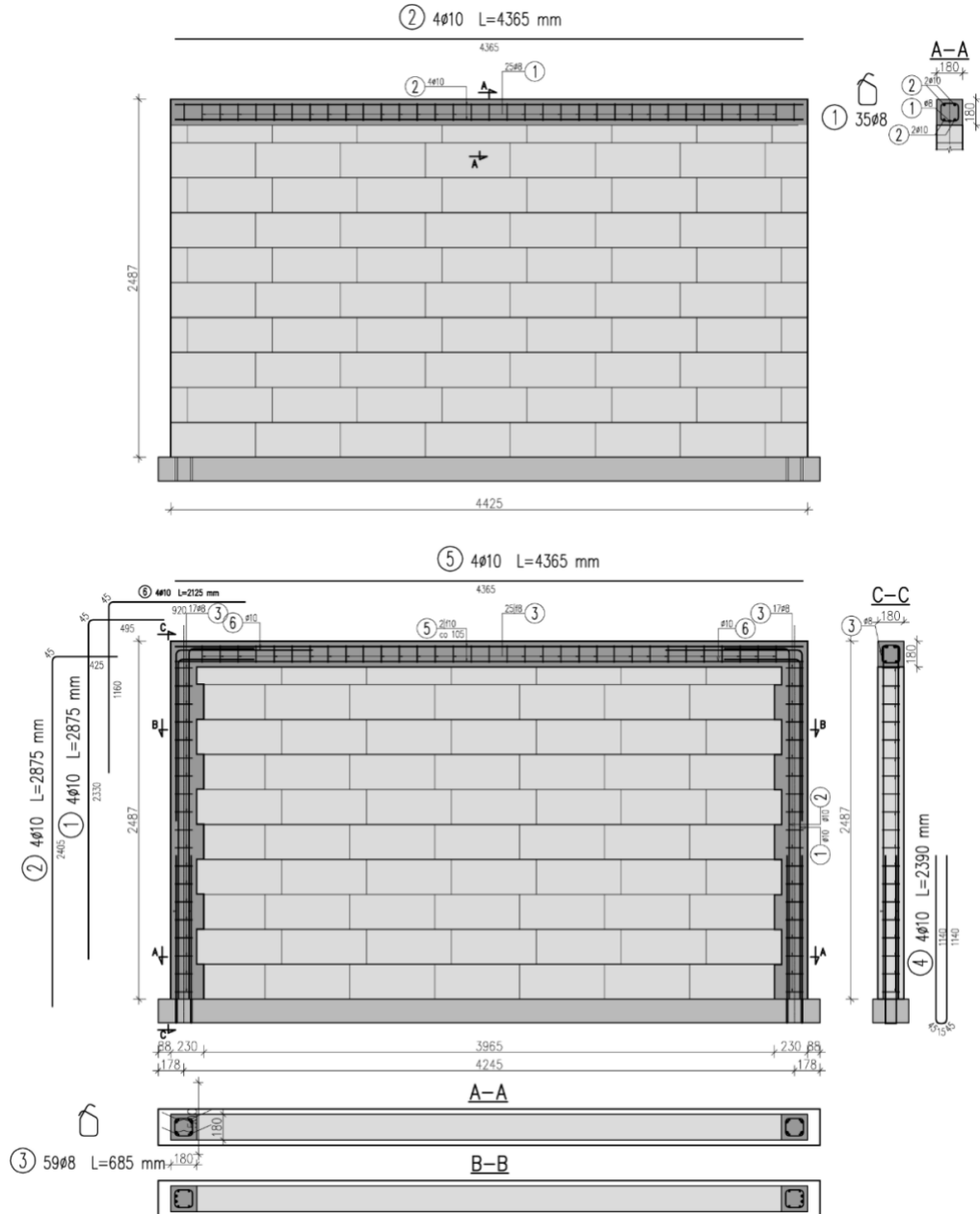
Długość wszystkich modeli wynosiła 4,43 m, wysokość 2,49 m, a grubość 0,18 m. Modele wzniesiono na prefabrykowanej żelbetowej belce podwalinowej z otworami do przepuszczenia zbrojenia startowego rdzeni żelbetowych. Nieskrępowane modele badawcze zwieńczono żelbetowym wieńcem zbrojonym 4 prętami $\phi 10$ mm i strzemionami $\phi 8$ (stali gatunku BSt500S i klasy A-IIIN). Beton wieńca miał klasę C20/25. Wieńce wykonano jako elementy prefabrykowane i ułożono je na modelach na warstwie zaprawy. W modelach skrępowanych rdzenie i rygiel wykonano jako monolityczne.

Zbrojenie rygla i rdzeni oraz klasa betonu były takie same jak w wieńcu w modelach nieskrępowanych – cztery pręty podłużne o średnicy 10 mm ze stali gatunku BSt500S i klasy A-IIIN oraz zbrojenie poprzeczne z prętów o średnicy 8 mm z tej samej stali. Otulina zbrojenia wynosiła 25 mm. Na Rys. 7.3.1 i Rys. 7.3.2 pokazano zbrojenie elementów betonowych wszystkich modeli.

W ścianach z otworem zastosowano typowe prefabrykowane nadproża z betonu komórkowego, zbrojone dołem trzema, a góra dwoma prętami średnicy 8 mm i strzemionami otwartymi średnicy 8 mm (stal wszystkich prętów gatunku St3S-b-500, klasy A-IIIN). W przypadku modeli z dodatkowymi rdzeniami wewnętrznymi zastosowanie tych nadproży wymagało rozkucia ich stref przypodporowych (Rys. 7.3.3), w celu odpowiedniego zakotwienia zbrojenia nadproża w pionowym rdzeniu.



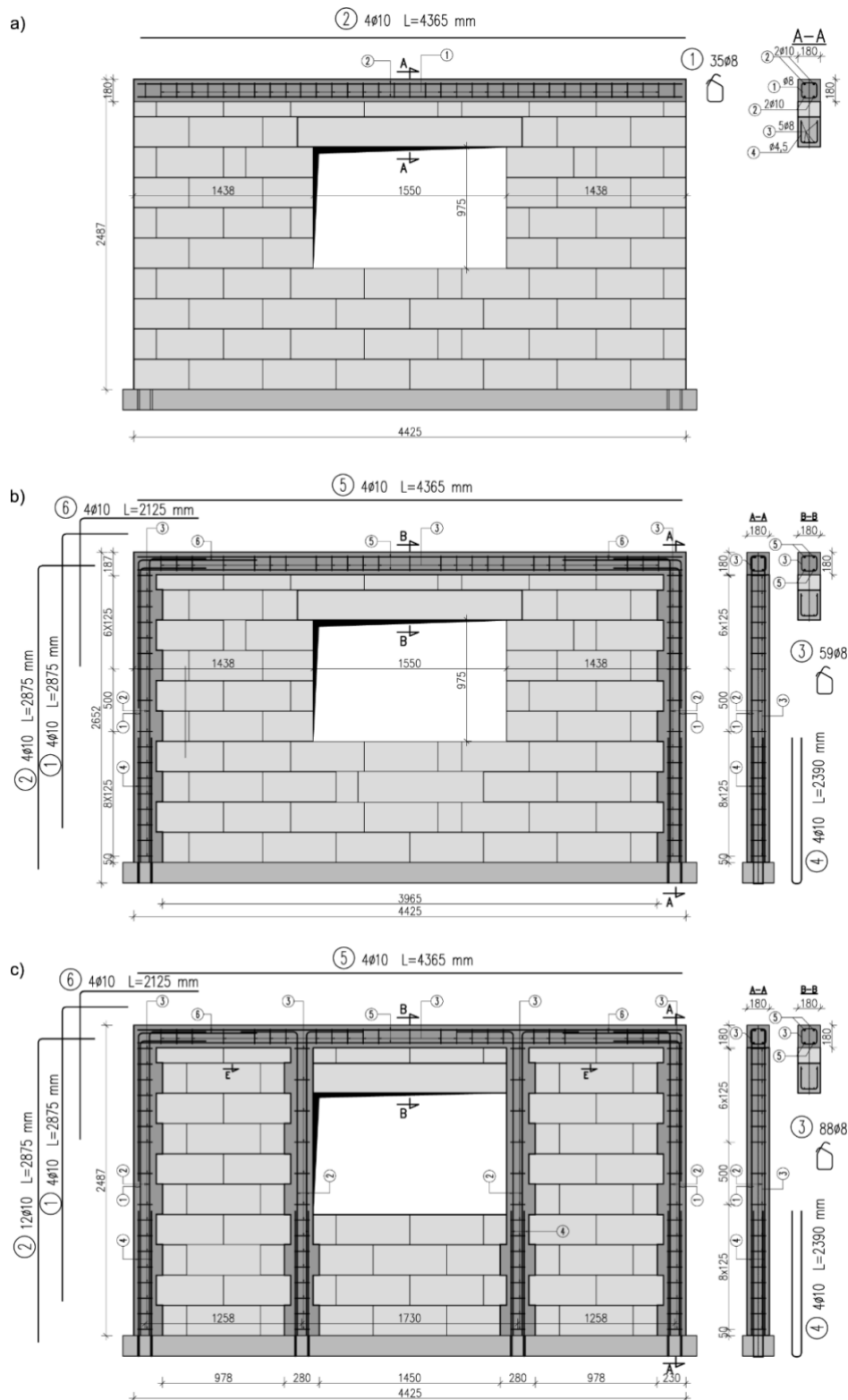
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.1 Widok modeli badawczych bez otworu: a) model bez skrępowania, b) model skrępowany obwodowo



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.2 Widok modeli badawczych z otworem: a) model bez skrępowania, b) model skrępowany obwodowo, c) model skrępowany obwodowo z dodatkowymi rdzeniami przy otworze



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.3 Widok nadproży z usuniętym betonem w strefie przypodporowej do zastosowania w modelach z dodatkowym skrępowaniem wokół otworu

Wykonanie wszystkich modeli skrępowanych realizowano, podobnie jak w badaniach wstępnych, w czterech etapach:

- **Etap I** polegał na osadzeniu w uprzednio wywierconych w dolnym ryglu prętów starterów i uzupełnieniu powstałych między prętami a betonem szczelin zaprawą cementową (c:p 1:1) Rys. 7.2.2.
- W **etapie II** między osadzonymi prętami starterami wzniesiono murowaną ścianę z pozostawieniem strzępi - Rys. 7.2.3.
- W **etapie III** pionowe rdzenie zazbrojono, zaszalowano i zabetonowano do wysokości około 1,5 m - Rys. 7.3.4. W ścianach z dodatkowym skrępowaniem przy otworze w etapie III betonowano rdzenie aż do poziomu ponad nadproże.
- W **etapie IV** w niezabetonowanych górnych fragmentach rdzeni uzupełniono strzemiona i wykonano podłużne zbrojenie rygli górnych. W narożach ścian uciąglono zbrojenie stosując wygięte pod kątem prostym pręty - Rys. 7.2.5. Górne fragmenty rdzeni (za wyjątkiem fragmentów pionowych rdzeni biegnących wzdłuż otworu okiennego w elementach serii M2SO) oraz rygle zaszalowano i zabetonowano – Rys. 7.3.5. Po 28 dniach elementy rozszalowano i przygotowano do badań.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Schemat etapów wznoszenia ścian skrępowanych bez otworu pokazano na Rys. 7.2.6, natomiast schematy wznoszenia ścian skrępowanych z otworem pokazano na Rys. 7.3.6 – z pojedynczym skrępowaniem i na Rys. 7.3.7 – z dodatkowym skrępowaniem przy otworze.



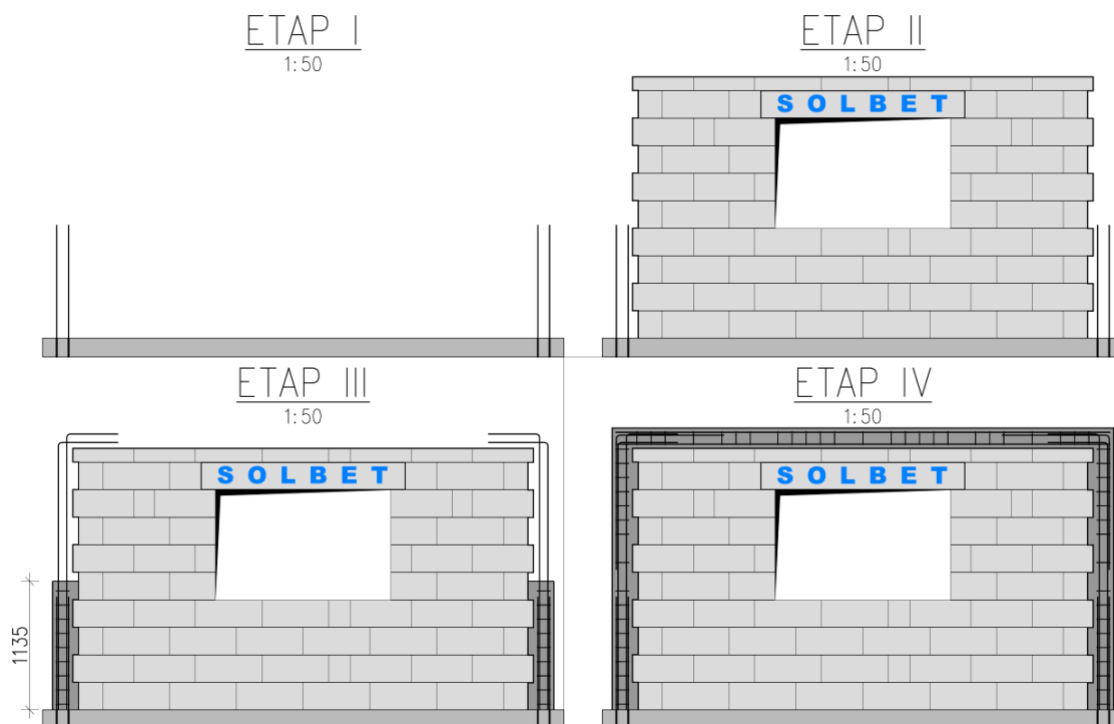
Rys. 7.3.4 Etap III – Częściowo zabetonowane rdzenie



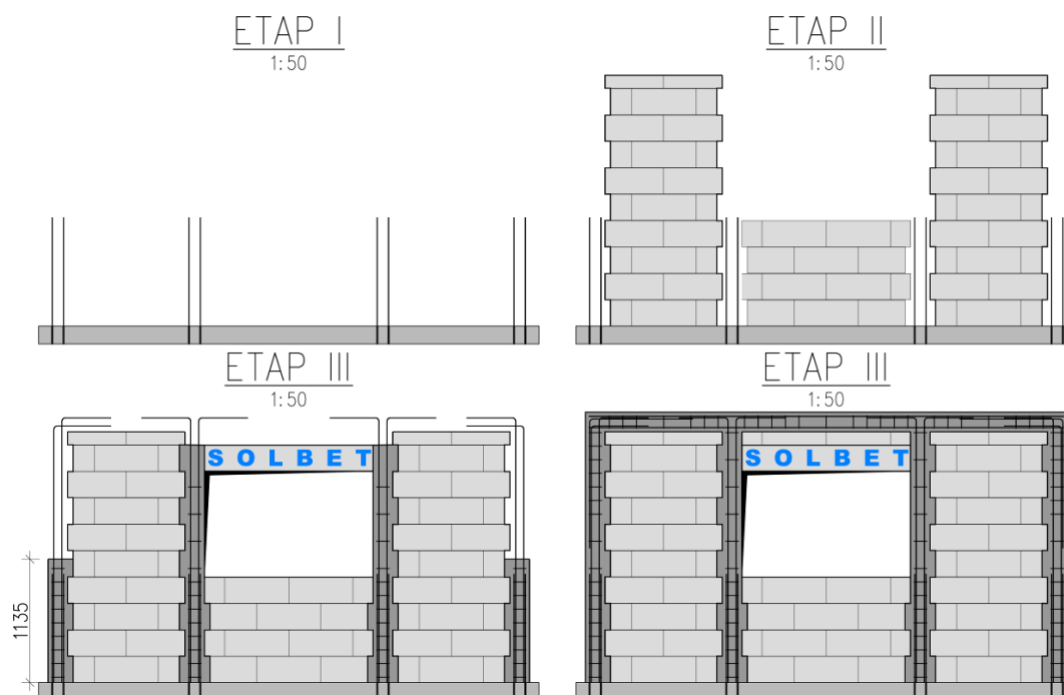
Rys. 7.3.5 Etap IV – wykonane modele serii MS-Z2 i M2SO-Z2 (etapy I, II oraz część etapu IV przedstawiono na Rys. 7.2.2, Rys. 7.2.3, Rys. 7.2.4)



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.6 Etapy wykonywania modeli skrępowanych z otworem MSO



Rys. 7.3.7 Etapy wykonywania modeli M2SO



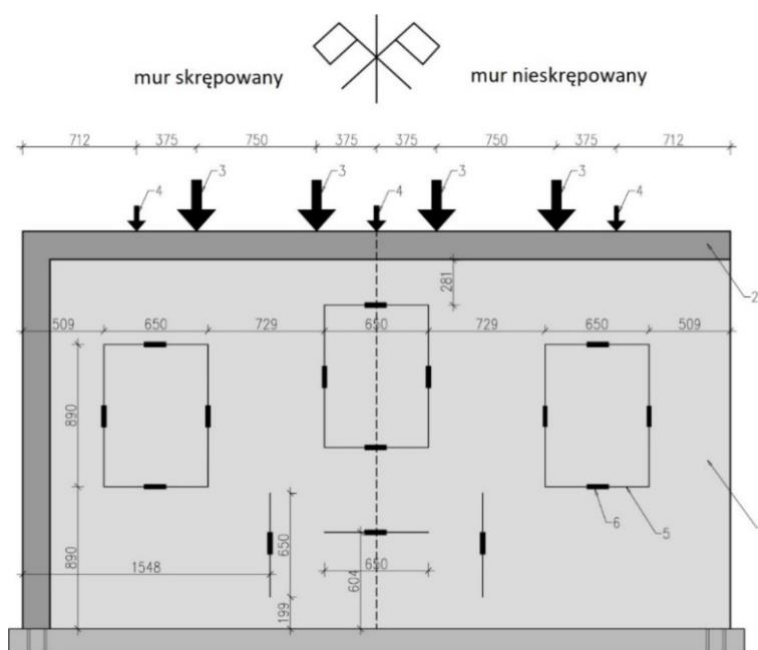
Stanowisko do badań i technika badań

Modele (Rys. 7.3.8, Rys. 7.3.9) obciążano osiowo za pomocą dwóch siłowników o zakresie 1000 kN, mocowanych do dwóch stalowych ram zamocowanych w Płyce Wielkich Sił w rozstawie co 2,25 m, symetrycznie (Rys. 7.3.10). Obciążenie z siłowników rozkładano na dwie siły skupione za pomocą stalowych belek trawersowych (Rys. 7.3.11). Płyta Wielkich Sił w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej zaopatrzona jest w otwory średnicy 80 mm w rozstawie co 75 cm, w kierunku podłużnym i poprzecznym. Otwory te służą do mocowania ram oraz do przyłożenia sił, więc wykorzystano te możliwości do przygotowania stanowiska badawczego. Przez otwory były przepuszczone cięgna zamocowane do siłowników tłokowych zamocowanych od spodu Płyty Wielkich Sił, więc modele obciążano dodatkowo przy pomocy układu cięgnowego. Siłowniki te mają zakres 25 kN, w zawiązku z tym na jedną parę przypadało obciążenie około 50 kN, zwiększone nieznacznie o ciężar stalowego trawersu, które ważyły około 2,3 kN. W poziomie żelbetowego wieńca model obciążany był 4 siłami z belek trawersowych, które obciążano siłownikami mocowanymi do ram (Rys. 7.3.11, Rys. 7.3.12b) oraz trzema układami cięgnowymi (Rys. 7.3.12a), które obciążano poprzez siłowniki tłokowe, mocowane od spodu płyty wielkich sił (Rys. 7.3.12c). Siłowniki tłokowe przekazywały obciążenie na stalowe cięgna, które poprzez belki trawersowe obciążały model.

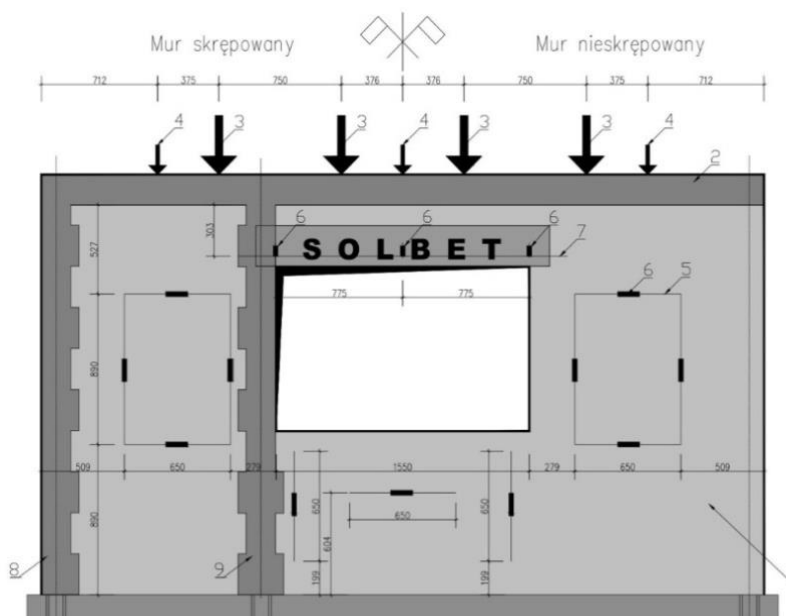
Obciążenia przykładano najpierw z siłowników tłokowych równomiernie, aż do wyczerpania ich zakresu (uzyskania obciążenia 50 kN). Następnie obciążenie przykładano z siłowników o zakresie 1000 kN zamocowanych do stalowych ram, również równomiernie, aż do zniszczenia. Obciążenie przykładano w sposób monotoniczny, zwiększając ciśnienie w siłownikach przy pomocy automatycznych pomp.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



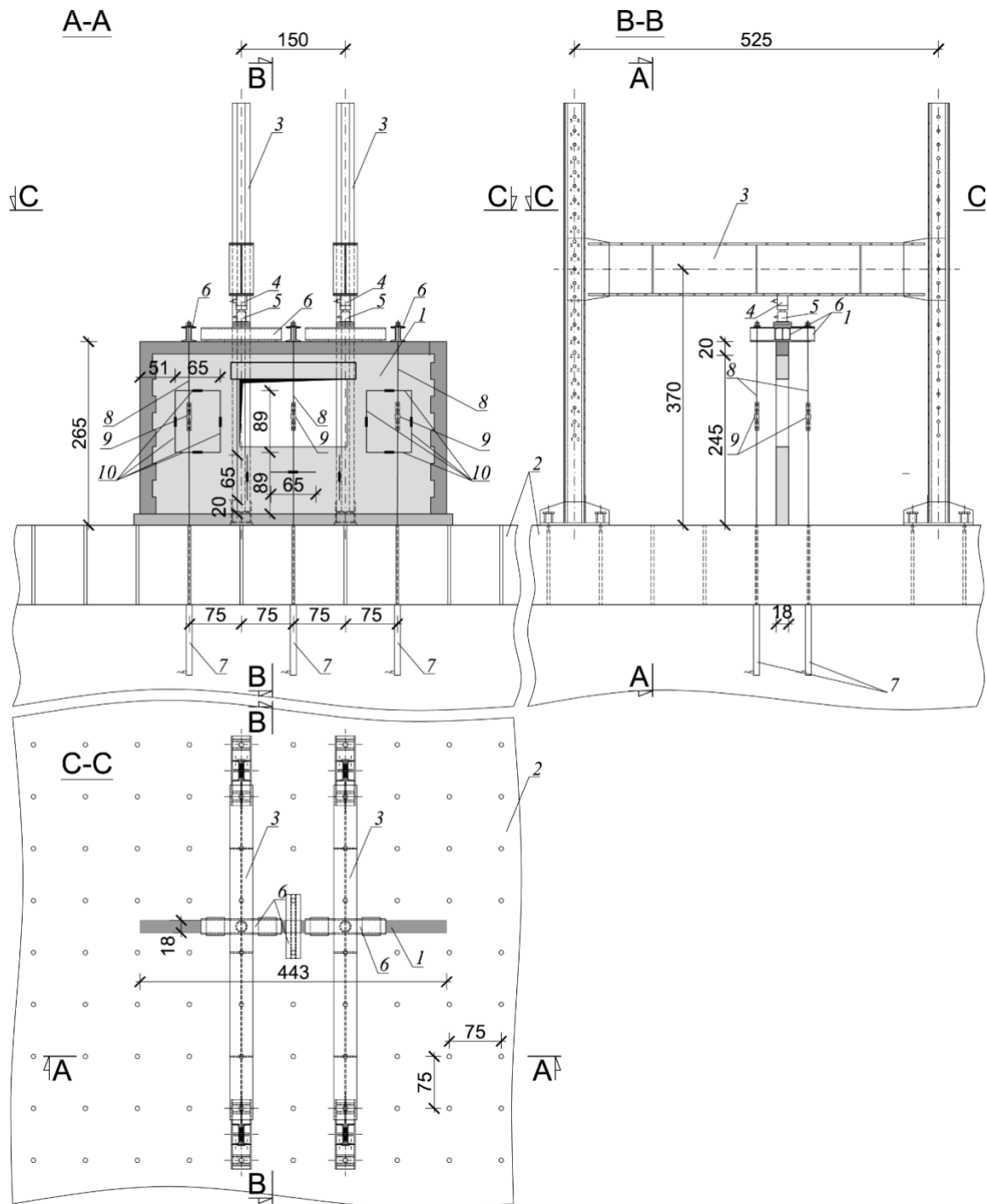
Rys. 7.3.8 Stanowisko badawcze muru bez skrępowania i skrępowanego (dla modelu bez otworu): 1 – model badawczy, 2 – wieniec (skrępowanie), 3 – obciążenie z ramy stalowej, 4 – obciążenie z siłowników tłokowych, 5 – ramka do pomiaru przemieszczeń, 6 – czujnik indukcyjny



Rys. 7.3.9 Stanowisko badawcze muru bez skrępowania i skrępowanego (dla modelu z otworem): 1 – model badawczy, 2 – wieniec (skrępowanie), 3 – obciążenie z ramy stalowej, 4 – obciążenie z siłowników tłokowych, 5 – ramka do pomiaru przemieszczeń, 6 – czujnik indukcyjny 7 – kształtownik do pomiaru przemieszczeń 8 – skrępowanie trzpieniem na skraju, 9 – skrępowanie trzpieniem przy otworze



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.10 Stanowisko do badań murów w skali naturalnej: 1 – model badawczy, 2 – płyta wielkich sił, 3 – rama stalowa, 4 – siłownik, 5 – siłomierz bębnowy, 6 – trawers, 7 – siłownik tłokowy, 8 – ciągnio, 9 – siłomierz, 10 – baza pomiaru przemieszczeń



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.11 Belka trawersowa oraz siłownik i siłomierz przymocowane do ramy

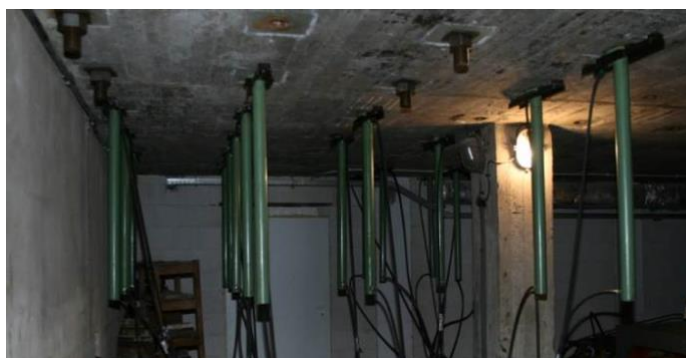
a)



b)



c)

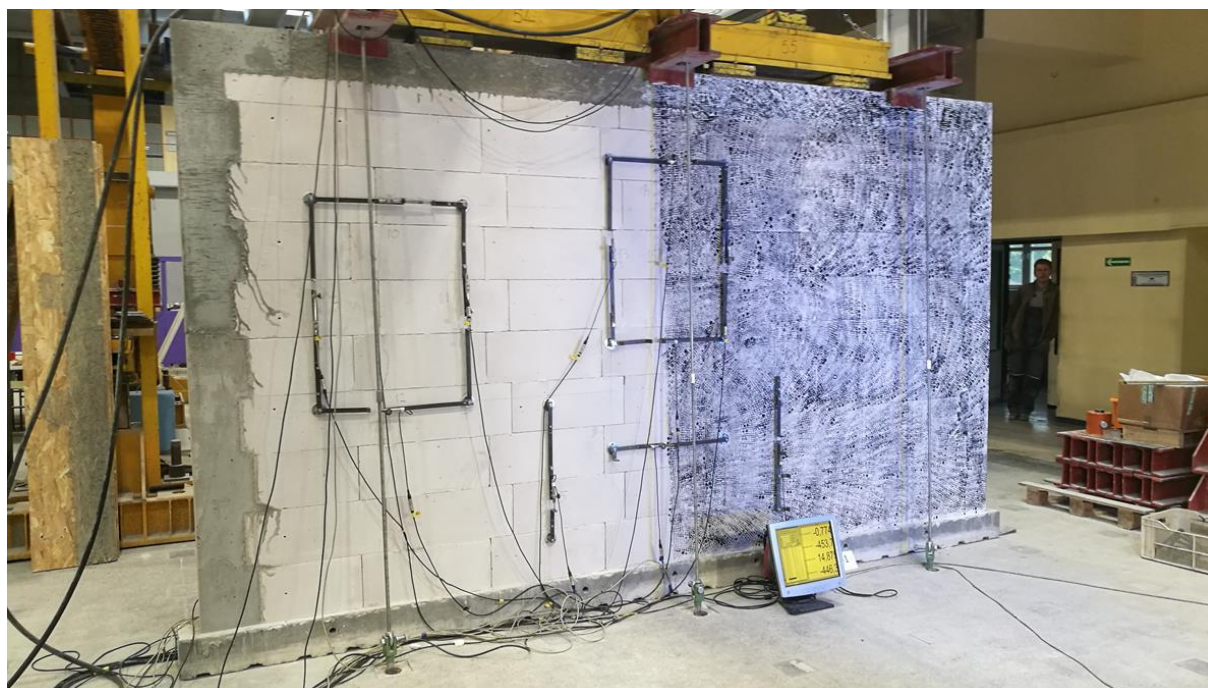


Rys. 7.3.12 Szczegóły układu przekazywania obciążenia: a) mocowanie siłomierza naciąganych, b) stalowy trawers ułożony na wieńcu i mocowanie cięgien, c) siłowniki tłokowe mocowane od spodu płyty wielkich sił



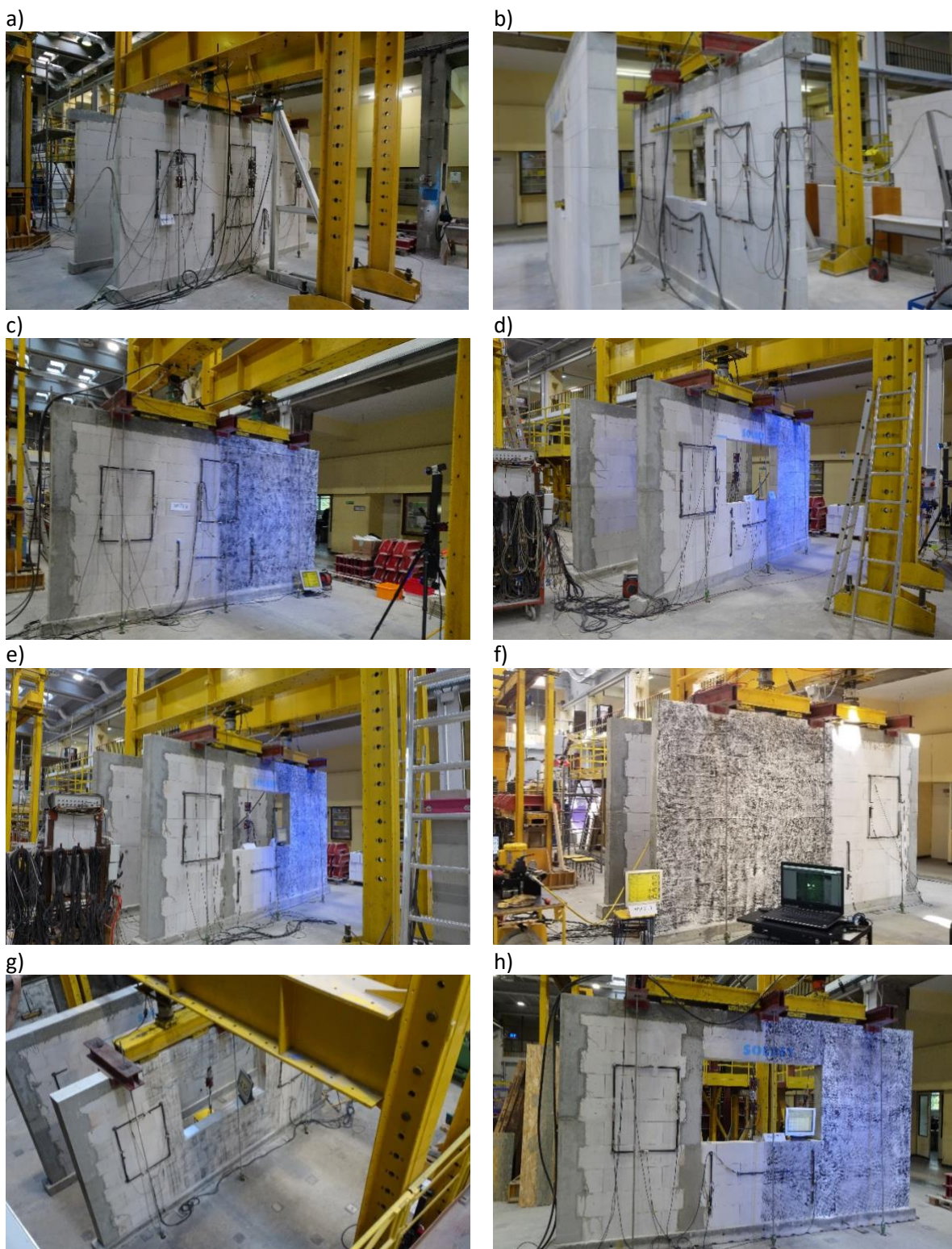
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Podczas badań rejestrowano siły w siłomierzach zabudowanych pod ramami i naciągach oraz przemieszczenia wzdłuż baz pomiarowych pokazanych na Rys. 7.3.8, Rys. 7.3.9, Rys. 7.3.10. W modelach bez otworu zapis przemieszczeń rejestrowano przy użyciu 30 (15 po każdej stronie ściany) indukcyjnych transformatorowych przetworników przemieszczeń liniowych (LVDT – Linear Variable Differential Transformer) o dokładności 0,02 mm. W modelach z otworem rejestrację przemieszczeń wykonywano przy użyciu 28 (14 po każdej stronie ściany) indukcyjnych przetworników przemieszczeń liniowych (LVDT) o dokładności 0,02 mm. W niektórych modelach, oprócz pomiarów przemieszczeń przetwornikami indukcyjnymi, prowadzono również bezdotkowy pomiar optyczny systemem cyfrowej korelacji obrazu Aramis. Wymagało to pomalowania powierzchni modelu w nieregularny „nakrapiany” wzór (Rys. 7.3.13). Wówczas na obszarze pomiaru optycznego nie montowano czujników LVDT.



Rys. 7.3.13 Po prawej stronie widoczny nieregularny „nakrapiany” wzór do prowadzenia bezdotkowego pomiaru optycznego systemem cyfrowej korelacji obrazu Aramis

Widok przykładowych modeli przed badaniem pokazano na Rys. 7.3.14. Ze względów logistycznych oraz optymalizacji wykonywania badań pod ramami ustawiano po dwa modele i badano jeden po drugim, po przebrojeniu modeli w aparaturę pomiarową.



Rys. 7.3.14 Widok modeli przed badaniem



Na Rys. 7.3.14 przedstawiono:

- a) modele nieskrępowane bez otworu MNS-Z1,
- b) modele nieskrępowane z otworem serii MNSO-Z1,
- c) model bez otworu skrępowany betonem zwykłym MS-Z2,
- d) modele z otworem skrępowane betonem zwykłym obwodowo serii MSO-Z1,
- e) modele skrępowane betonem zwykłym obwodowo i wewnątrz serii M2SO-Z2,
- f) modele bez otworu skrępowane betonem lekkim MSL-Z1,
- g) modele z otworem skrępowane betonem lekkim MSLO-Z1,
- h) modele skrępowane betonem lekkim obwodowo i wewnątrz serii M2SLO-Z2.

Wyniki badań ścian bez otworu z betonem zwykłym oraz lekkim

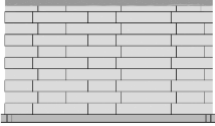
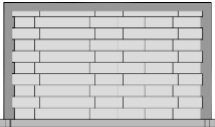
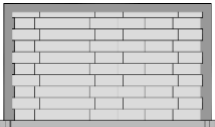
Tablica 7.3.2 przedstawia całkowite siły rysujące i niszczące modele bez otworu. Za siły całkowite uznano sumę obciążenia ze stalowych ram i układów ciągnowych, powiększoną o ciężar stalowych trawersów. Na Rys. 7.3.15 do Rys. 7.3.18 zamieszczono wykresy siła-odkształcenie, mierzone na ramkach pomiarowych usytuowanych środkowej części modeli. Podano uśrednione wyniki z 2 ramek w każdym modelu, po jednej z każdej strony modelu. Wartości odkształceń pionowych w każdym modelu przyjęto w oparciu o wskazania czterech czujników środkowych (oznaczonych na wykresach symbolem Y). Oddzielnie analizowano wartości odkształceń poziomych z czujników zabudowanych wyżej (oznaczone symbolem X1) oraz niżej (oznaczone symbolem X2).

By porównać modele pełne z modelami z otworem zamieszczono wykresy siła-odkształcenie, mierzone na ramkach pomiarowych usytuowanych w dolnej części modeli - Rys. 7.3.19.



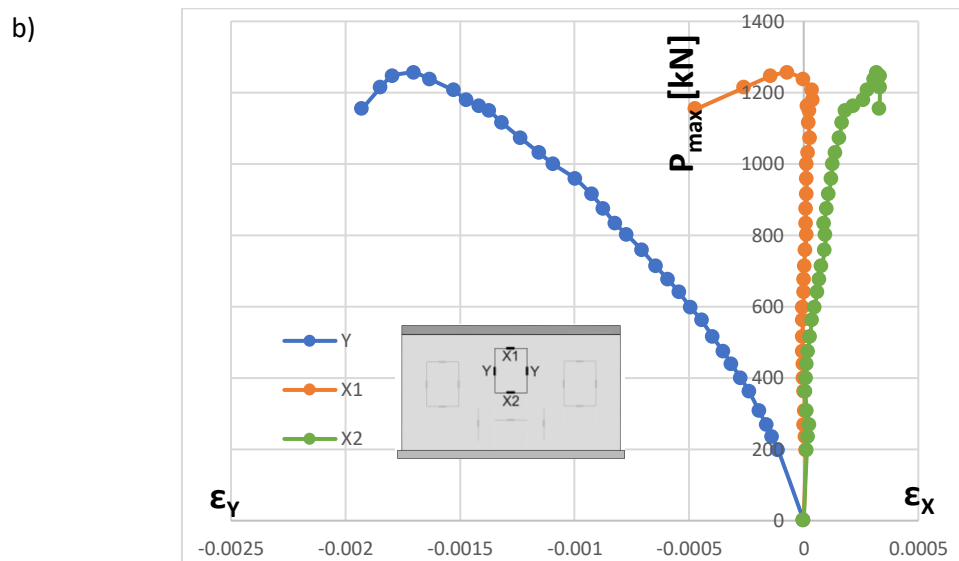
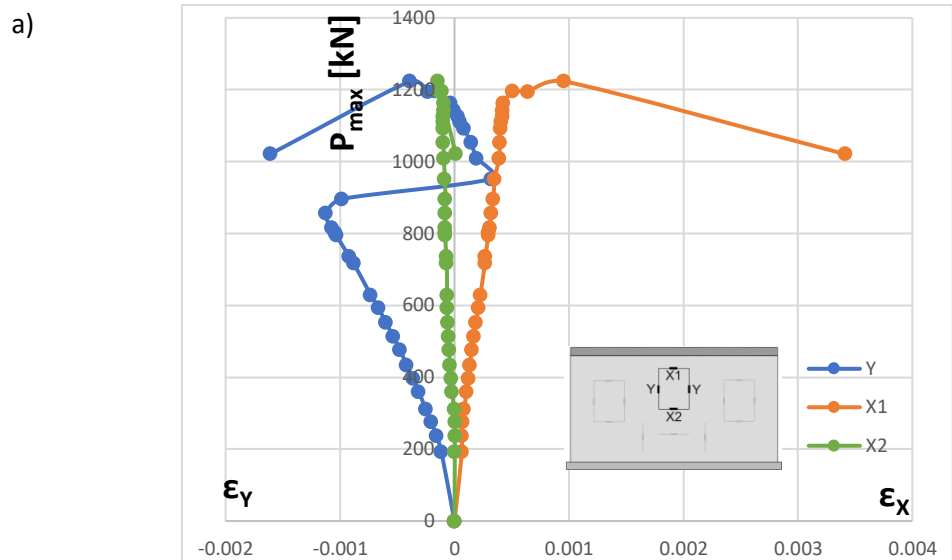
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 7.3.2. Wyniki badań murów bez otworu pod obciążeniem skupionym

Schemat	Oznaczenie serii opis serii	Symbol serii	Siła rysująca [kN]	Średnia siła rysująca [kN]	Siła niszcząca [kN]	Średnia siła niszcząca [kN]
	MNS-Z1 mur nieskrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MNS-Z1-1	475,6	474,7	1223,3	1239,2
		MNS-Z1-2	473,8		1255,2	
	MNS-Z2 mur nieskrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MNS-Z2-1	377,1	354,5	1334,7	1131,9
		MNS-Z2-2	332,0		929,2	
	MS-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MS-Z1-1	480,2	476,4	1656,9	1659,7
		MS-Z1-2	472,7		1662,6	
	MS-Z2 mur skrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MS-Z2-1	456,6	414,2	1600,1	1619,2
		MS-Z2-2	371,8		1638,4	
	MSL-Z1 mur skrępowany betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSL-Z1-1	361,5	322,5	1406,2	1262,6
		MSL-Z1-2	283,5		1118,9	



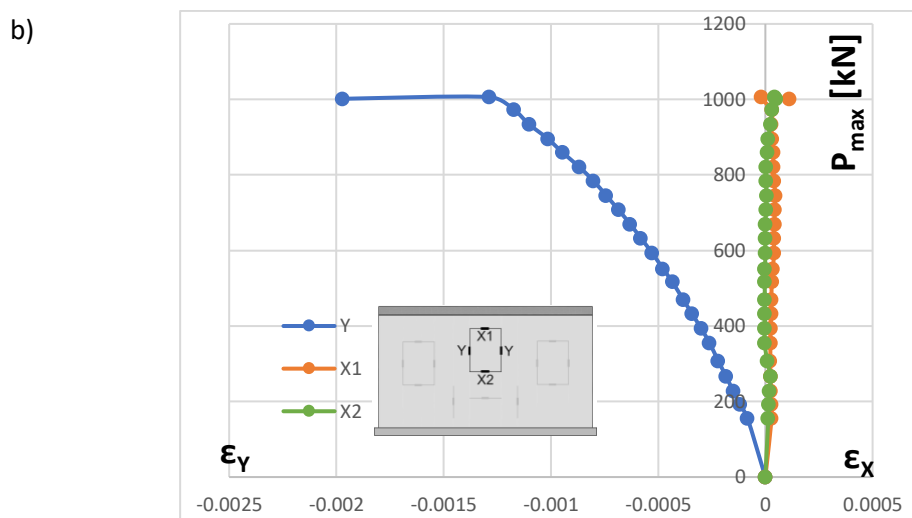
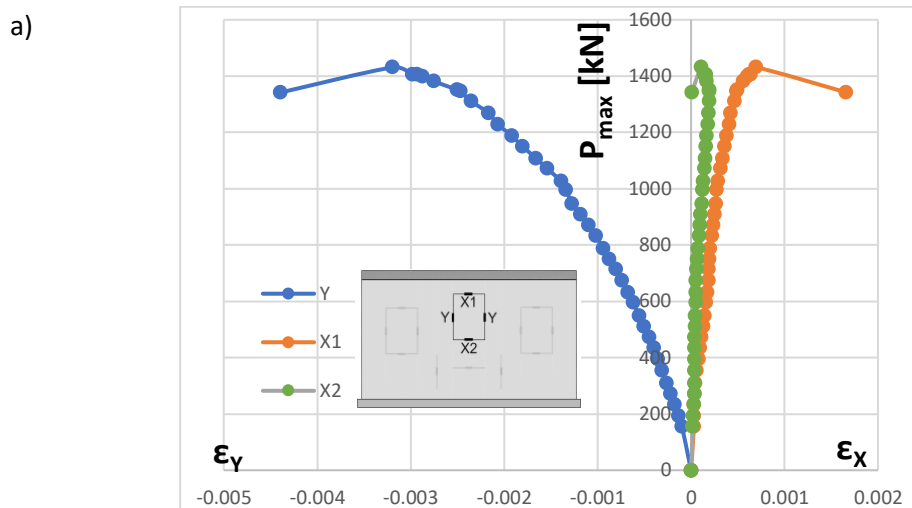
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.15 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli nieskrępowanych z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MNS-Z1-1, b) MNS-Z1-2



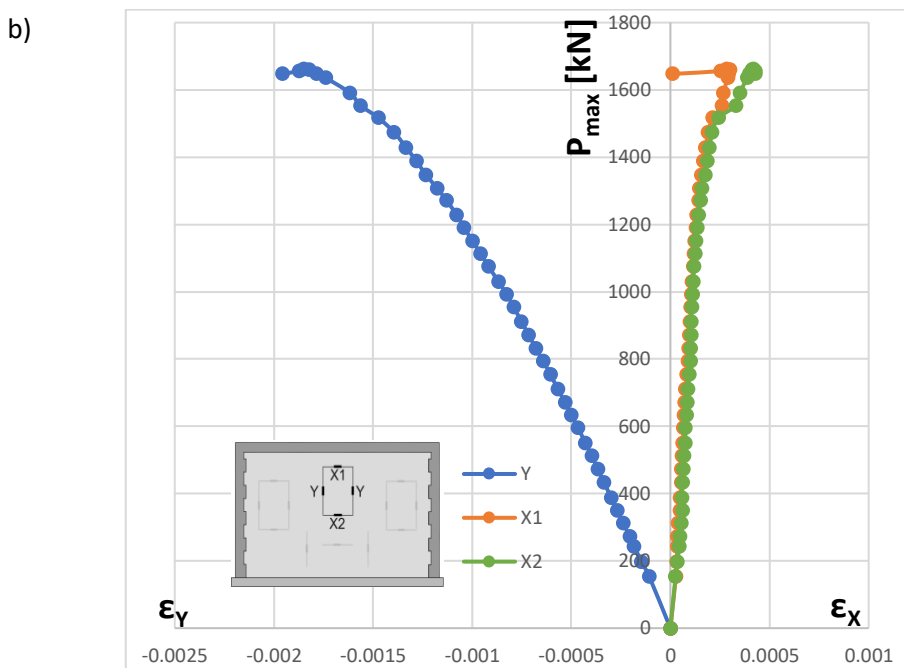
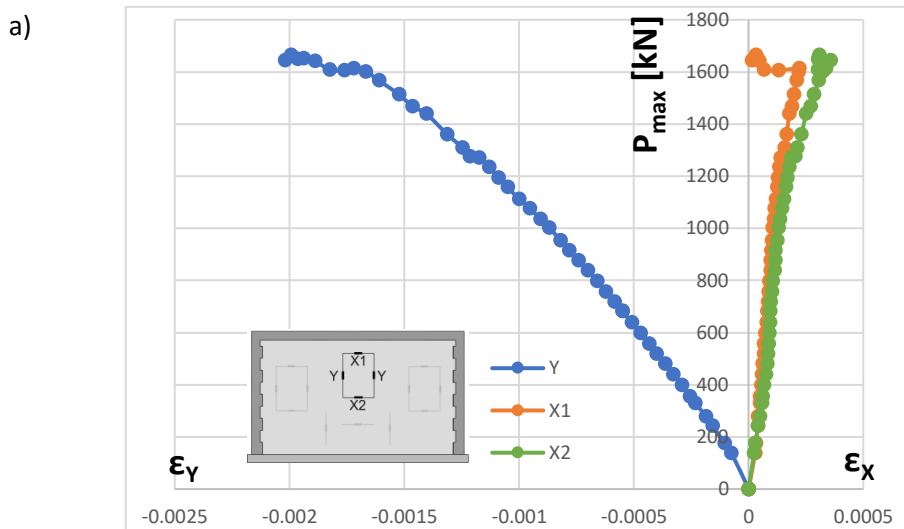
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.16 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań nieskrępowanych modeli z wypełnionymi spoinami czołowymi: a) MNS-Z2-1, b) MNS-Z2-2



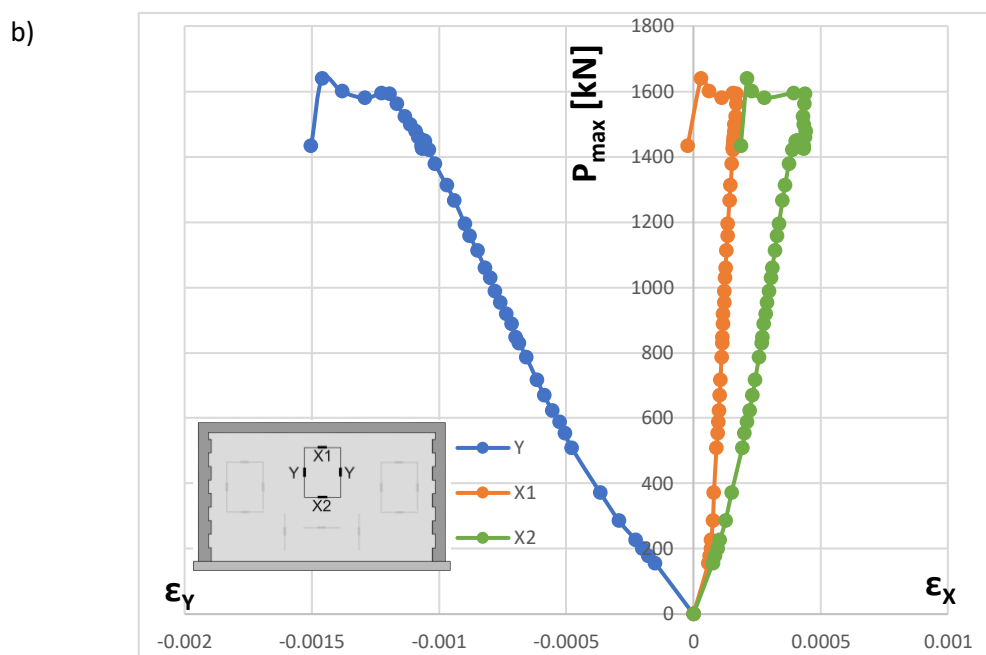
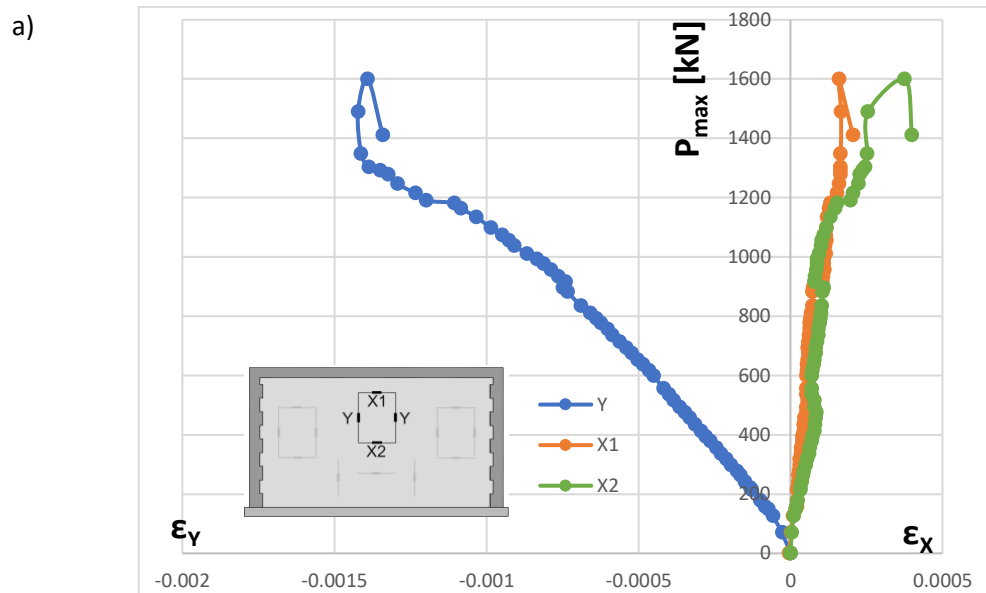
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.17 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MS-Z1-1, b) MS-Z1-2



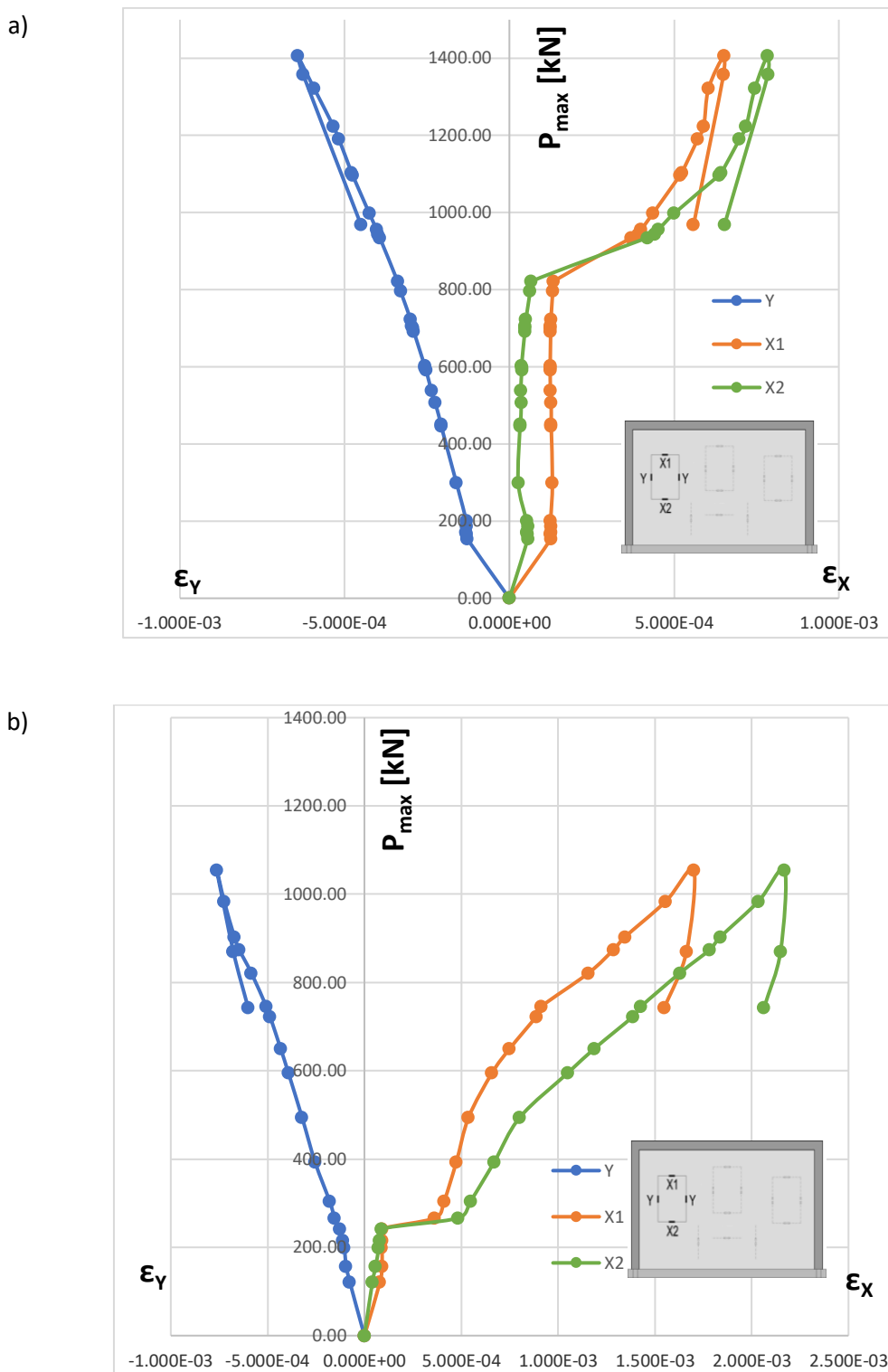
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.18 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań skrępowanych modeli z wypełnionymi spoinami czołowymi: a) MS-Z2-1, b) MS-Z2-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



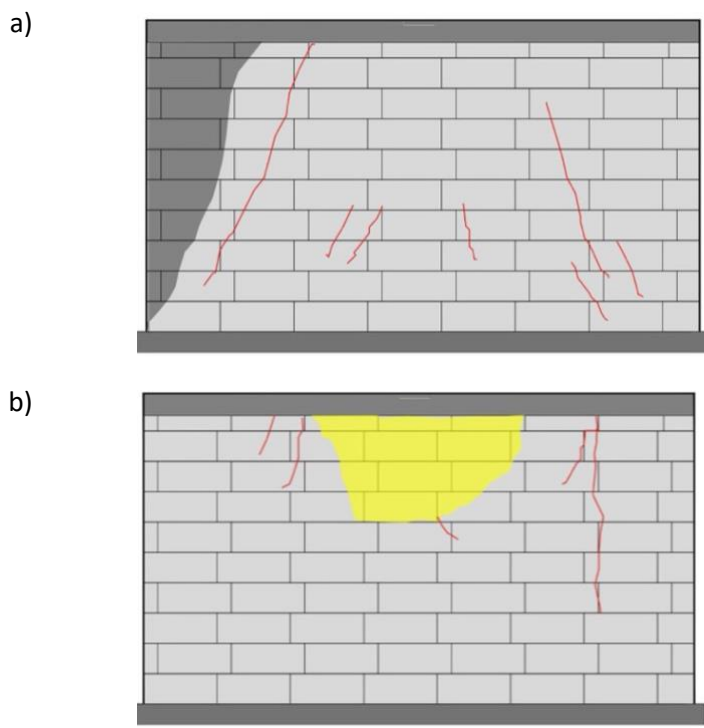
Rys. 7.3.19 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań skrępowanych modeli betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MSL-Z1-1, b) MSL-Z1-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

W badaniach wszystkich modeli bez otworu widać podobny przebieg prezentowanych zależności siła-odkształcenie ($P_y - \epsilon$). Warto odnotować, że w wykresy odkształceń poziomych w murach nieskrępowanych istotnie różnią się pomiarymi prowadzonymi w wyższych i niższych partiach muru. W murach skrępowanych różnice te nie są widoczne. W wypadku modeli nieskrępowanych z niewypełnionymi spoinami czołowymi (seria MNS-Z1) na dolnych czujnikach uzyskiwano nawet ściskania, a nie rozciągania.

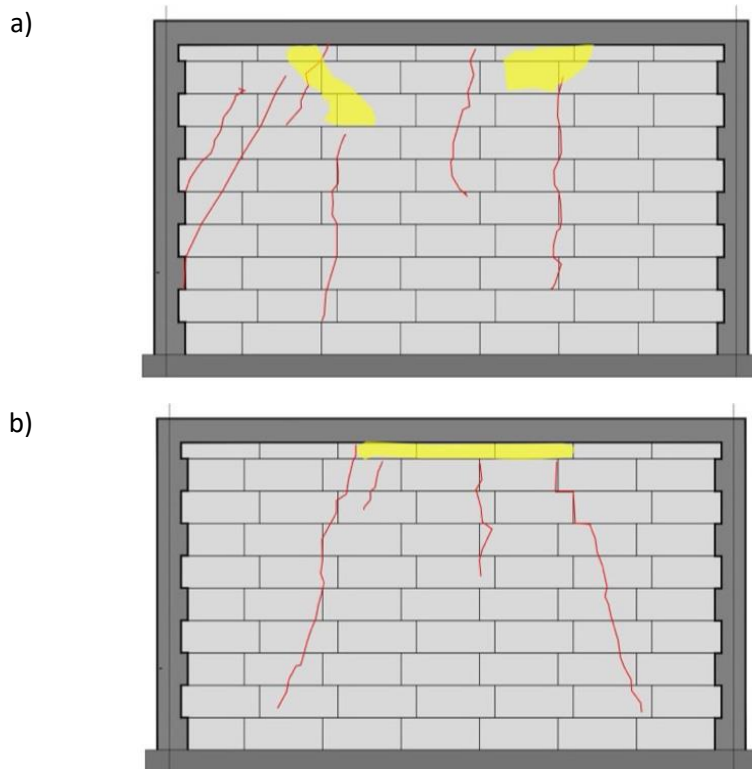
We wszystkich modelach zwieńczonych betonem zwykłym, zniszczenie było podobne i nastąpiło przez miażdżenie oraz odspojenie bocznych powierzchni elementów murowych, najczęściej zabudowanych bezpośrednio pod żelbetowym wieńcem. W modelach MNS-Z1-2 i MNS-Z2-1 powstały dodatkowo rysy ukośne biegnące od miejsca położenia siły z trawersu ramy do spodu modelu. Rysy ukośne występowały również w modelach skrępowanych, przy czym ich rozwarcie było znacznie mniejsze i nie przekraczało 0,5 mm. Natomiast w modelu skrępowanym betonem lekkim uszkodzeniu również uległ wieniec żelbetowy. Na Rys. 7.3.20 do Rys. 7.3.22 pokazano obrazy zniszczenia modeli bez otworu. Analizę murów skrępowanych opisano również w publikacji [25].



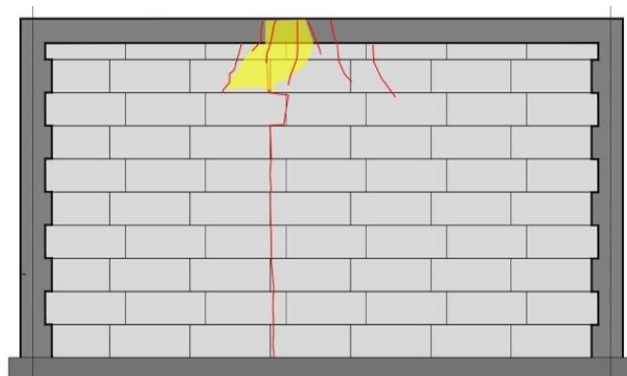
Rys. 7.3.20 Szkice uszkodzeń ścian bez skrępowania a) MNS-Z1, b) MNS-Z2 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania, kolorem żółtym zaznaczono powierzchnie odłupane, kolorem ciemnym szarym (poza elementami żelbetowymi) zaznaczono elementy odspojone



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.21 Szkice uszkodzeń ścian bez skrępowania a) MS-Z1, b) MS-Z2 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania, kolorem żółtym zaznaczono powierzchnie odspojone



Rys. 7.3.22 Szkic uszkodzeń ściany skrępowanej betonem lekkim (MSL-Z1) – liniami czerwonymi pokazano zarysowania, kolorem żółtym zaznaczono powierzchnie odspojone

Na Rys. 7.3.23 do Rys. 7.3.26 pokazano uszkodzenia murów bez wypełnionych spoin czołowych oraz z wypełnionymi spoinami czołowymi (we wszystkich przypadkach do zwieńczeń oraz do skrępowania zastosowano beton zwykły).



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrzepowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)

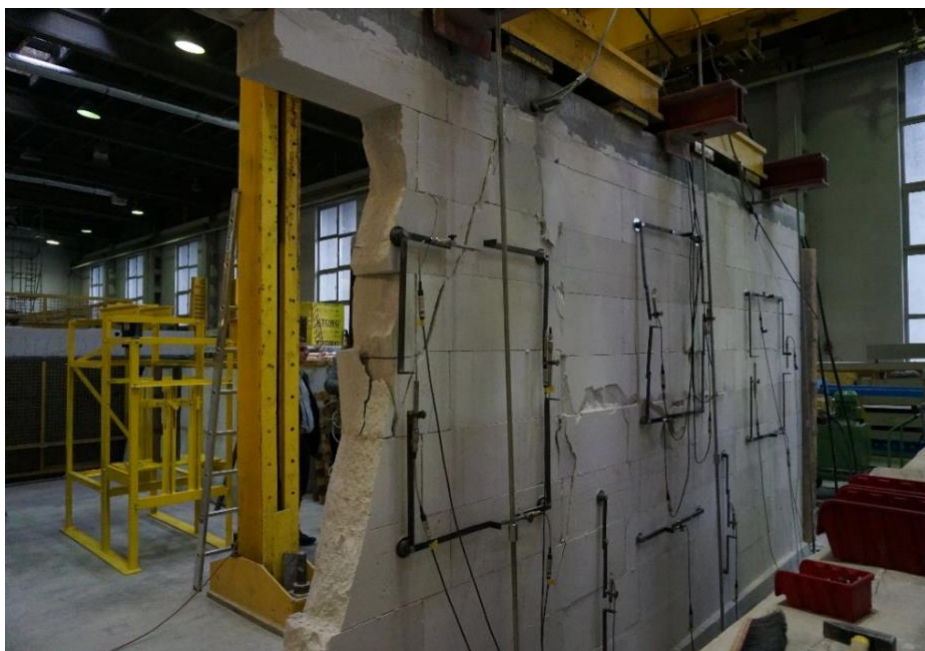


Rys. 7.3.23 Uszkodzenie modeli nieskrępowanych z niewypełnionymi spoinami pionowymi:
a) MNS-Z1-1, b) MNS-Z1-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrzepowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)

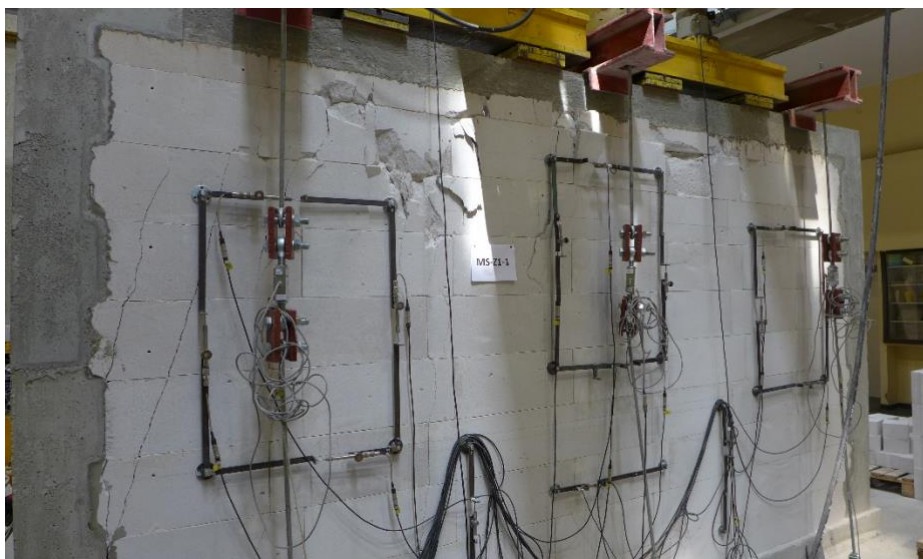


Rys. 7.3.24 Uszkodzenie modeli nieskrępowanych z wypełnionymi spoinami pionowymi:
a) MNS-Z2-1, b) MNS-Z2-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)



Rys. 7.3.25 Uszkodzenie modeli z skrępowanych niewypełnionymi spoinami pionowymi:
a) MS-Z1-1, b) MS-Z1-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)

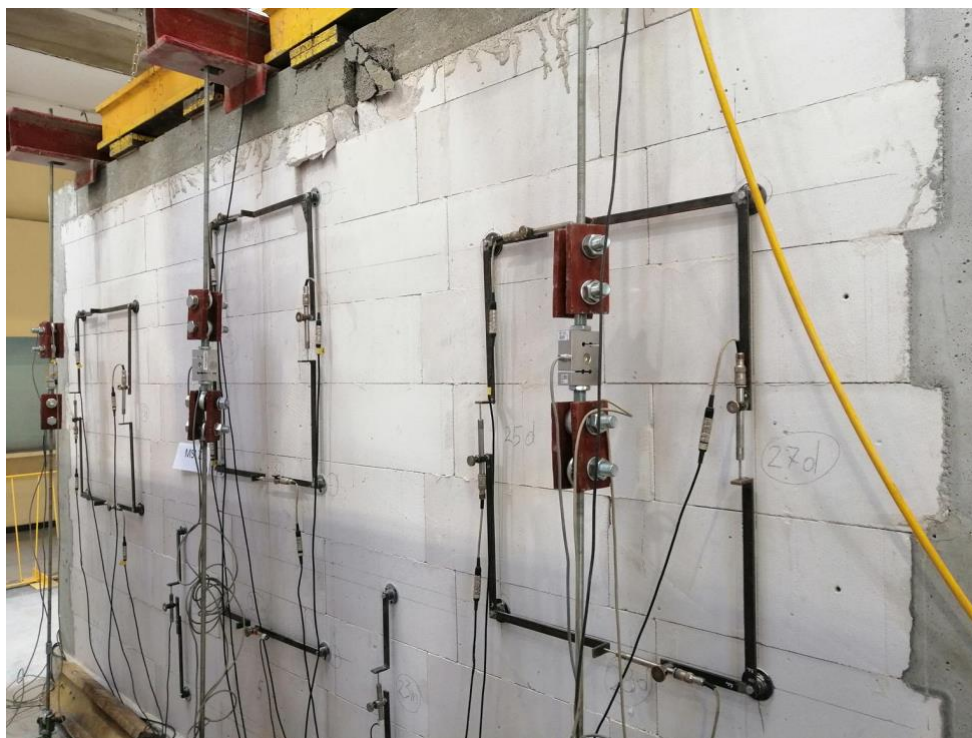


Rys. 7.3.26 Uszkodzenie modeli skrępowanych z wypełnionymi spoinami pionowymi:
a) MS-Z2-1, b) MS-Z2-2

Na Rys. 7.3.27 do Rys. 7.3.29 pokazano uszkodzenia muru skrępowanego betonem lekkim. Na Rys. 7.3.30 pokazano uszkodzenia zarejestrowane przez system Aramis – bezdotykowy pomiar optycznej korelacji cyfrowej.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.27 Uszkodzenia muru skrępowanego betonem lekkim



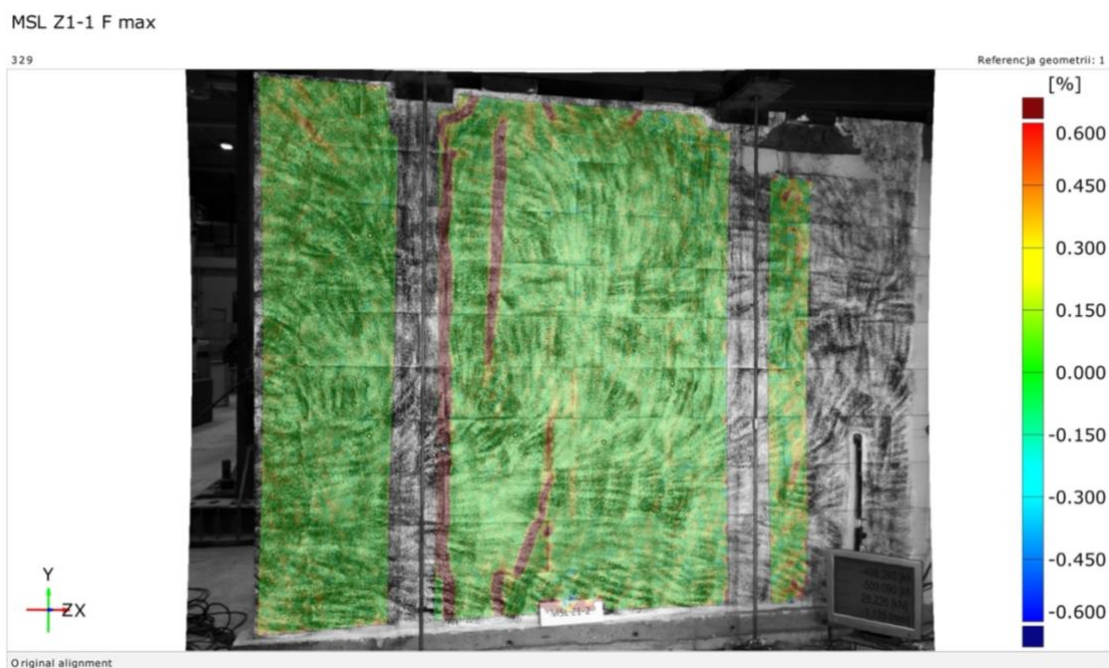
Rys. 7.3.28 Uszkodzenia muru skrępowanego betonem lekkim



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.29 Uszkodzenia muru skrępowanego betonem lekkim



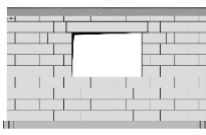
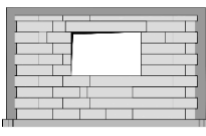
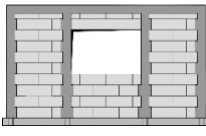
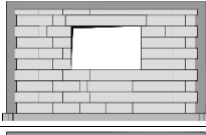
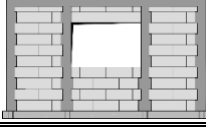
Rys. 7.3.30 Uszkodzenia muru (model MSL-Z1-2) skrępowanego betonem lekkim zarejestrowane przez system Aramis – bezdotkowy pomiar optycznej korelacji cyfrowej



Wyniki badań ścian z otworem

Tablica 7.3.3 przedstawia całkowite siły niszczące i oraz siły powodujące zarysowania o szerokości $> 0,05$ mm. Za siły całkowite uznano sumę obciążenia stalowych ram i układów ciągnowych, powiększone o ciężar stalowych trawersów, które ważyły 230 kg.

Tablica 7.3.3 Wyniki badań murów z otworem pod obciążeniem skupionym

Schemat	Oznaczenie serii opis serii	Symbol serii	Siła rysująca [kN]	Średnia siła rysująca [kN]	Siła niszcząca [kN]	Średnia siła niszcząca [kN]
	MNSO-Z1 mur nieskrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MNSO-Z1-1	160,4	180,2	444,7	447,8
		MNSO-Z1-2	200,0		451,2	
	MNSO-Z2 mur nieskrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MNSO-Z2-1	202,0	177,1	460,5	468,9
		MNSO-Z2-2	152,3		477,4	
	MSO-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z1-1	192,6	192,6	496,1	499,8
		MSO-Z1-2	192,5		503,4	
	MSO-Z2 mur skrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z2-1	180,1	167,6	478,4	475,3
		MSO-Z2-2	155,1		472,2	
	M2SO-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z1-1	270,6	287,3	591,0	580,3
		MSO-Z1-2	303,9		570,1	
	M2SO-Z2 mur skrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z2-1	259,2	277,2	614,3	607,1
		MSO-Z2-2	295,2		600,0	
	MSLO mur skrępowany betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSLO-Z1-1	110,7	109,1	284,7	284,5
		MSLO-Z1-2	107,5		284,2	
	M2SLO mur skrępowany betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi	M2SLO-Z1-1	115,6	151,9	253,0	303,5
		M2SLO-Z1-2	188,2		354,0	

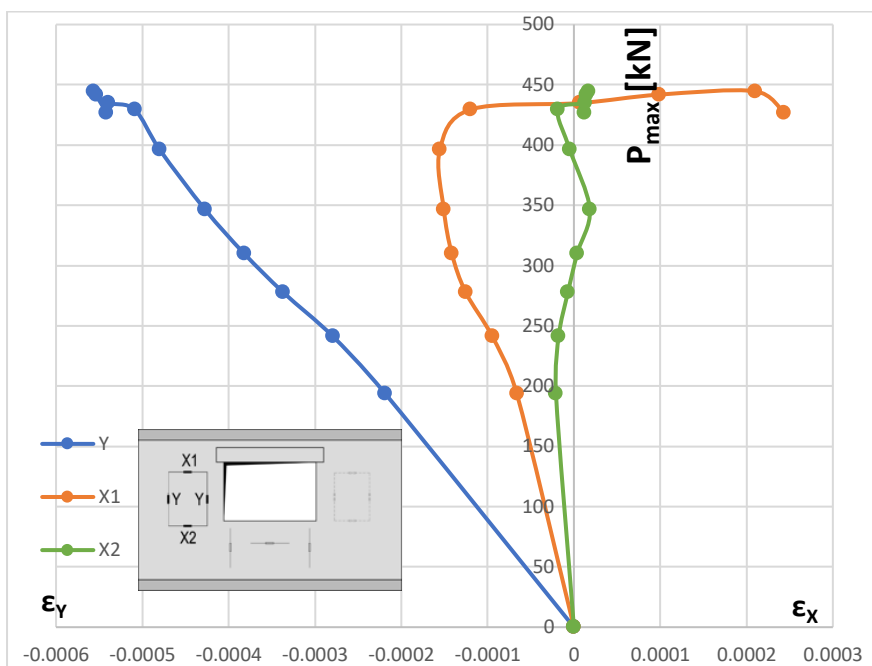
Na Rys. 7.3.31 do Rys. 7.3.39 zamieszczono wykresy siła–odkształcenie, mierzone na ramkach pomiarowych usytuowanych środkowej części modeli. Podano uśrednione wyniki z 2 baz pomiarowych w każdym modelu, po jednej z każdej strony modelu. Wartości odkształceń pionowych w każdym modelu przyjęto w oparciu o wskazania czterech czujników środkowych



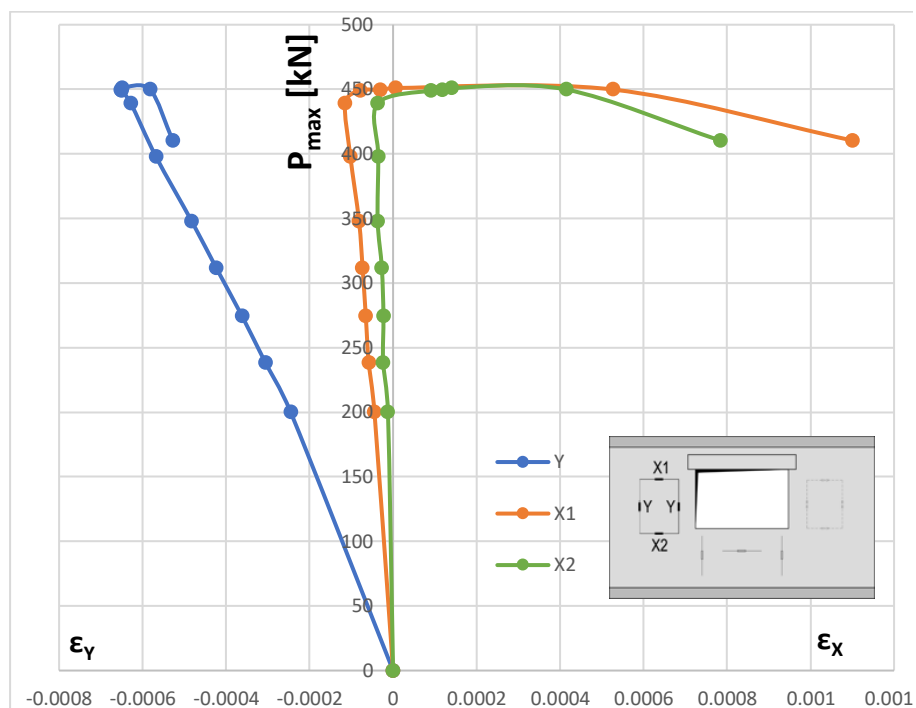
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

(oznaczonych na wykresach symbolem Y). Oddzielnie analizowano wartości odkształceń poziomych z czujników zabudowanych wyżej (oznaczone symbolem X1) oraz niżej (oznaczone symbolem X2).

a)



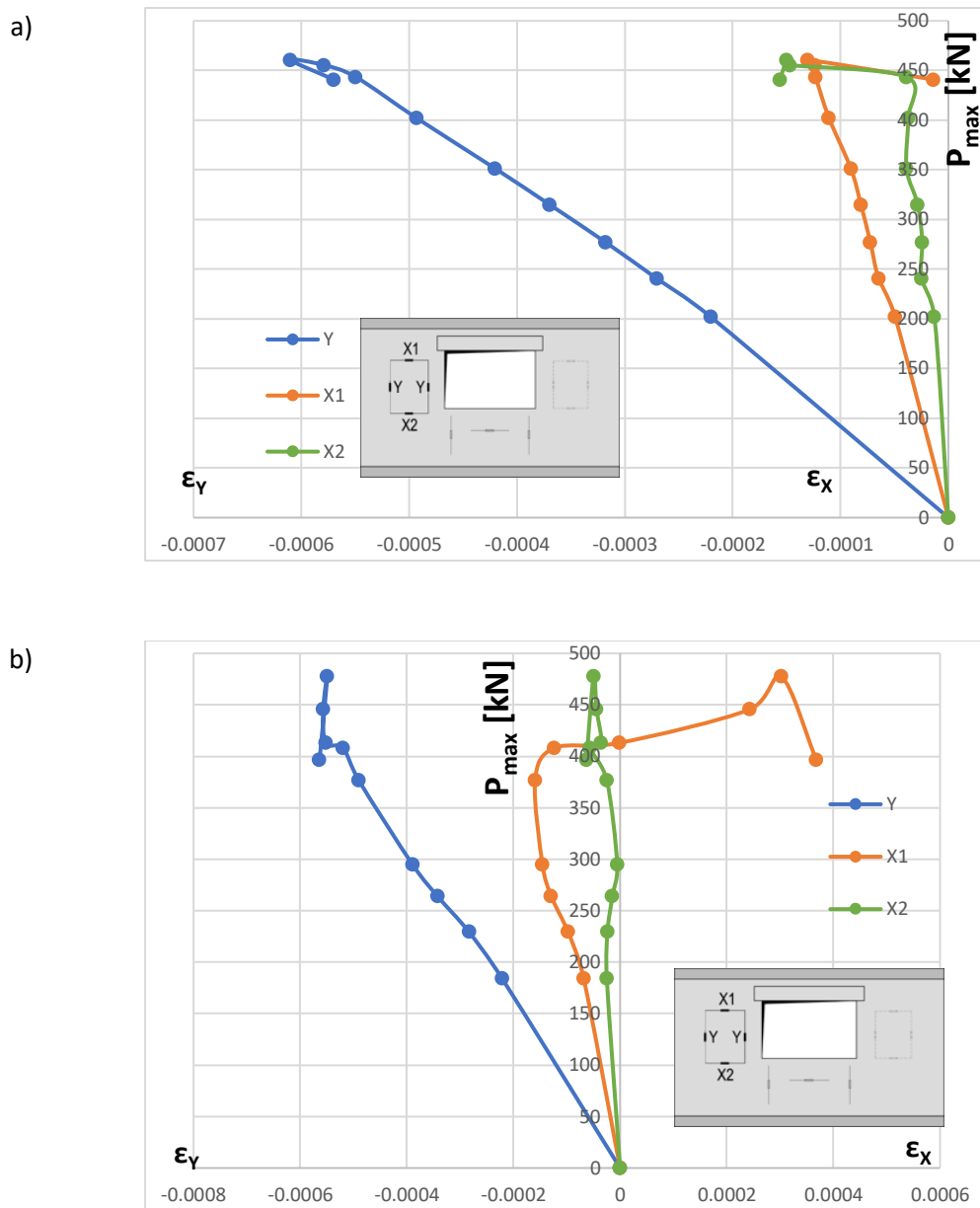
b)



Rys. 7.3.31 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli nieskrępowanych z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MNSO-Z1-1, b) MNSO-Z1-2



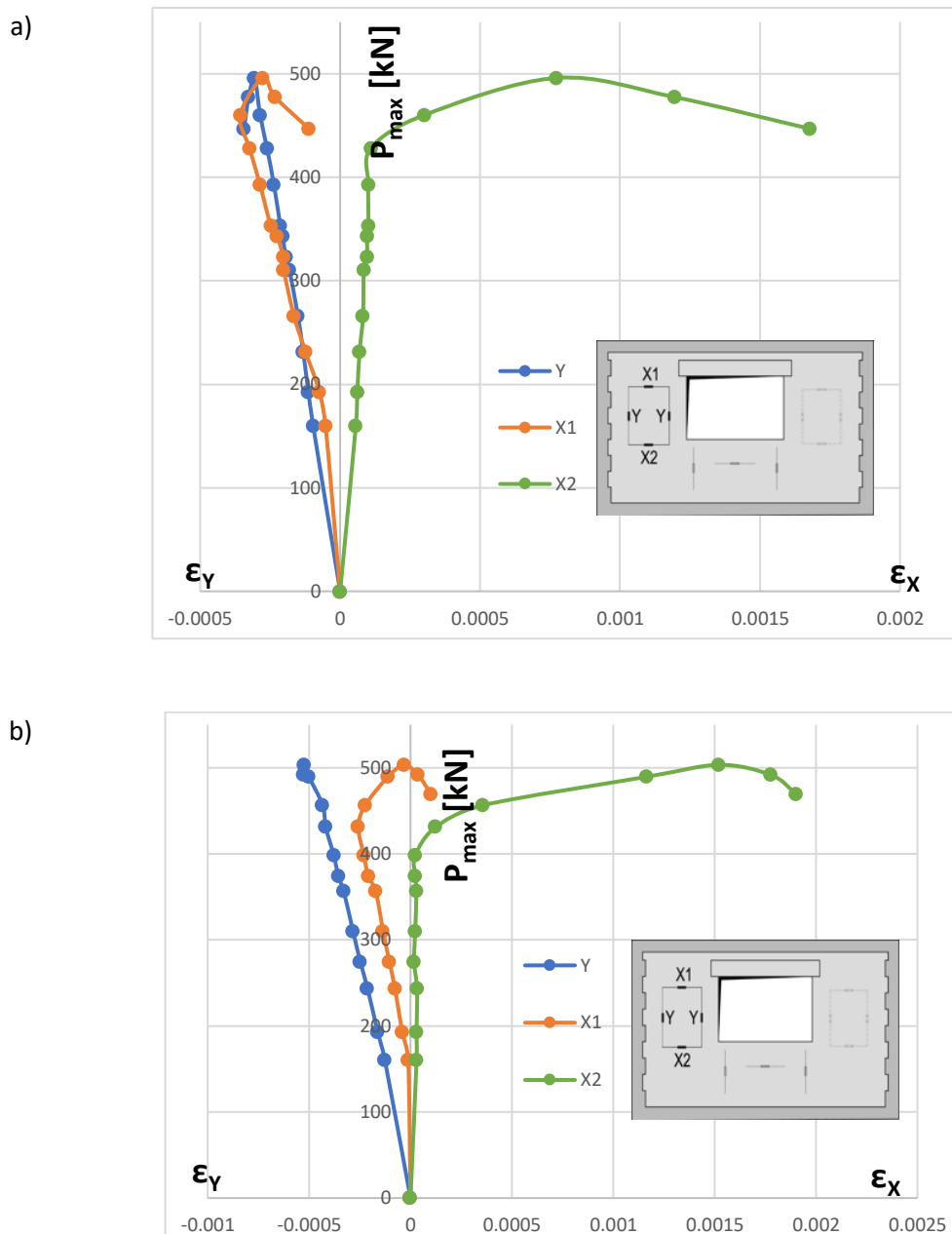
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.32 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli nieskrępowanych z wypełnionymi spoinami czołowymi: a) MNSO-Z2-1, b) MNSO-Z2-2



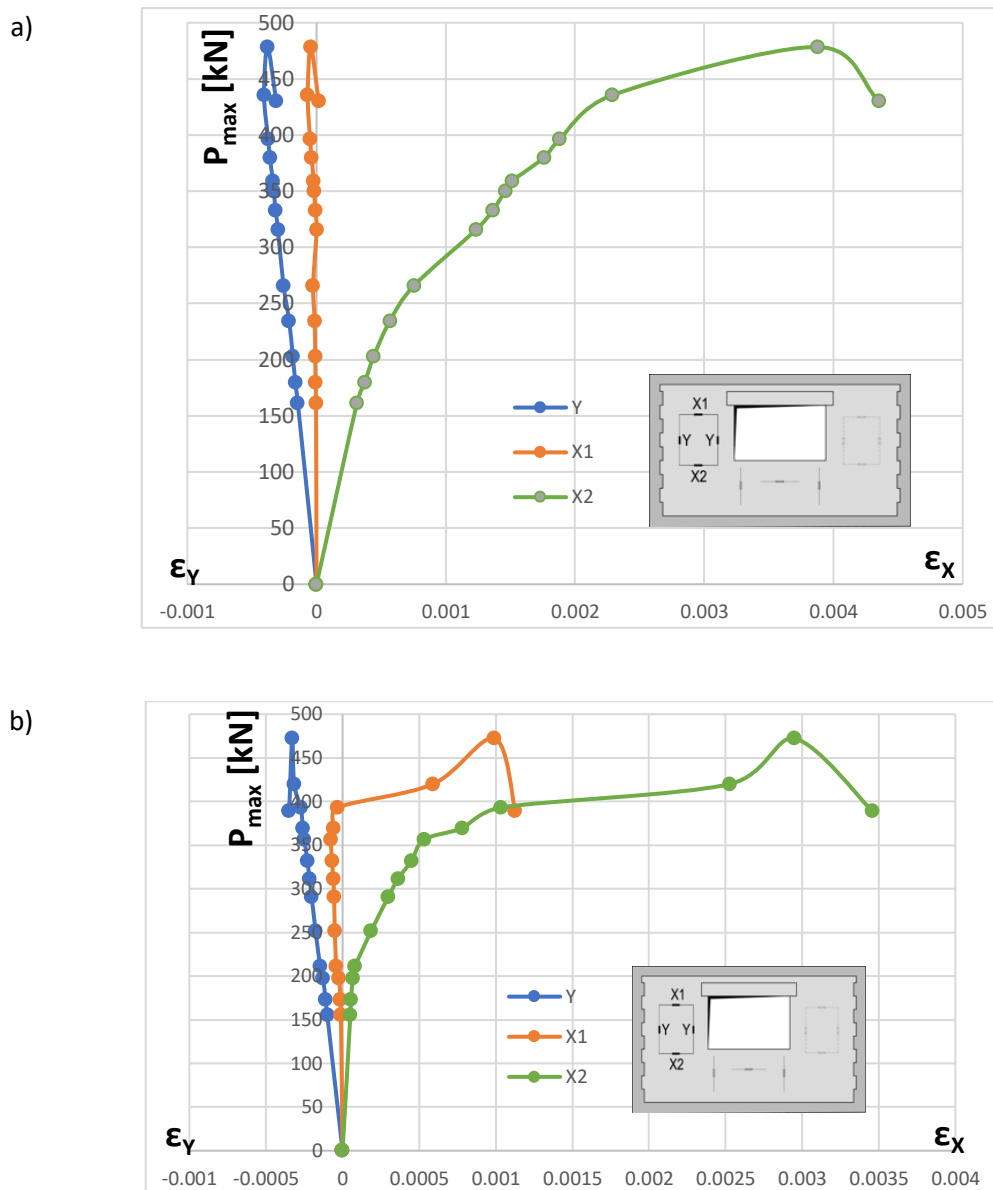
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.33 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MSO-Z1-1, b) MSO-Z1-2



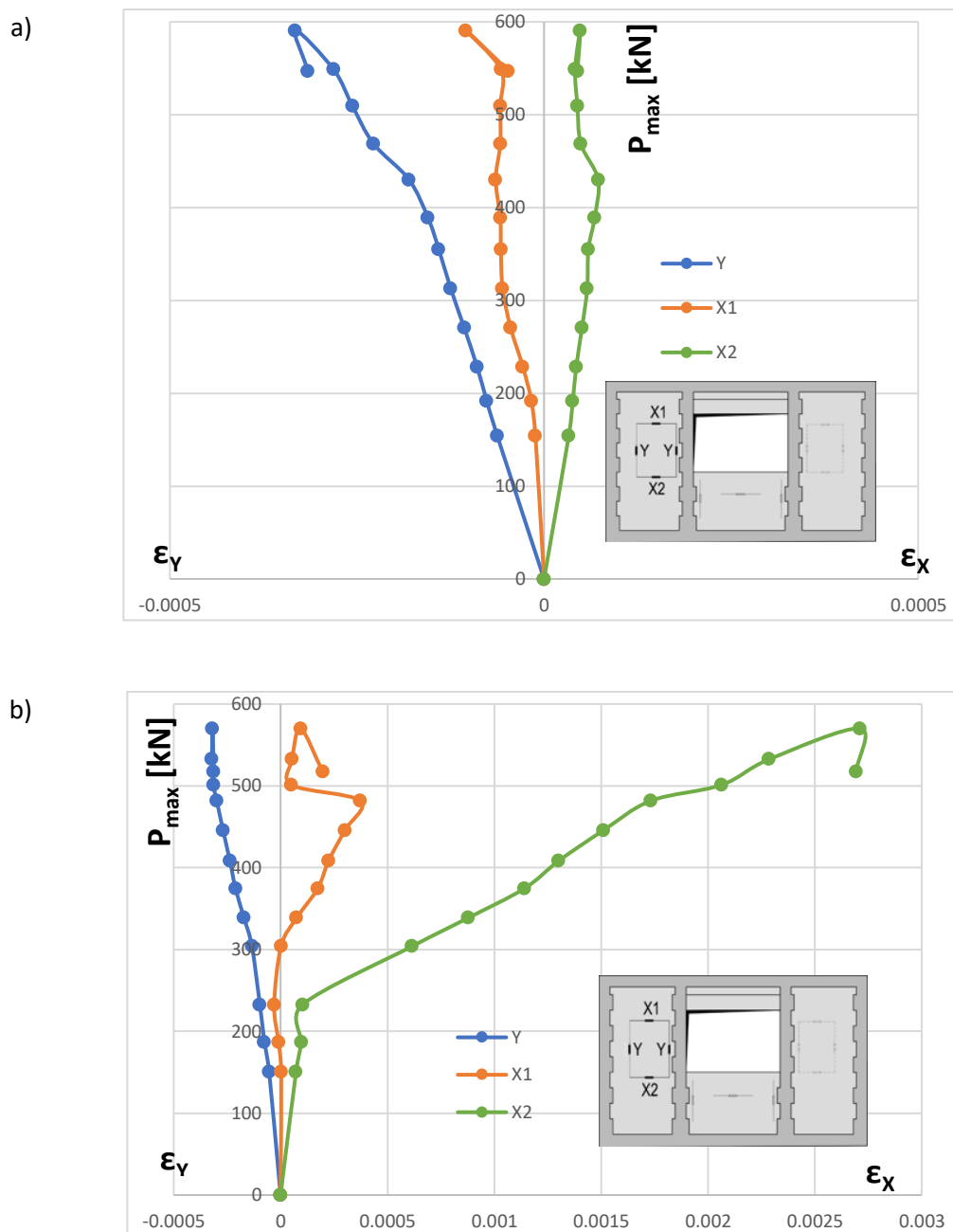
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.34 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych z wypełnionymi spoinami czołowymi: a) MSO-Z2-1, b) MSO-Z2-2



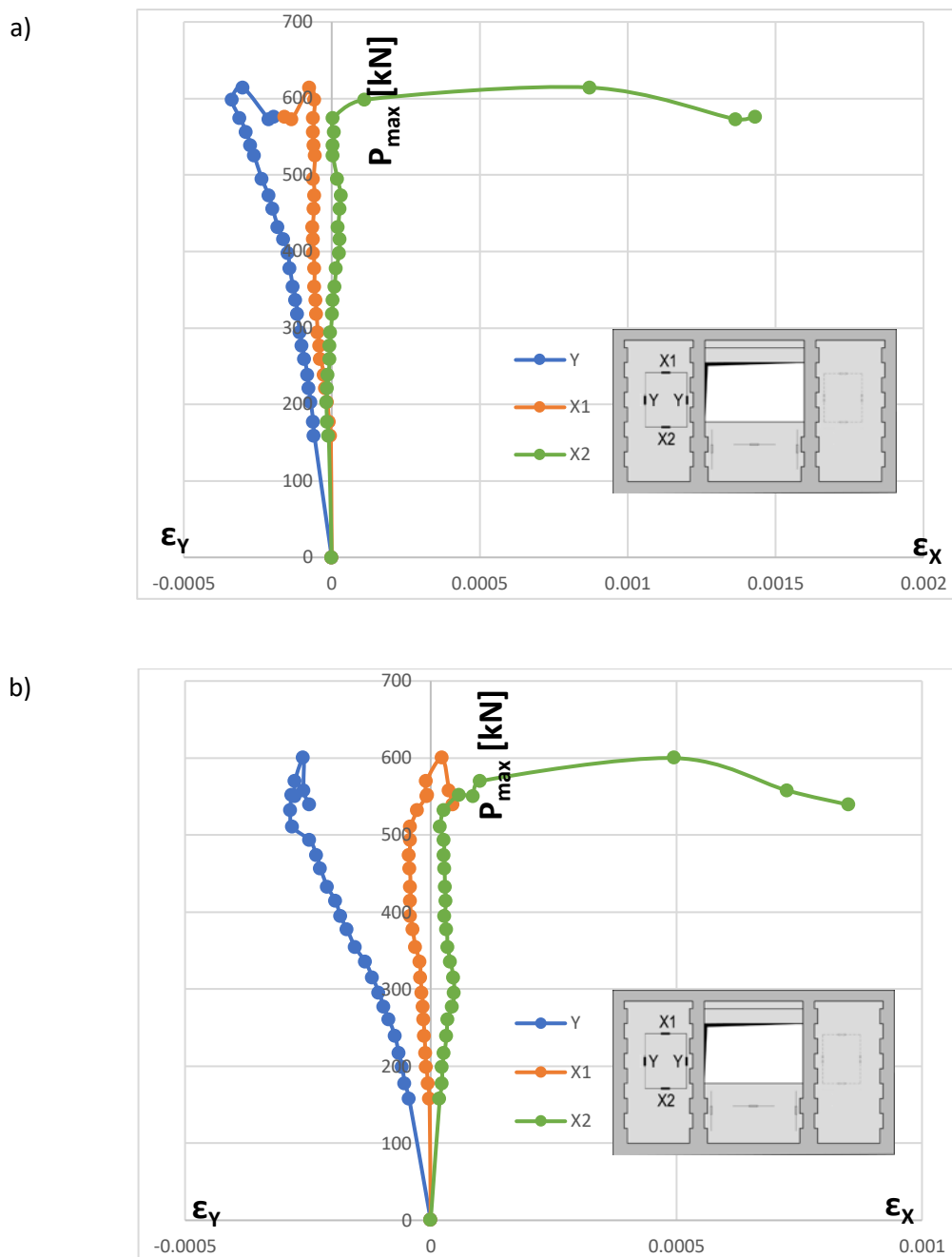
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.35 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych podwójnie z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) M2SO-Z1-1, b) M2SO-Z1-2



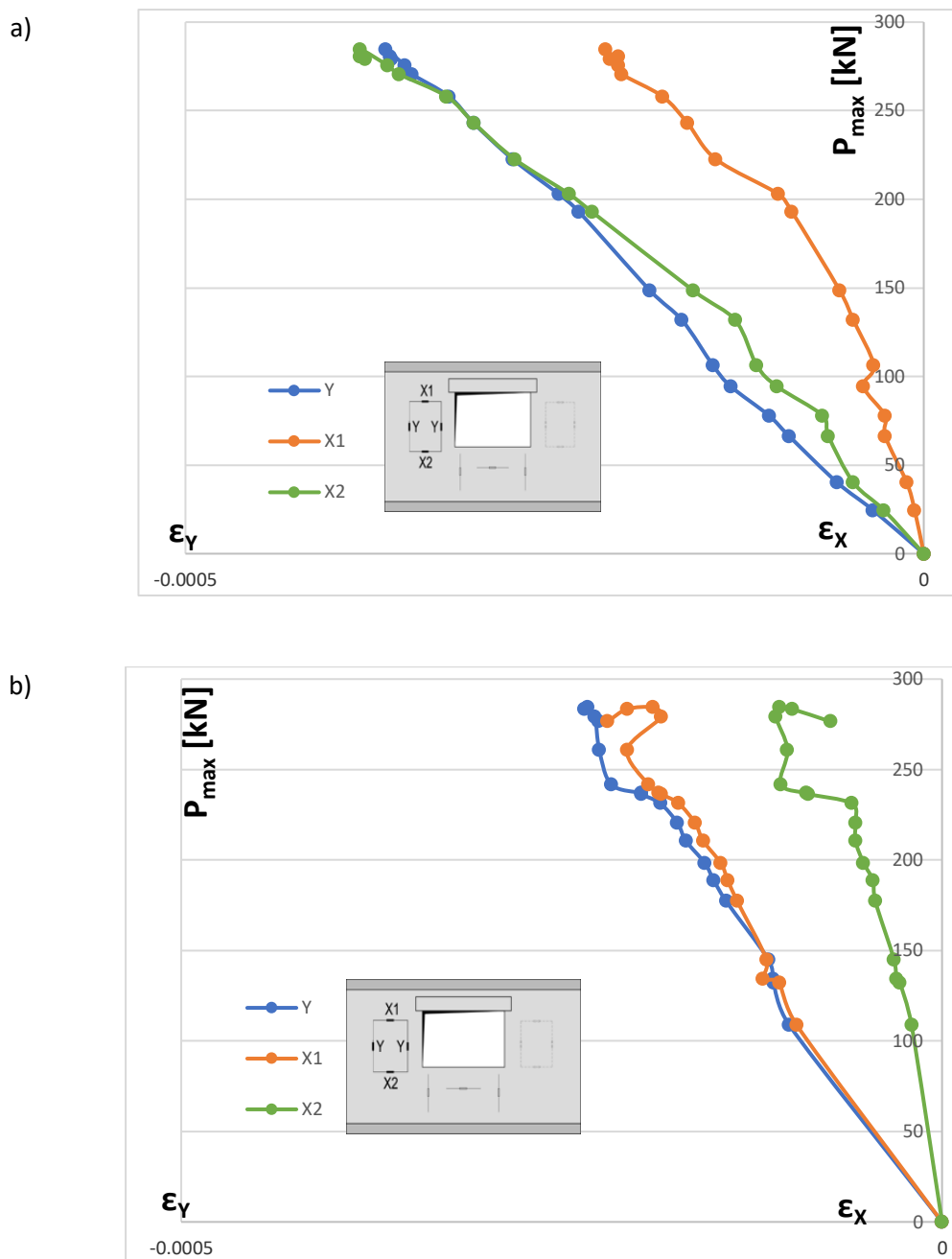
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.36 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych podwójnie z wypełnionymi spoinami czołowymi: a) M2SO-Z2-1, b) M2SO-Z2-2



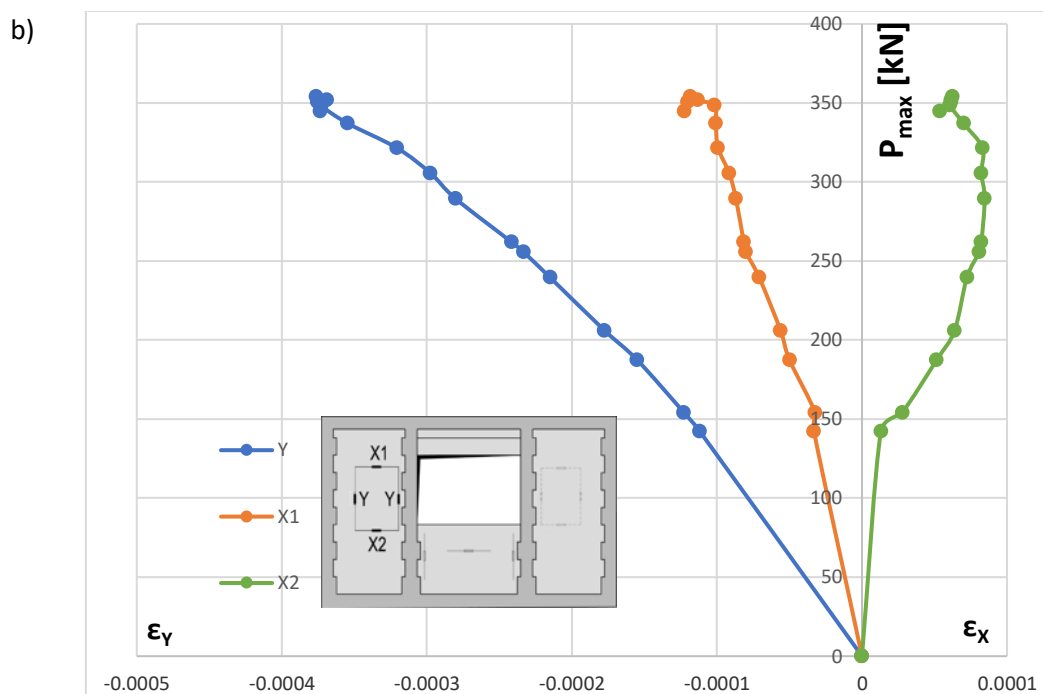
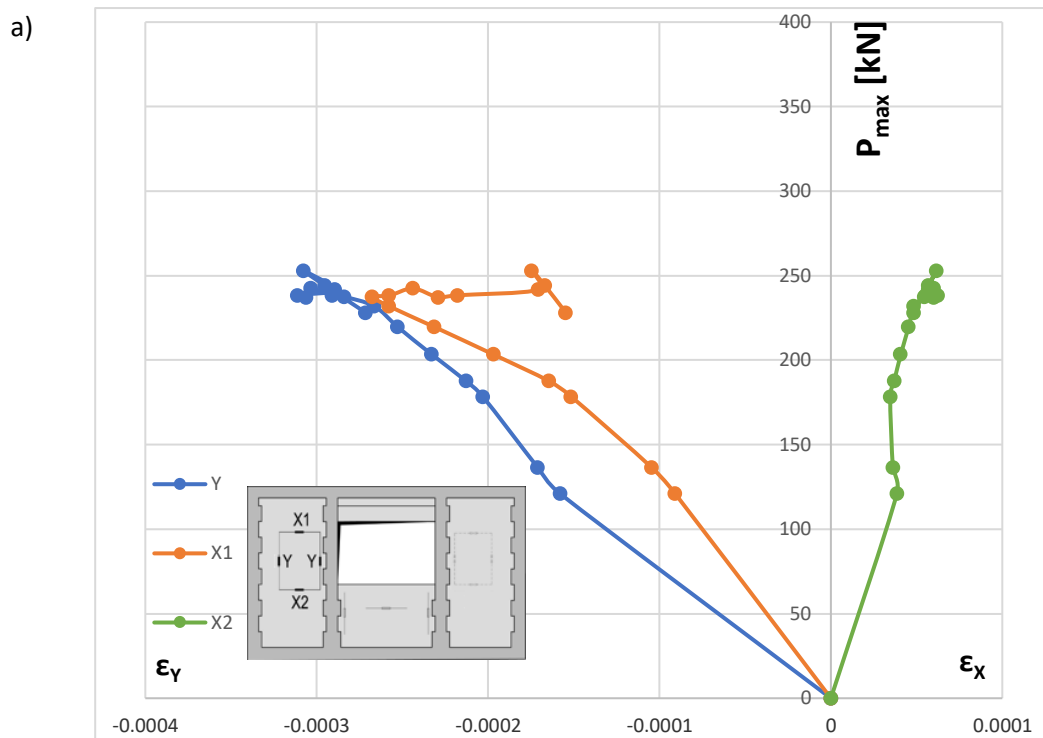
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.37 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MSLO-Z1-1, b) MSLO-Z1-2



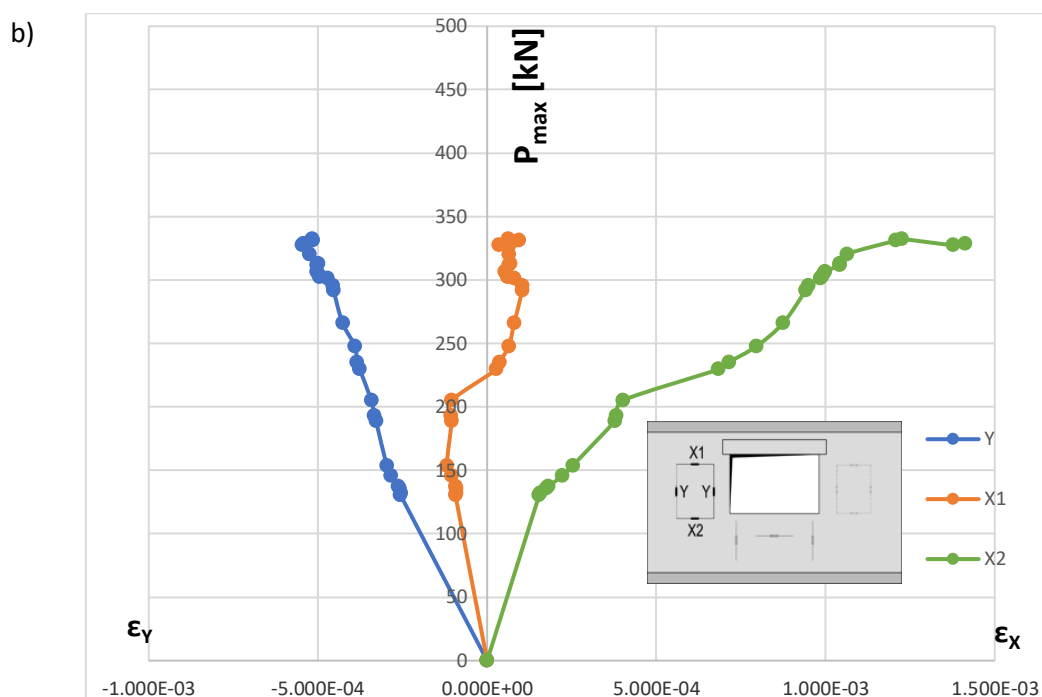
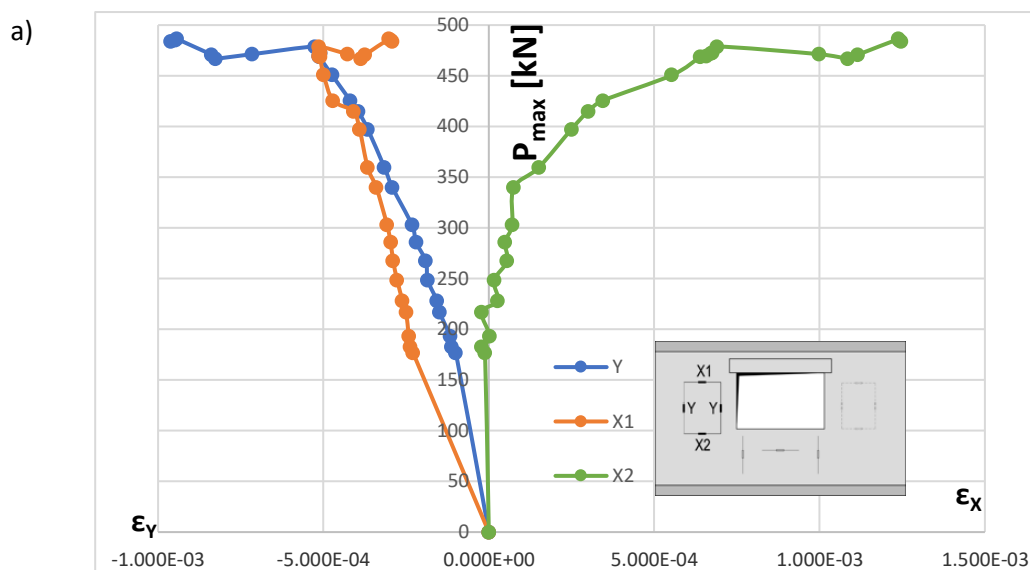
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.38 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych podwójnie betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) M2SLO-Z1-1, b) M2SLO-Z1-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

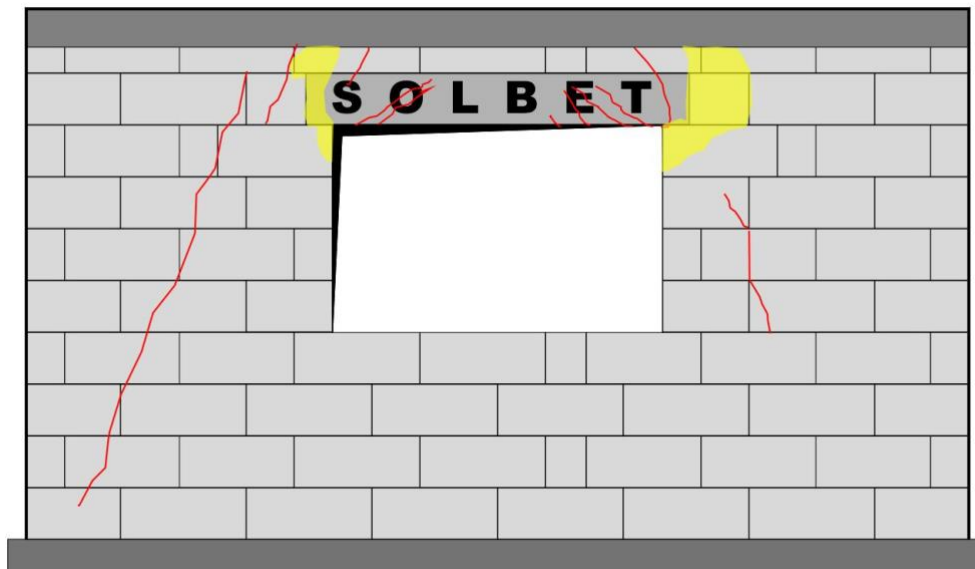


Rys. 7.3.39 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli bez skrępowania z niewypełnionymi spoinami czołowymi i nadprożem żelbetowym: a) MNSO-LC-1, b) MNSO-LC-2

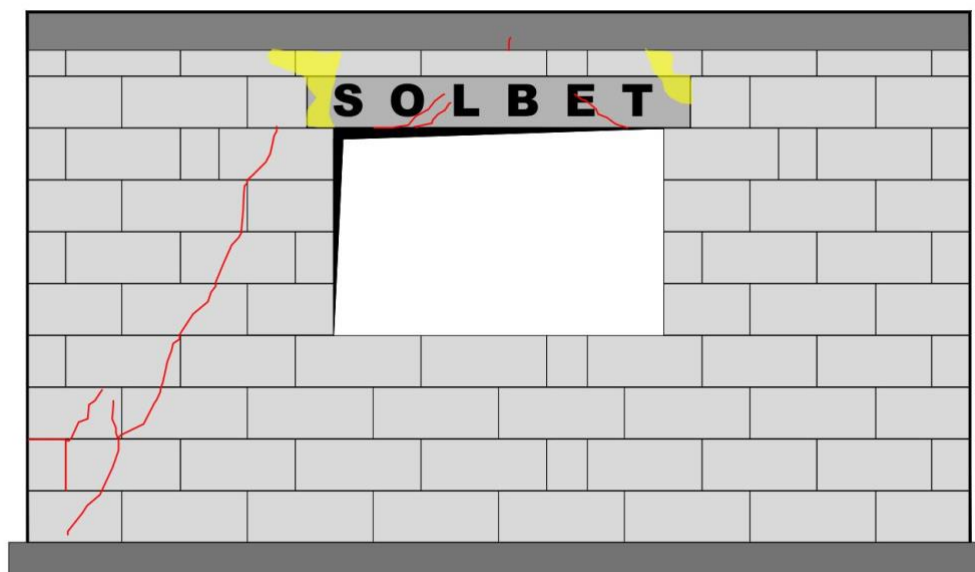
Szkie uszkodzeń badanych ścian pokazano od Rys. 7.3.40 do Rys. 7.3.44. W badanych modelach wystąpiły zarówno zarysowania jak i lokalne odspojenia na powierzchniach muru. Pierwsze rysy występowały zawsze na systemowych nadprożach z betonu komórkowego, w strefie przypodporowej.



a)



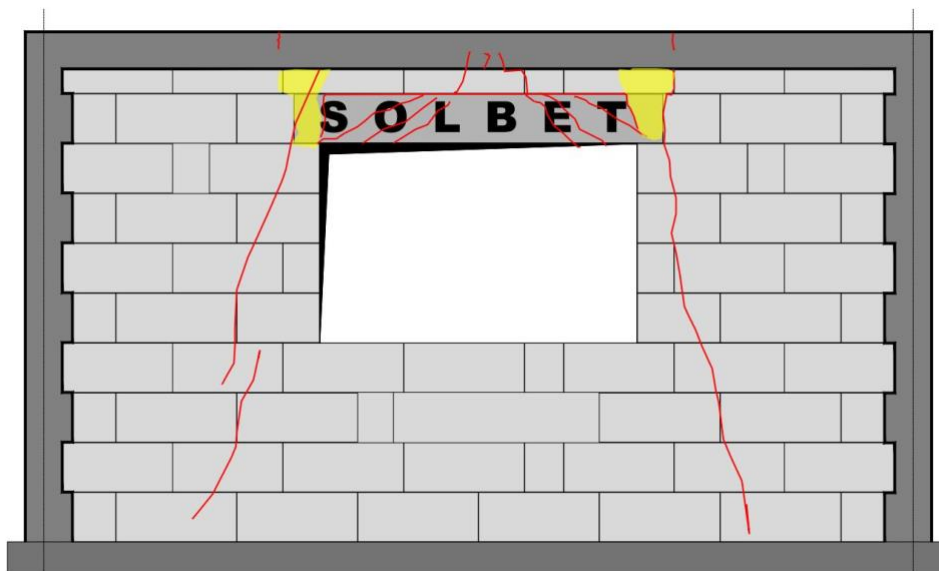
b)



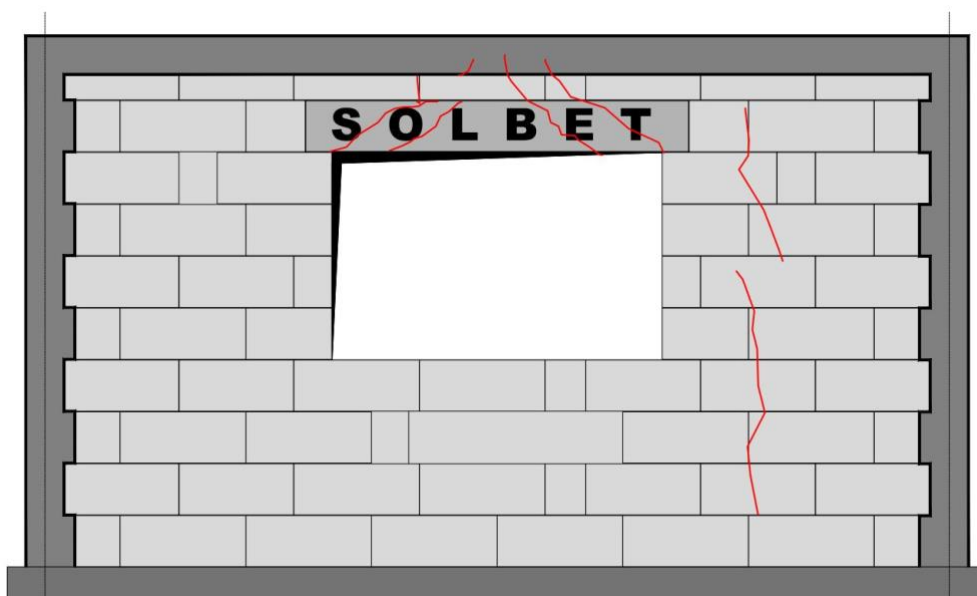
Rys. 7.3.40 Szkice uszkodzeń modeli a) MNSO-Z1, b) MNSO-Z2 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania, kolorem żółtym zaznaczono powierzchnie odspojone



a)



b)

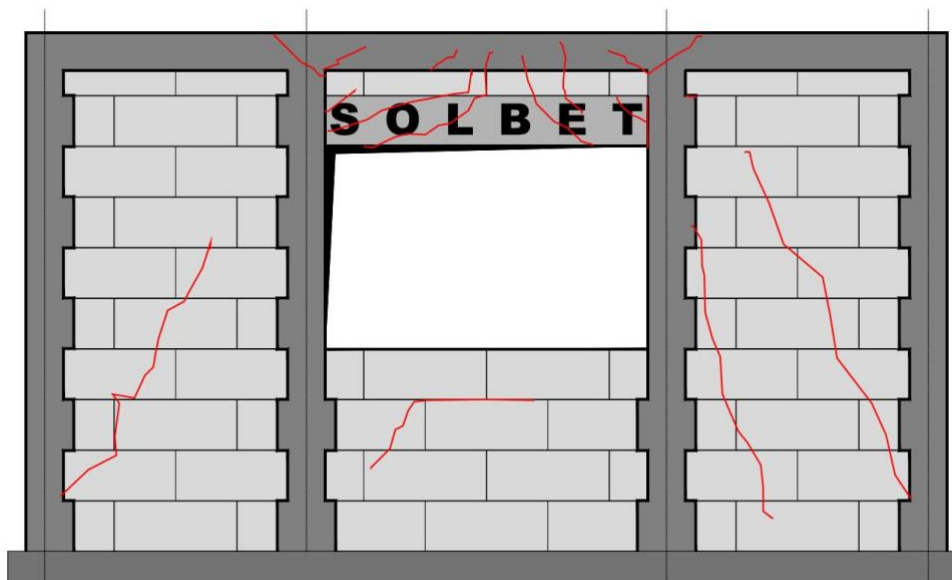


Rys. 7.3.41 Szkice uszkodzeń modeli a) MSO-Z1 b) MSO-Z2 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania, kolorem żółtym zaznaczono powierzchnie odspojone

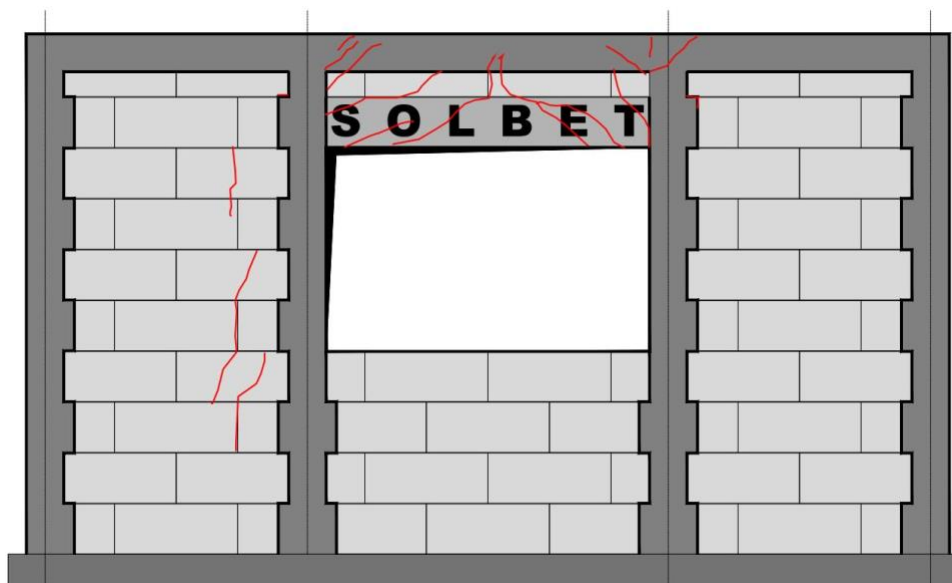


Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrzepowanych konstrukcją żelbetową

a)



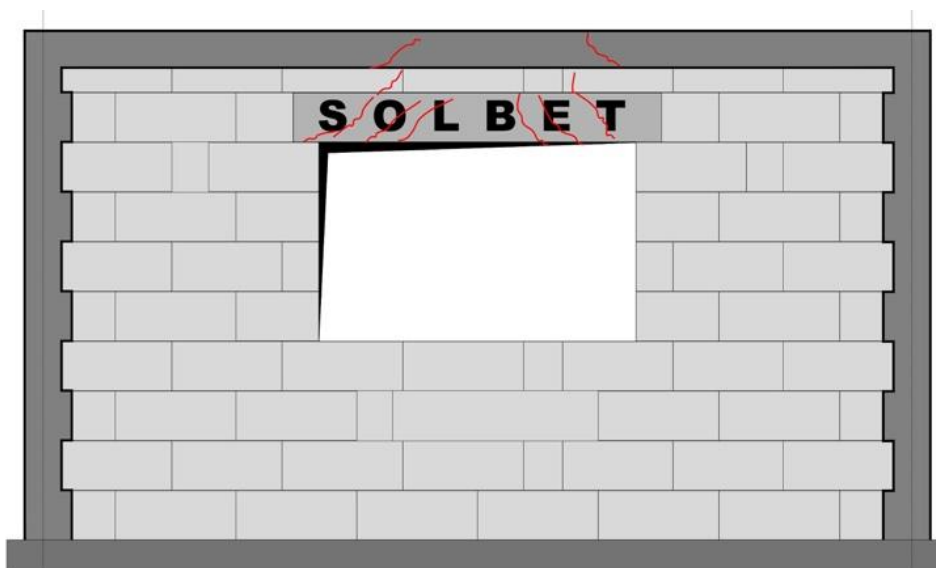
b)



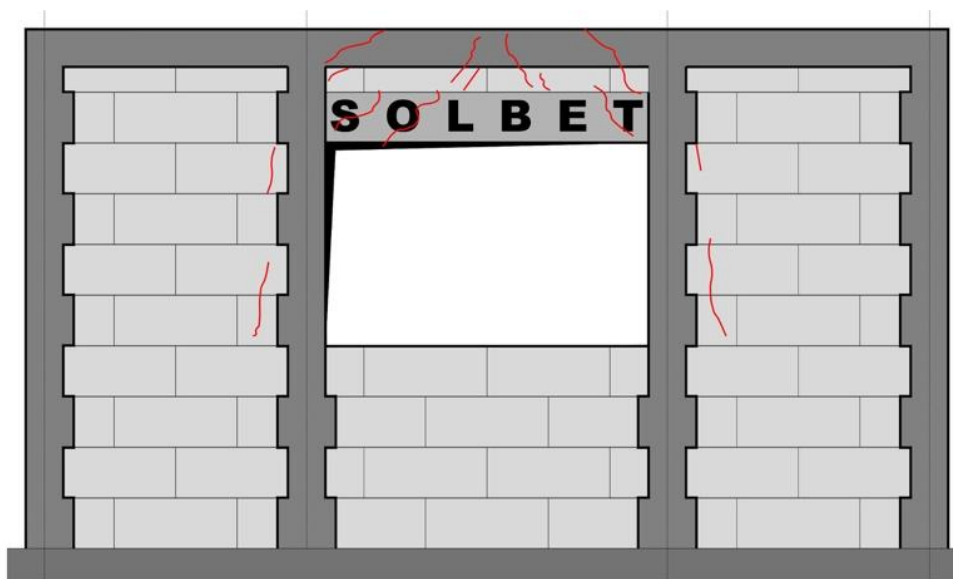
Rys. 7.3.42 Szkice uszkodzeń modeli a) M2SO-Z1 b) M2SO-Z2 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.3.43 Szkic uszkodzeń modelu MSLO-Z1– liniami czerwonymi pokazano zarysowania



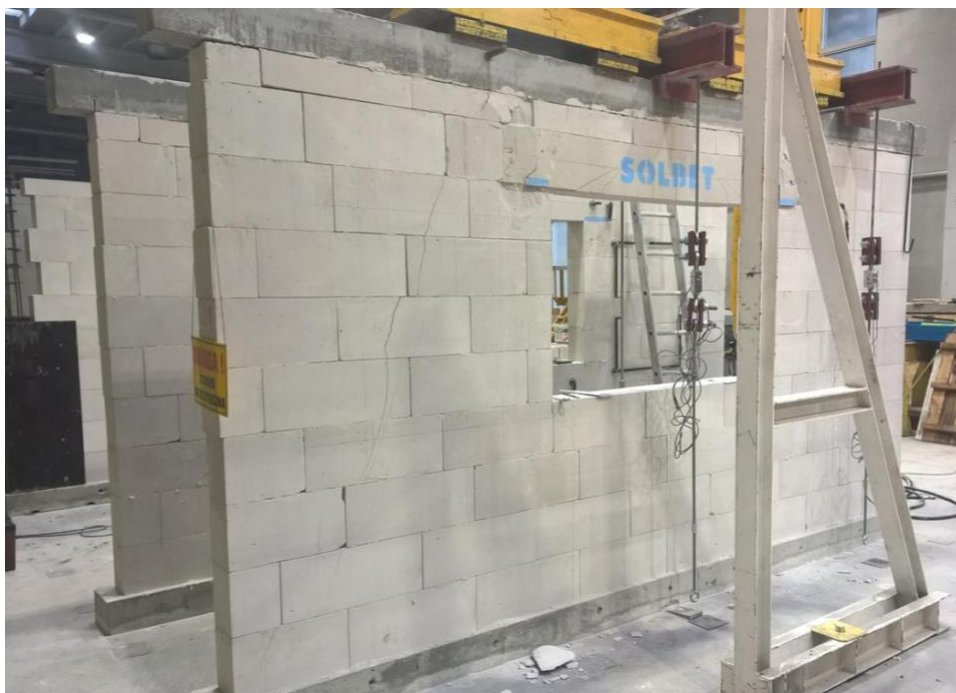
Rys. 7.3.44 Szkic uszkodzeń modelu M2SLO-Z1– liniami czerwonymi pokazano zarysowania

Fotografie uszkodzeń modeli z otworem okiennym przedstawiono od Rys. 7.3.45 do Rys. 7.3.50.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrzepowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)



Rys. 7.3.45 Uszkodzenia modeli nieskrępowanych z niewypełnionymi spoinami pionowymi:
a) MNSO-Z1-1, b) MNSO-Z1-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrzepowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)



Rys. 7.3.46 Uszkodzenia modeli nieskrępowanych z wypełnionymi spoinami pionowymi:
a) MNSO-Z2-1, b) MNSO-Z2-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)



Rys. 7.3.47 Uszkodzenia modeli skrępowanych obwodowo z wypełnionymi spoinami pionowymi: a) MSO-Z1-1, b) MSO-Z1-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)



Rys. 7.3.48 Uszkodzenia modeli skrępowanych obwodowo z wypełnionymi spoinami pionowymi: a) MSO-Z2-1, b) MSO-Z2-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)

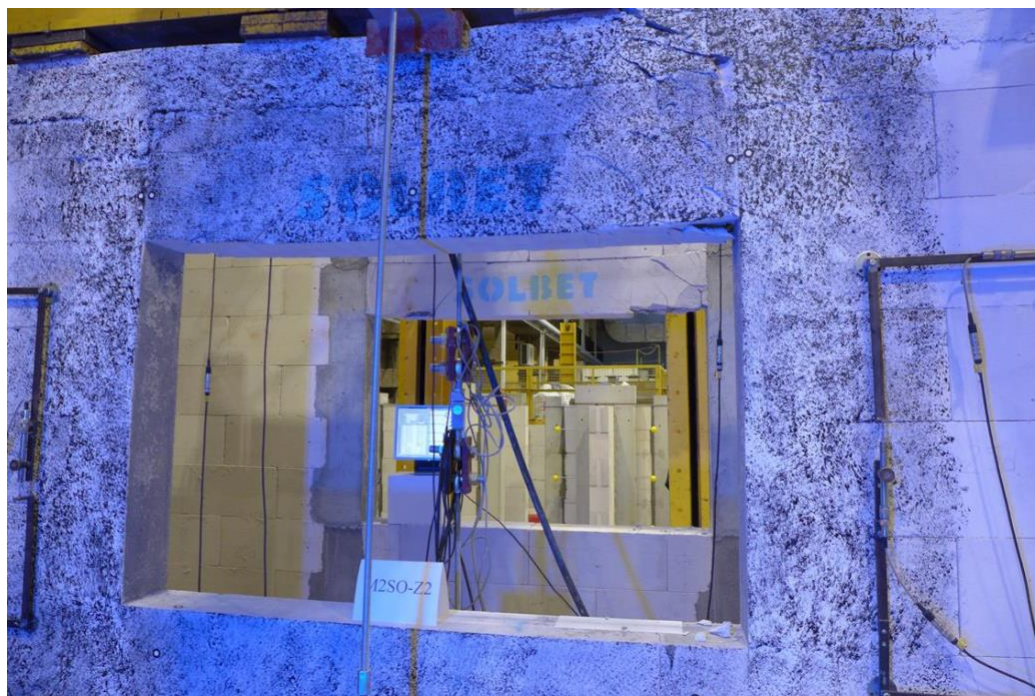


Rys. 7.3.49 Uszkodzenia modeli skrępowanych podwójnie z wypełnionymi spoinami pionowymi: a) M2SO-Z1-1, b) M2SO-Z1-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)



Rys. 7.3.50 Uszkodzenia modeli skrępowanych podwójnie z wypełnionymi spoinami pionowymi: a) M2SO-Z2-1, b) M2SO-Z2-2



7.4. Badania dodatkowe

Oprócz badań wstępnych oraz badań zasadniczych wykonano również badania dodatkowe. Przeprowadzono badania dodatkowe modeli ścian w skali naturalnej z otworem, w których przesklepiono otwór nadprożem żelbetowym.

Badaniami dodatkowymi były również fragmenty ścian, w którym przebadano nośność układu nadproże z ABK – warstwa bloczków z ABK – wieńiec z betonu lekkiego, niezbędne do obliczeń w metodzie Strut and Tie. Model ścian z wieńcem żelbetowym z betonu zwykłego, warstwą bloczków oraz nadprożem z betonu komórkowego przebadał na potrzebę swojego doktoratu Mazur [69].

Badania ścian w skali naturalnej z nadprożem żelbetowym

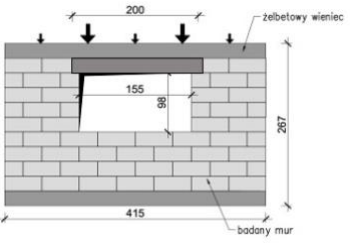
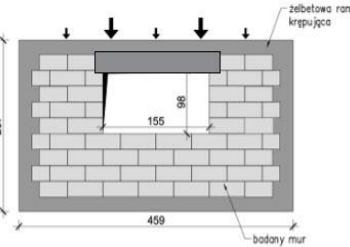
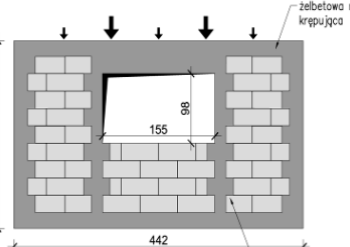
Założenia i program badań dodatkowych

W badaniach zasadniczych, w modelach z otworem, pierwsze rysy powstały w systemowym nadprożu z betonu komórkowego, a w momencie zniszczenia zauważalne były znaczne zarysowania i uszkodzenia tych nadproży. Dlatego zdecydowano się na wykonanie badań dodatkowych, w których zamiast podatnego nadproża z betonu komórkowego zastosowano sztywniejsze nadproże żelbetowe. W badaniach dodatkowych zbadano łącznie 6 ścian: dwie nieskrępowane z otworem, dwie z otworem skrępowane obwodowo oraz dwie z otworem skrępowane obwodowo i ze skrępowaniem przy otworze. Geometria modeli, zastosowane elementy murowe oraz sposób przykładania obciążenia były takie same, jak w badaniach zasadniczych. Zasada oznaczenia modeli była również taka sama, jak w przypadku modeli zasadniczych. Modele oznaczono symbolem literowo-liczbowym i było to powiązane z jego opisem. Mury skrępowane betonem **zwykłym** z otworem i nadprożem żelbetowym oznaczono **MSO-SC**, wersja **skrępowania podwójnego** (obwodowo i przy otworach) **M2SO-SC**. Badania dodatkowe wykonano tylko bez wypełnienia spoin czołowych (pionowych). Tablica 7.4.1 przedstawia program badań modeli murów z nadprożem żelbetowym.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

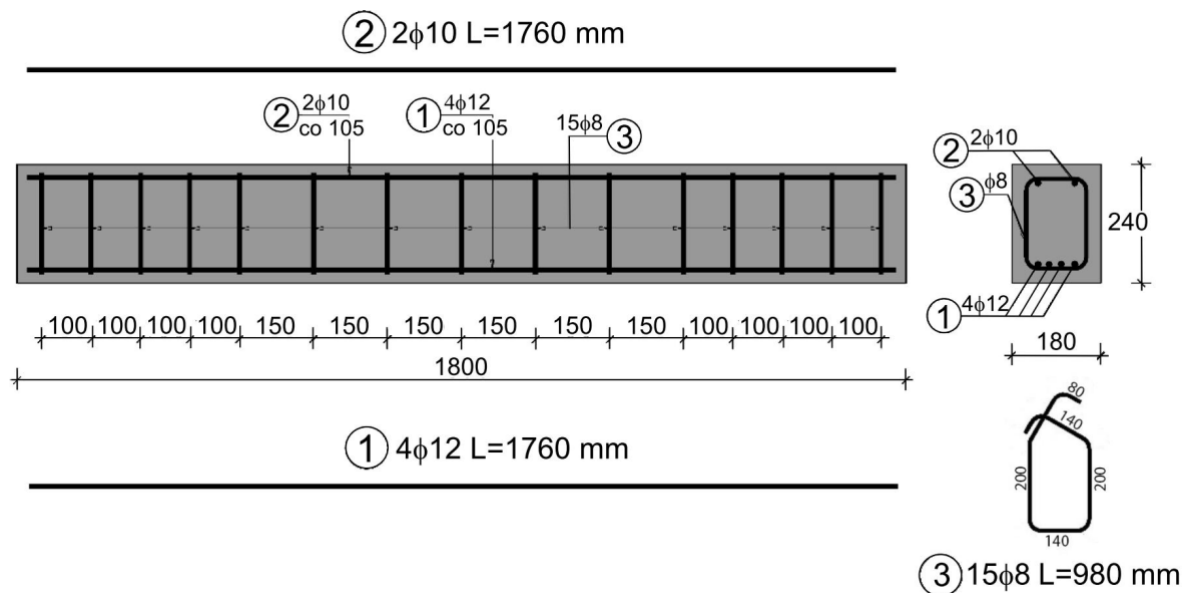
Tablica 7.4.1 Program badań modeli murów z nadprożem żelbetowym

Nazwa serii	Skrępowanie	Rodzaj wypełnienia spoiny czołowej	Liczba modeli [szt.]
<p>MNSO-LC-Z1-1, MNSO-LC-Z1-2</p> 	Bez skrępowania	I	2
<p>MSO-SC-Z1-1, MSO-SC-Z1-2</p> 	Wzdłuż obwodu	I	2
<p>M2SO-SC-Z1-1, M2SO-SC-Z1-1</p> 	Wzdłuż obwodu i przy otworze	I	2
		Razem:	6

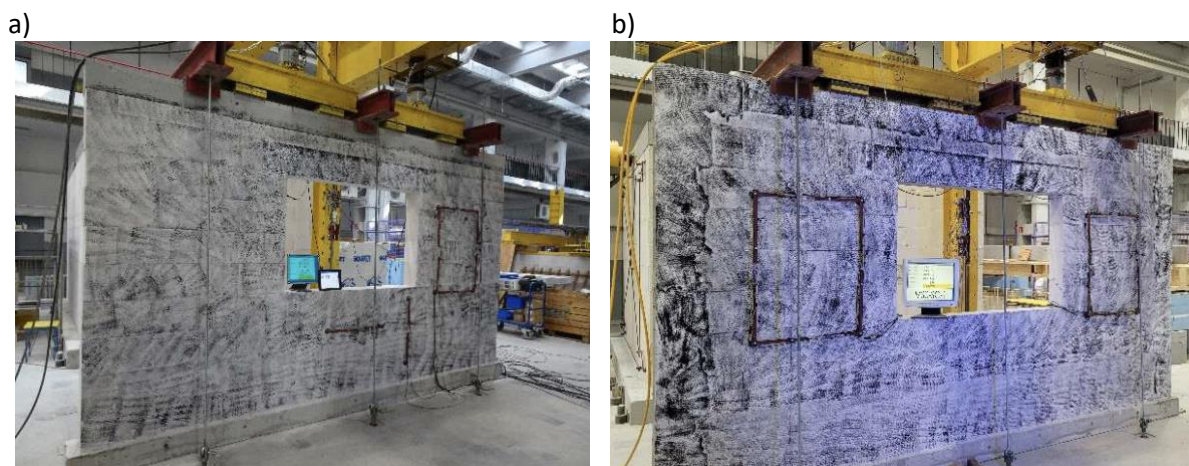
Nadproże żelbetowe wykonano jako prefabrykowane o przekroju porzecznym 18 x 24 cm. Do wykonania nadproża zastosowano beton klasy C20/25 oraz stali zbrojeniową gatunku BSt500 i klasy A-IIIIN. Nadproże zazbrojono dołem 4 prętami średnicy 12 mm i górą 2 prętami średnicy 10 mm. Zastosowano strzemiona $\phi 8$ w rozstawie co 10 cm przy podporze i co 15 cm w pręśle (Rys. 7.4.1). Modele badawcze z nadprożem żelbetowym pokazano od Rys. 7.4.2 do Rys. 7.4.4.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



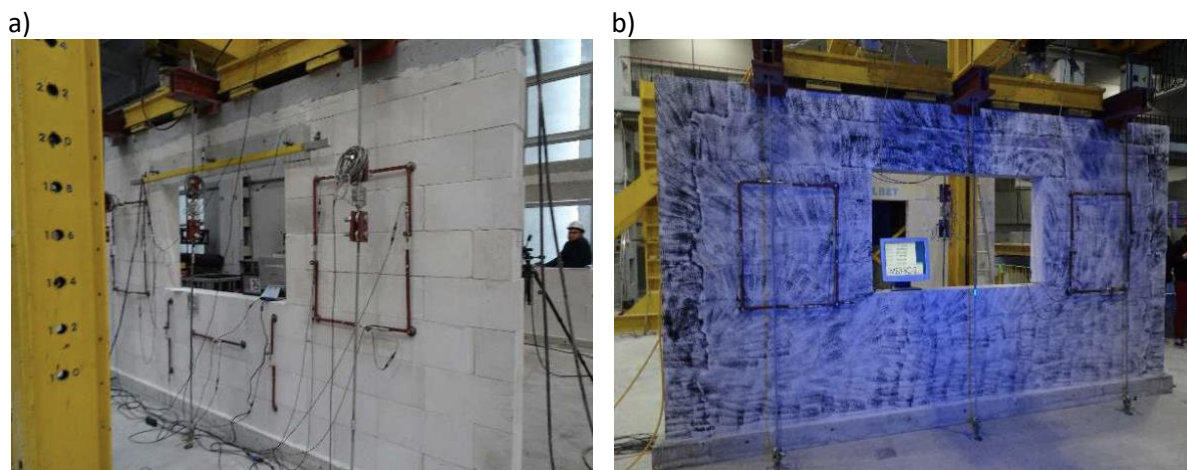
Rys. 7.4.1 Żelbetowe prefabrykowane nadproże stosowane w badaniach dodatkowych



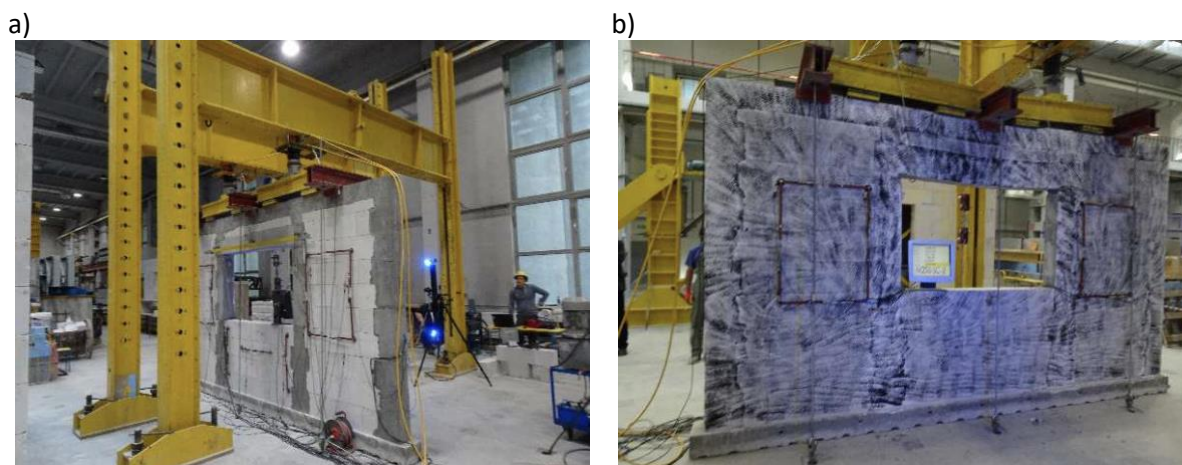
Rys. 7.4.2 Widok murów podczas badań: a) MNSO-LC-Z1-1, b) MNSO-LC-Z1-2



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrzepowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.4.3 Widok murów podczas badań: a) MSO-SC-Z1-1, b) MSO-SC-Z1-2



Rys. 7.4.4 Widok murów podczas badań: a) M2SO-SC-Z1-1, b) M2SO-SC-Z1-2

Wyniki badań

W trakcie badań rejestrowano przykładane obciążenie oraz jego zmienność. Rejestrowane były również odkształcenia modelu na ramach pomiarowych i przy pomocy bezdotykowego pomiaru optycznego – jak w badaniach zasadniczych.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrzepowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 7.4.2 przedstawia całkowite siły niszczące i oraz siły powodujące zarysowania o szerokości większej od 0,05 mm. Za siły całkowite uznano sumę obciążenia stalowych ram i układów ciągnowych, powiększone o ciężar stalowych trawersów, które ważyły 230 kg.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 7.4.2 Siły rysujące i niszczące w modelach murów z otworem i nadprożem żelbetowym

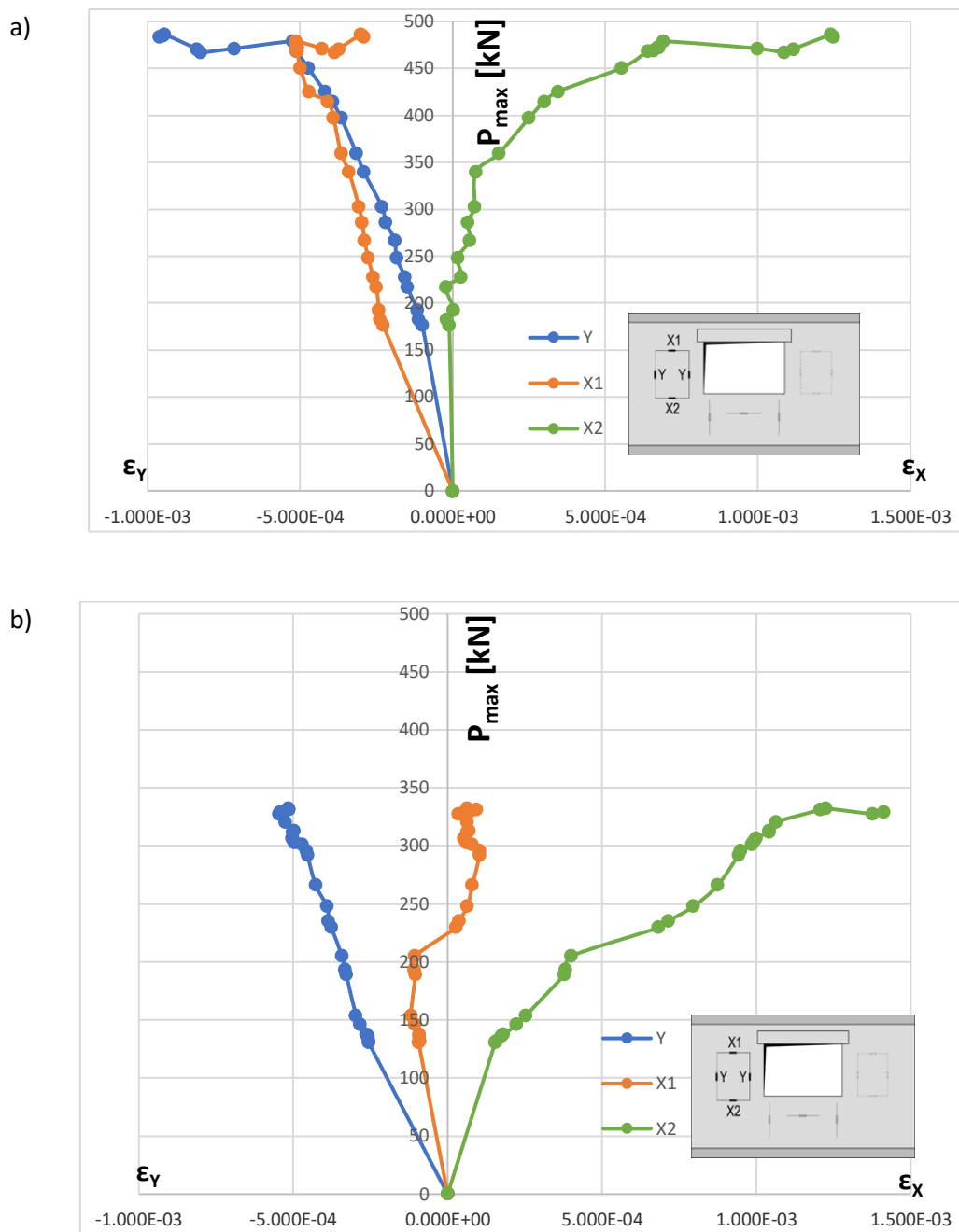
Schemat	Nazwa serii	Oznaczenie	Siła rysująca [kN]	Średnia siła rysująca [kN]	Siła niszcząca [kN]	Średnia siła niszcząca [kN]
	MNSO-LC mur nieskrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi oraz nadprożem żelbetowym	MNSO-LC-1	205,0	210,0	486,1	489,6
		MNSO-LC-2	215,0		493,2	
	MSO-SC-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi oraz nadprożem żelbetowym	MSO-SC-1	245,0	248,5	599,2	601,5
		MSO-SC-2	252,0		603,7	
	M2SO-SC-Z1 mur skrępowany podwójnie z niewypełnionymi spoinami czołowymi oraz nadprożem żelbetowym	M2SO-SC-1	390,0	392,5	872,2	877,2
		M2SO-SC-2	395,0		882,2	

Na Rys. 7.4.5 do Rys. 7.4.7 zamieszczono wykresy siła–odkształcenie, mierzone na ramkach pomiarowych usytuowanych w środkowej części modeli. Podano uśrednione wyniki z 2 ramek w każdym modelu, po jednej z każdej strony modelu. Wartości odkształceń pionowych w każdym modelu przyjęto w oparciu o wskazania czterech czujników środkowych (oznaczonych na wykresach symbolem Y). Oddzielnie analizowano wartości odkształceń poziomych z czujników zabudowanych wyżej (oznaczone symbolem X1) oraz niżej (oznaczone na symbolem X2).

Od Rys. 7.4.8 do Rys. 7.4.10 przedstawiono szkice uszkodzeń jakie wystąpiły podczas badania modelu. Uszkodzenia te przedstawiają fotografie od Rys. 7.4.11 do Rys. 7.4.13.



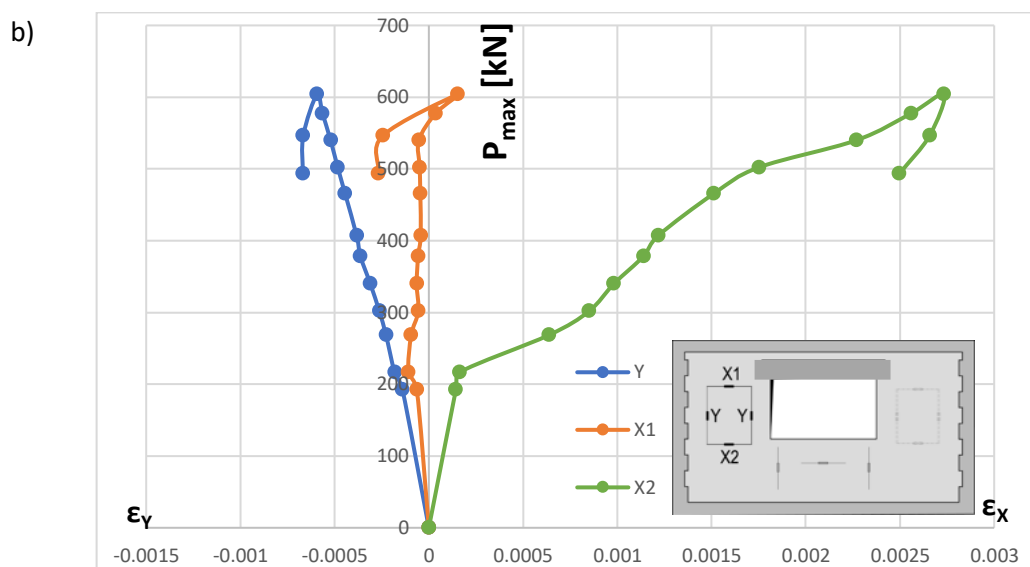
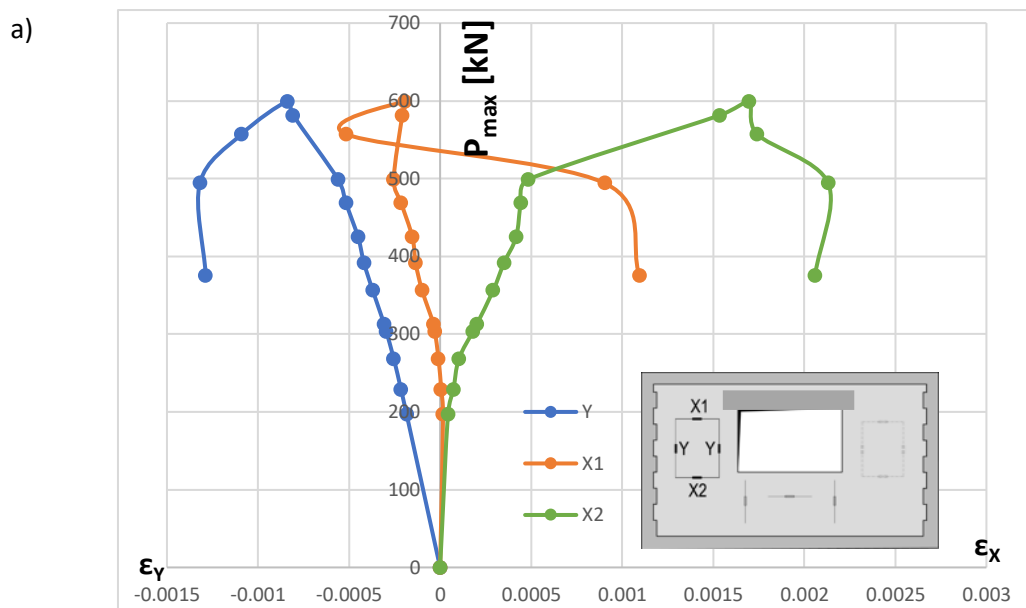
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.4.5 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli bez skrępowania z niewypełnionymi spoinami czołowymi i nadprożem żelbetowym: a) MNSO-LC-1, b) MNSO-LC-2



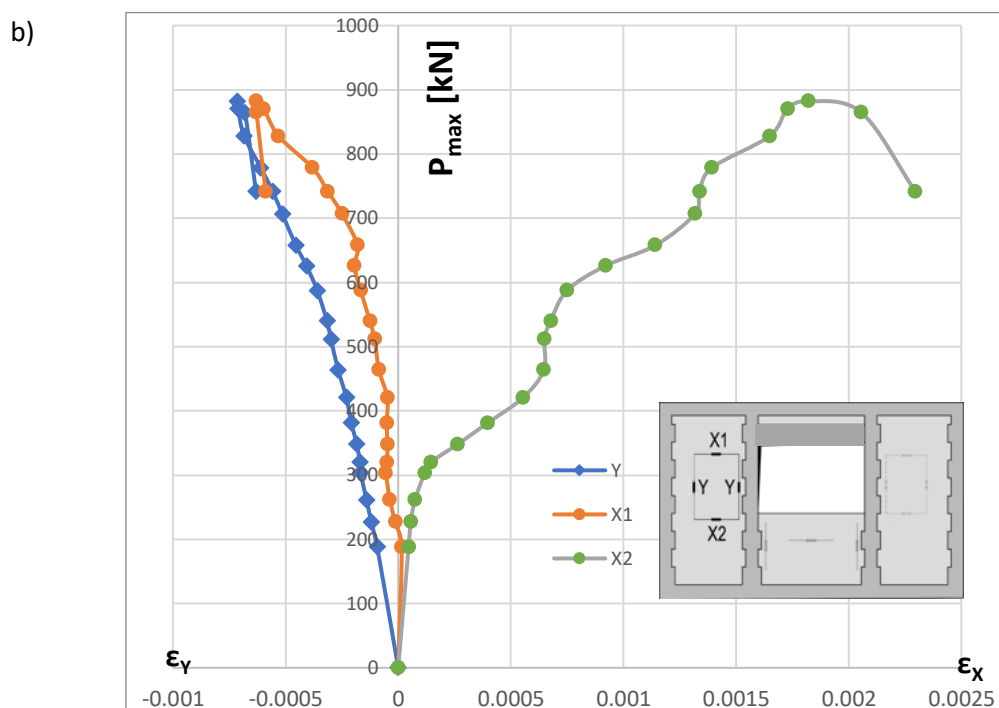
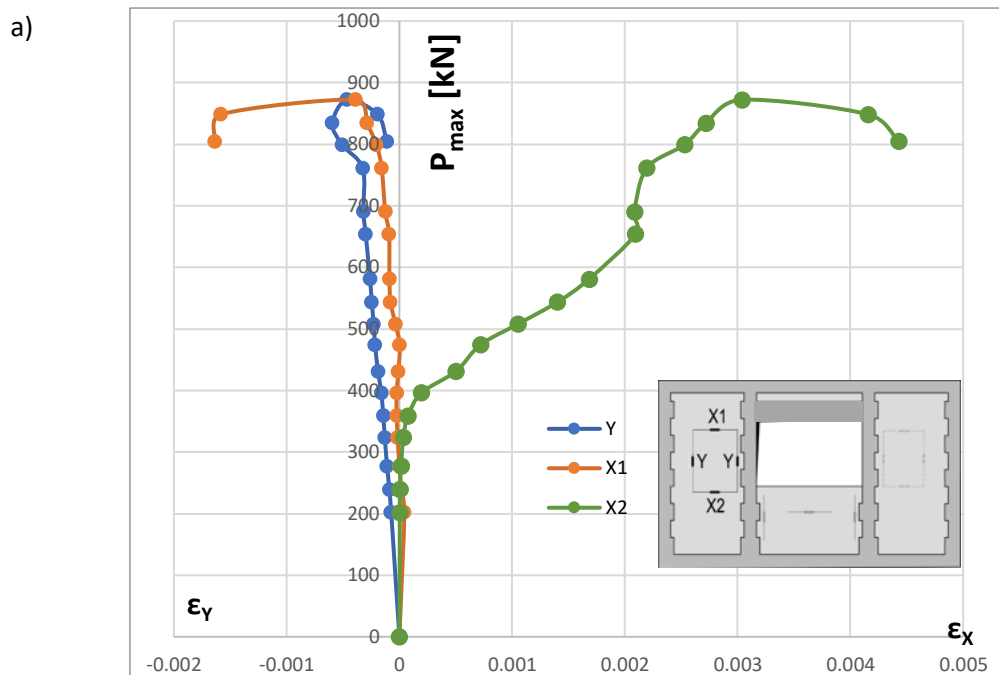
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.4.6 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych z niewypełnionymi spoinami czołowymi i nadprożem żelbetowym:
a) MSO-SC-Z1-1, b) MSO-SC-Z1-2



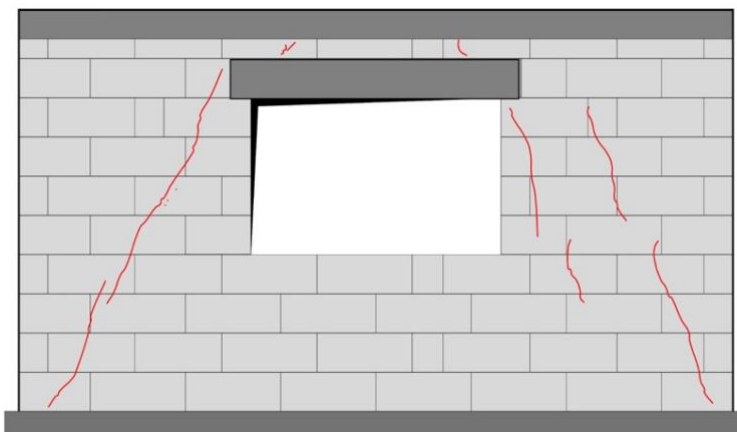
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



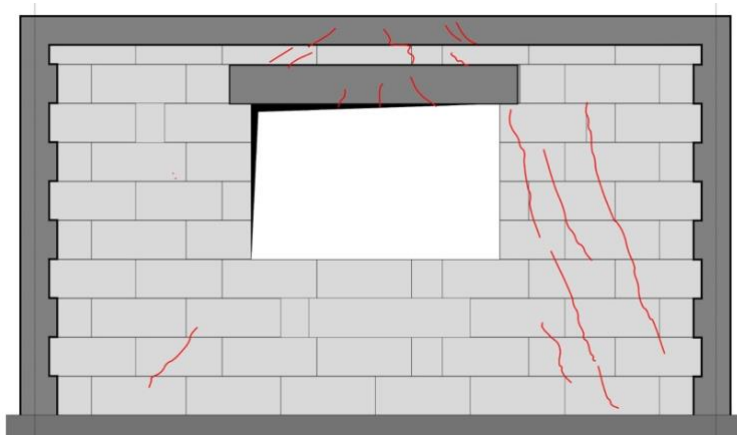
Rys. 7.4.7 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych podwójnie, z niewypełnionymi spoinami czołowymi i nadprożem żelbetowym: a) M2SO-SC-1, b) M2SO-SC-2



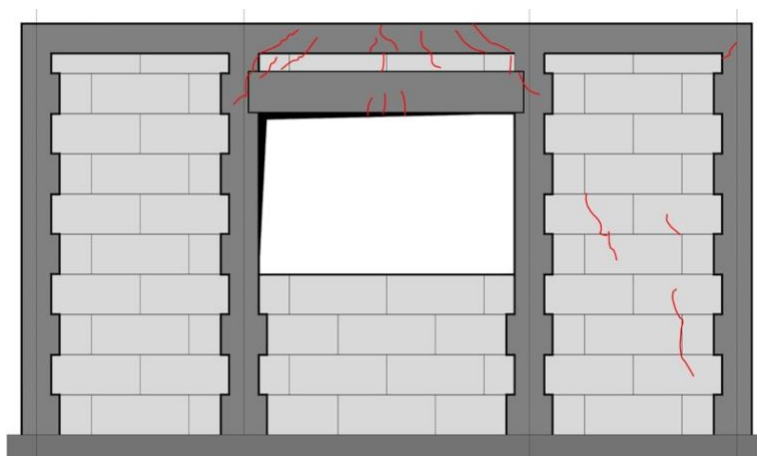
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.4.8 Szkic uszkodzeń modelu MNSO-LC – liniami czerwonymi pokazano zarysowania



Rys. 7.4.9 Szkic uszkodzeń modelu MSO-SC-Z1 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania



Rys. 7.4.10 Szkic uszkodzeń modelu M2SO-SC-Z1 - liniami czerwonymi pokazano zarysowania



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)



Rys. 7.4.11 Uszkodzenia modeli bez skrępowania z niewypełnionymi spoinami pionowymi:
a) i b) MNSO-LC



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)



Rys. 7.4.12 Uszkodzenia modeli skrępowanych obwodowo z niewypełnionymi spoinami pionowymi: a) i b) MSO-SC



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 7.4.13 Uszkodzenia modeli skrępowanych podwójnie z niewypełnionymi spoinami pionowymi: a) i b) M2SO-SC

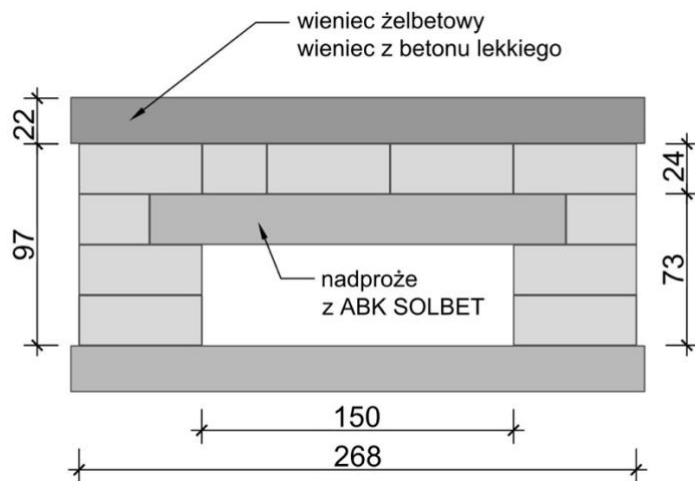
Badania fragmentów ścian z różnymi układami przesklepienia otworu

W tej sekwencji badań dodatkowych wykonano badania modeli fragmentów muru oznaczonych symbolem N III - L - N. Był to fragment muru z otworem z przesklepieniem złożonym z: wieńca z betonu lekkiego, warstwy bloczków z ABK, nadproża z betonu komórkowego. Na potrzeby niniejszej pracy przebadano 2 modele. Geometrię modelu pokazano na Rys. 7.4.14, a fotografię modelu w stanowisku badawczym na Rys. 7.4.15.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)

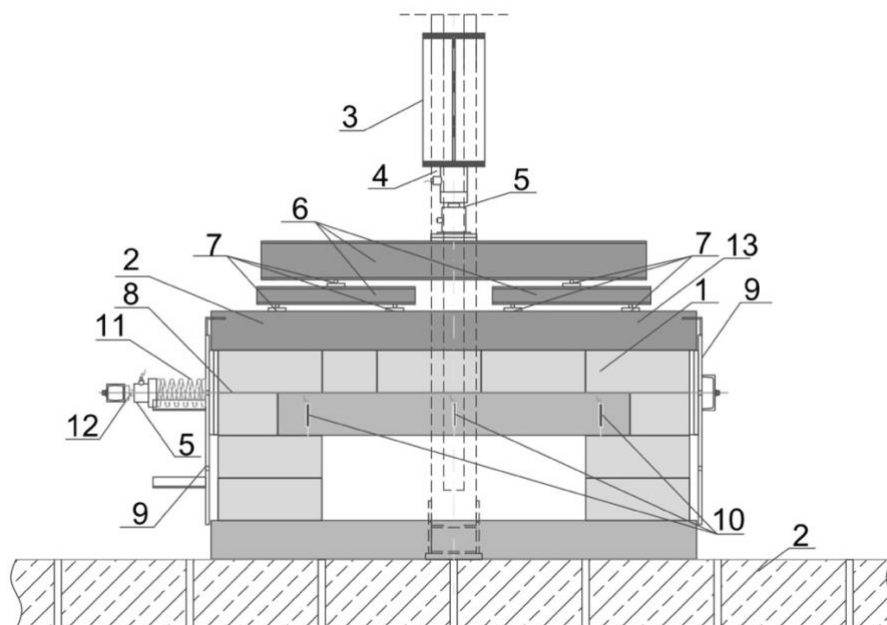


Rys. 7.4.14 Model badawczy fragmentu ściany: a) rysunek modelu, b) model po badaniu



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



b)



Rys. 7.4.15 Model badawczy fragmentu ściany na stanowisku badawczym a) rysunek z opisem: 1 – bloczki z ABK, 2 – posadzka, 3 – rama przyłożenia siły, 4 – siłomierz, 5 – siłownik, 6 – trawersy przekazujące obciążenie, 7 – podkładki walcowe i płaskie przekazujące obciążenie, 8 – ściągi poziome, 9 – płyta dociskowa ściągu, 10 – mierniki przemieszczeń, 11 – sprężyna przekazująca siłę ze ściągu, 12 – siłomierz, 13 – wieniec żelbetowy lub z betonu lekkiego
b) fotografia (model pomalowany do rejestracji przemieszczeń za pomocą bezdotykowego pomiaru optycznego systemem cyfrowej korelacji obrazu Aramis)



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Elementy badawcze serii NIII – L - N (2 modele) zwieńczono u góry prefabrykowaną belką z betonu lekkiego (o wysokości 22 cm i szerokości 18 cm imitującą wieniec, którą układano na murze na warstwie zaprawy. W rzeczywistych ścianach odkształcenia muru w okolicy oparcia nadproży są ograniczone przez mur. W celu uwzględnienia tego efektu do modelu wprowadzono parę cięgien, opartych z jednej strony na sprężynach. Przed badaniem w cięgna wprowadzono siłę, uzyskując poziome sprężenie muru równe około 0,1 MPa. Podobne wartości sprężenia stosowano w badaniach prowadzonych w ramach pracy doktorskiej [69].

Wyniki badań

Wyniki badań, zarejestrowanych sił rysujących oraz niszczących zestawiono w Tablica 7.4.3. Uszkodzenia modeli badawczych pokazano na Rys. 7.4.16, Rys. 7.4.17, Rys. 7.4.18.

Tablica 7.4.3 Siły rysujące i niszczące w modelach fragmentów muru z otworem

Schemat	Nazwa serii	Oznaczenie	Siła rysująca [kN]	Średnia siła rysująca [kN]	Siła niszcząca [kN]	Średnia siła niszcząca [kN]
	NIII – fragment muru z otworem z przesklepieniem złożonym z: wieńca żelbetowego, warstwy białych bloczków z ABK, nadproża z betonu komórkowego. Badania w ramach pracy doktorskiej [69]	NIII-N 1	24,7	89,1	151,2*	395,1
		NIII-N 2	57,5		356,7	
		NIII-N 3	72,0		408,0	
		NIII-N 4	70,0		411,0	
		NIII-N 5	70,0		365,0	
		NIII-N 6	93,0		434,9	
	NIII-L – fragment muru z otworem z przesklepieniem złożonym z: wieńca z betonu lekkiego, warstwy białych bloczków z ABK, nadproża z betonu komórkowego	NIII-L-N1	140,2	118,7	331,6	323,8
		NIII-L-N2	97,5		316,0	

*) Wartości pominięte przy obliczaniu wyników średnich w danej serii badawczej ze względu na niemiernodajne wartości rezultatów

W badaniach prowadzonych w ramach pracy doktorskiej [69] serii modeli NIII – N (z wieńcem żelbetowym z betonu zwykłego) we wszystkich analizowanych elementach pierwsze zarysowania powstały w spoinach wspornych pomiędzy elementami murowymi następnie w spoinach wspornych pomiędzy nadprożem i leżącymi nad nim elementami murowymi a także

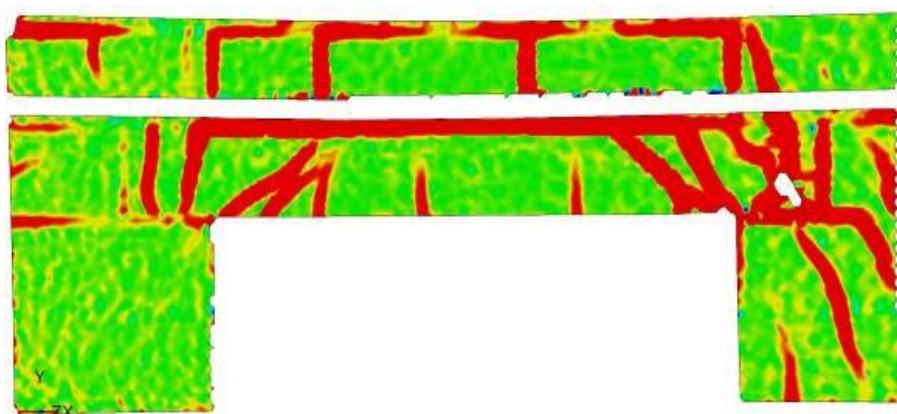


Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

na nadprożu. Do zarysowania nadproży dochodziło w środkowej części nadproża a także od górnej krawędzi nadproża w strefie jego oparcia. W dalszej kolejności dochodzi do rozwarstwienia spoin pomiędzy elementami murowymi ponad nadprożem a także powstania rys ukośnych w okolicach krawędzi oparcia nadproża Rys. 7.4.16.

W nadprożach pierwsze zarysowania wystąpiły w strefach przypodporowych od dolnej krawędzi oraz nad strefami oparcia nadproża od górnej krawędzi. Pojawiły się również zarysowania w środkowej strefie nadproża oraz w bloczkach nad nadprożem. Zniszczenie następowały poprzez zmiążdżenie nadproży w strefie oparcia i podpierających je bloczków. W modelach obserwowanych za pomocą systemu Aramis zarysowania wyznaczono przy niższym poziomie obciążenia.

a)



b)



Rys. 7.4.16 Zniszczenia modeli badawczych a) Model NIII – N [69]



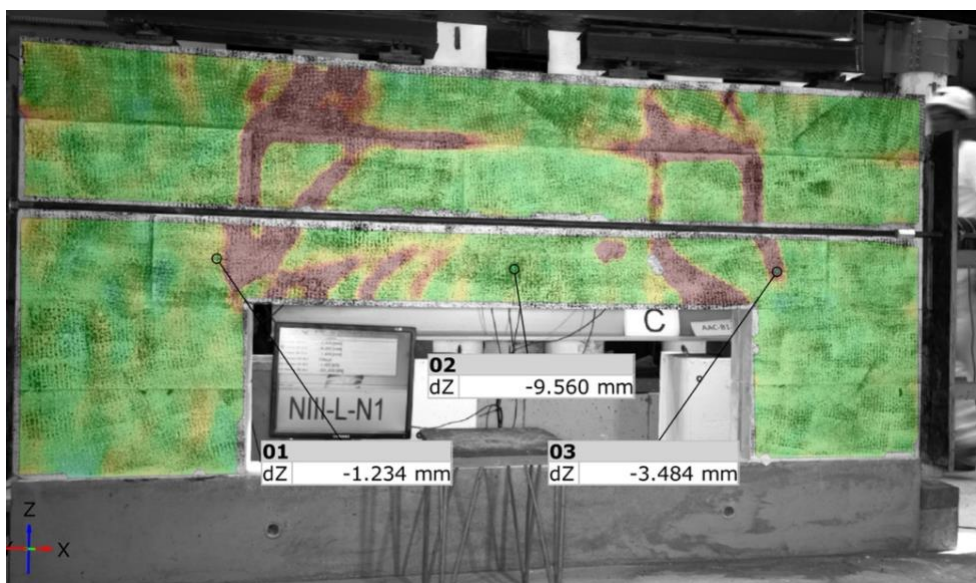
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

W serii modeli NIII – L – N (z wieńcem żelbetowym z betonu lekkiego) pierwsze zarysowania występowały w wieńcu oraz w nadprożu przy krawędzi otworu. Zarysowania występowały pod kątem zbliżonym do 45 stopni. W następnej kolejności następowała rysa pomiędzy wieńcem a bloczkami Rys. 7.4.17 oraz Rys. 7.4.18.

a)



b)



Rys. 7.4.17 Zniszczenia modeli badawczych Model NIII - L – N1

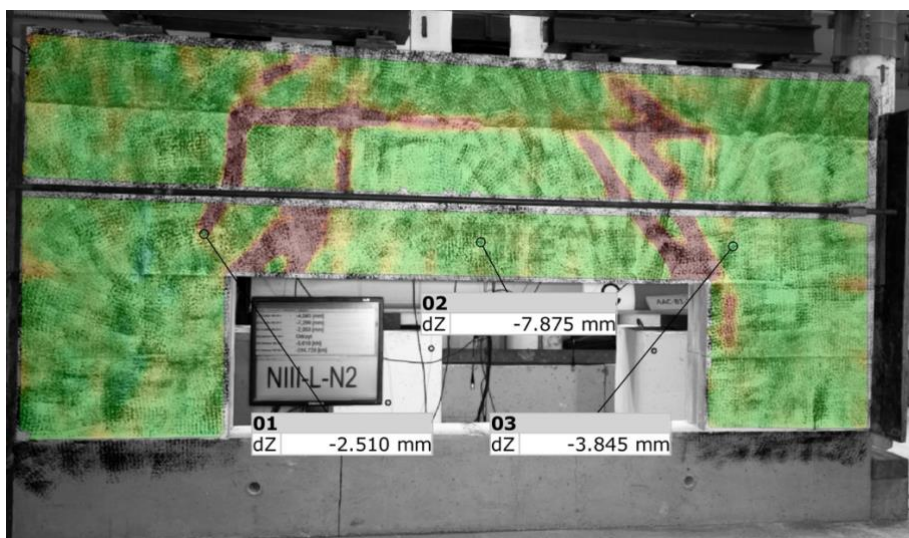


Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

a)



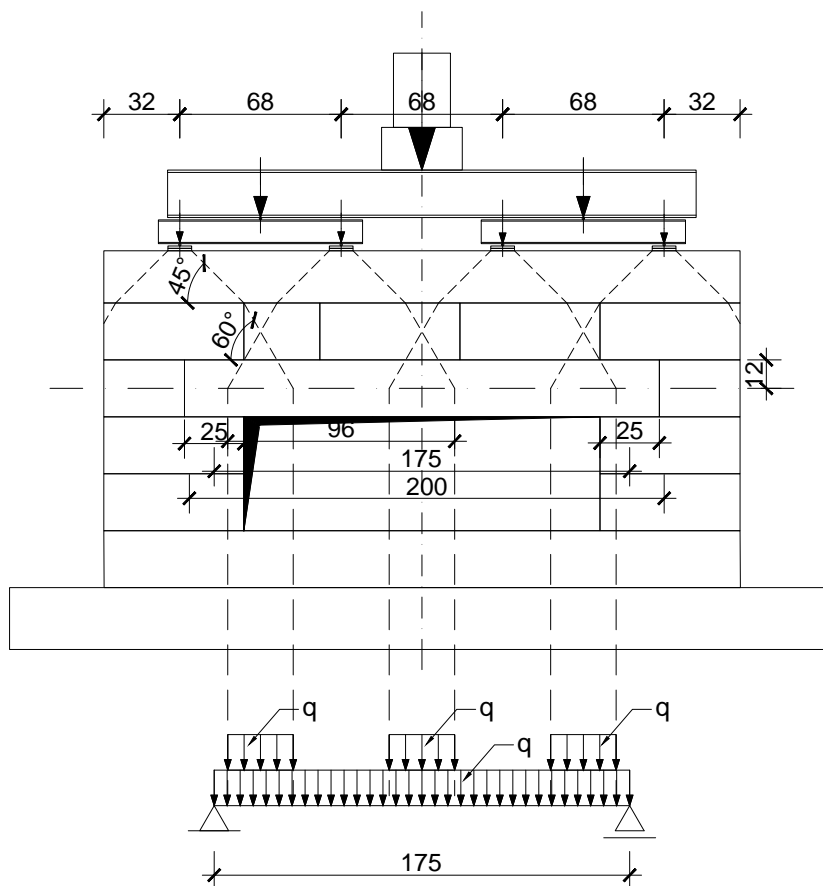
b)



Rys. 7.4.18 Zniszczenia modeli badawczych Model NIII - L - N2

Wyznaczenie nośności dla modeli NIII - L - N

Do wyznaczenia nośności układu nadproże-warstwa muru-wieniec z betonu lekkiego posłużono się modelem przekazywania sił, który przedstawiono na Rys. 7.4.19.



Rys. 7.4.19 Model oddziaływania sił, na podstawie którego obliczono nośność układu nadproże-warstwa muru-wieniec z betonu lekkiego

Na podstawie uzyskanych w badaniach średnich sił maksymalnych obliczono nośność na ścinanie i nośność na zginanie układu nadproże-warstwa muru-wieniec z betonu lekkiego. Nośność na ścinanie wyniosła 109,96 kN, a nośność na zginanie 46,78 kNm.

8. Analiza wyników

Dzięki obszernemu programowi badań analizę wyników można prowadzić wielokierunkowo. Wyniki badań zestawiono w jednej tablicy, by na pierwszy rzut oka był widoczny kontekst, a więc:

- brak skrępowania,
- mur bez otworu,
- mur z otworem,



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

- technika wykonania murów (wypełnione zaprawą murarską tylko spoiny wsporne lub spoiny wsporne i czołowe),
- skrępowanie pojedyncze za pomocą elementów żelbetowych z betonu zwykłego,
- skrępowanie pojedyncze za pomocą elementów żelbetowych z betonu lekkiego,
- skrępowanie podwójne za pomocą elementów żelbetowych z betonu zwykłego,
- skrępowanie podwójne za pomocą elementów żelbetowych z betonu lekkiego.

Osobno pogrupowano wyniki badań dla murów bez otworu oraz dla murów z otworem.

By porównanie było czytelne i usystematyzowane porównano rezultaty badań dla:

- murów pełnych,
- murów z otworem,
- murów pełnych do murów z otworem.

Porównanie wyników zamieszczono w kolejnych podrozdziałach niniejszej pracy.

8.1. Porównanie i analiza wyników badań murów pełnych

W modelach pełnych, czyli bez otworów zniszczenie nie następowało na skutek wystąpienia zarysowania. We wszystkich modelach bez otworu zniszczenie było podobne i nastąpiło przez miażdżenie oraz odspojenie bocznych powierzchni elementów murowych, najczęściej w miejscach zabudowanych bezpośrednio pod żelbetowym wieńcem. Obserwowano miażdżenie elementów murowych i odspojenia wzdłuż płaszczyzn bocznych. Uszkodzenia te koncentrowały się pod górnym rygłem, głównie w strefie środkowej modeli. Po zniszczeniu muru następowało zarysowanie żelbetowego rygla.

W modelach MNS-Z1-2 i MNS-Z2-1 powstały dodatkowo rysy ukośne biegnące od miejsca przyłożenia siły z trawersu ramy do dołu modelu. Rozwarcie rys w momencie zniszczenia badanych modeli nieskrępowanych było znaczne i lokalnie przekraczało 7 mm. Na podstawie wyników badań nie stwierdzono istotnego wpływu wypełnienia spoin czołowych zaprawą murarską - zarówno na nośność modeli skrępowanych jak i nieskrępowanych. Okazało się nawet, że modele bez skrępowania z wypełnieniem spoin czołowych wykazywały niższą o 25,3% rysoodporność niż modele bez skrępowania i bez wypełnienia spoin czołowych. Mogło to wynikać z tego, że w pierwszej kolejności rysy powstawały w wypełnionych zaprawą spoinach czołowych do momentu uwolnienia niektórych wiązań zaprawy pomiędzy bloczkami w spoinach czołowych. Następnie zniszczenia przebiegały już jak w murze bez wypełnienia spoin czołowych.

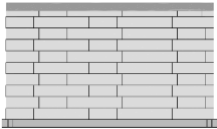
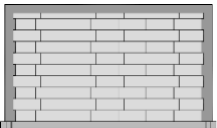
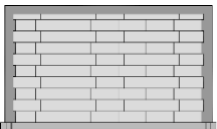


Nie stwierdzono również wpływu skrępowania na poziom sił powodujących zarysowanie modeli. Skrępowanie ścian miało natomiast istotny wpływ na poziom sił niszczących modele.

W

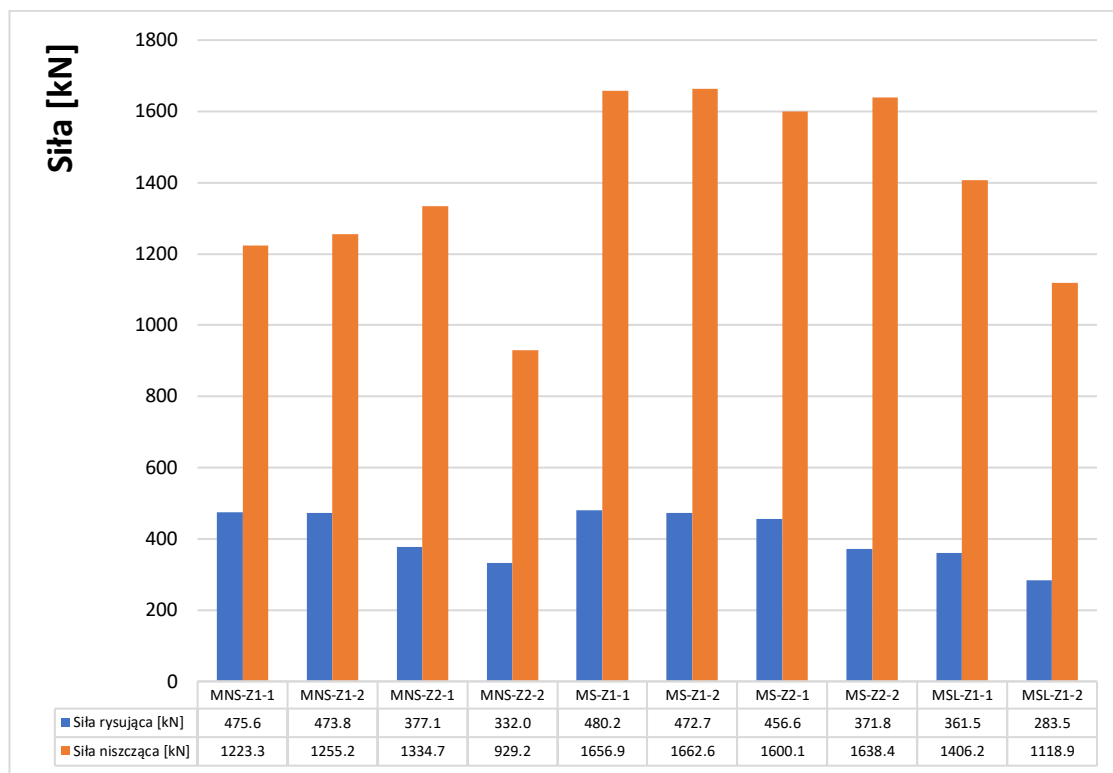
Tablica 8.1.1 zestawiono wartości sił rysujących i niszczących uśrednionych w ramach serii oraz zmienność modeli skrępowanych względem modelu bez skrępowania – tzw. świadka. Za siły rysujące i niszczące uznano sumę obciążenia ze stalowych ram i układów ciągnowych, powiększoną o ciężar stalowych trawersów odpowiednio w momencie zniszczenia ściany i w momencie pojawienia się pierwszej rysy.

Tablica 8.1.1 Siły rysujące i niszczące w modelach pełnych murów bez skrępowania i ze skrępowaniem

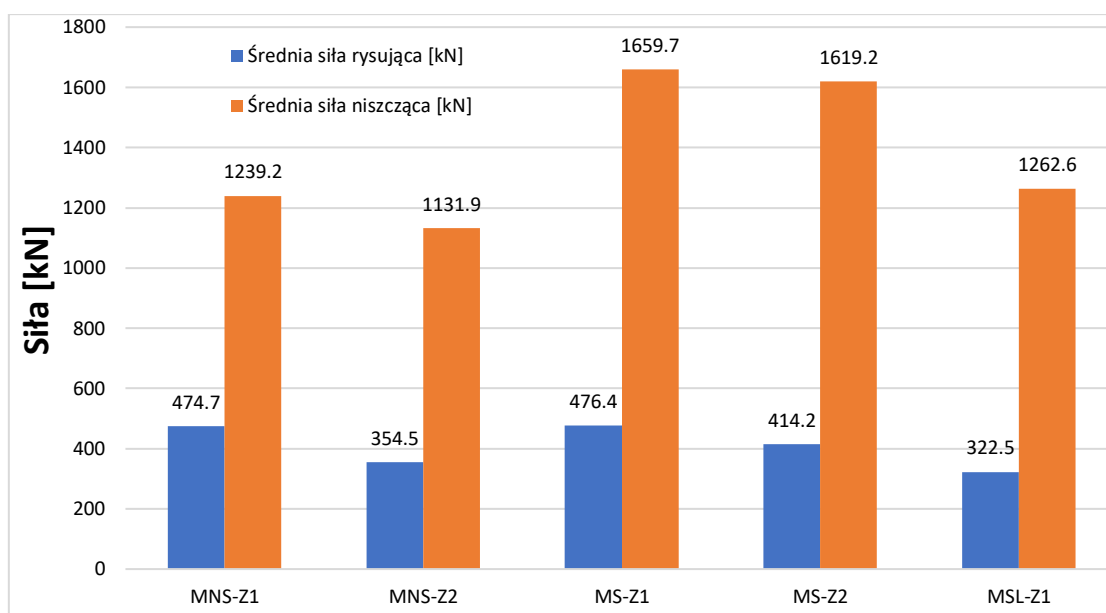
Schemat	Nazwa serii	Oznaczenie	Siła rysująca [kN]	Średnia siła rysująca [kN]	Siła niszcząca [kN]	Średnia siła niszcząca [kN]
	MNS-Z1 mur nieskrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MNS-Z1-1	475,6	474,7	1223,3	1239,2
		MNS-Z1-2	473,8		1255,2	
	MNS-Z2 mur nieskrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MNS-Z2-1	377,1	354,5	1334,7	1131,9
		MNS-Z2-2	332,0		929,2	
	MS-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MS-Z1-1	480,2	476,4	1656,9	1659,7
		MS-Z1-2	472,7		1662,6	
	MS-Z2 mur skrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MS-Z2-1	456,6	414,2	1600,1	1619,2
		MS-Z2-2	371,8		1638,4	
	MSL-Z1 mur skrępowany betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSL-Z1-1	361,5	322,5	1406,2	1262,6
		MSL-Z1-2	283,5		1118,9	



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 8.1.1 Wykres - siły rysujące i niszczące w modelach murów pełnych



Rys. 8.1.2 Wykres – uśrednione siły rysujące i niszczące w modelach murów pełnych

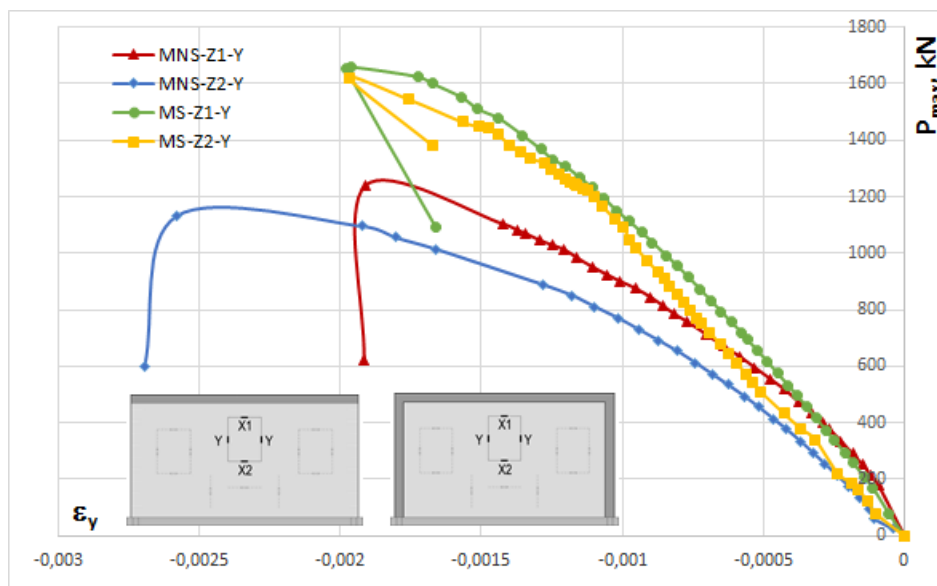


Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

W przypadku modeli z niewypełnionymi spoinami czołowymi skrępowanie spowodowało wzrost nośności modeli średnio o 33,9%, a w przypadku modeli z wypełnionymi spoinami czołowymi skrępowanie spowodowało wzrost nośności modeli średnio o 43,0%. Średnia rysoodporność odpowiednio wzrosła o 0,4% - dla murów skrępowanych bez wypełnienia spoin czołowych oraz o 16,8% - dla murów skrępowanych z wypełnieniem spoin czołowych.

Wzrosty te widać również na uśrednionych wykresach siła-odkształcenie. Na Rys. 8.1.3, Rys. 8.1.4, Rys. 8.1.5 przedstawiono uśrednione wyniki badań obu serii. Na Rys. 8.1.3 pokazano zależności siła- odkształcenie pionowe, na Rys. 8.1.4 siła-odkształcenie poziome mierzone na czujnikach górnych, na Rys. 8.1.5 siła-odkształcenie poziome mierzone na czujnikach dolnych, natomiast Rys. 8.1.6 pokazuje zależności maksymalnych sił oraz odkształcalności muru na różnych poziomach.

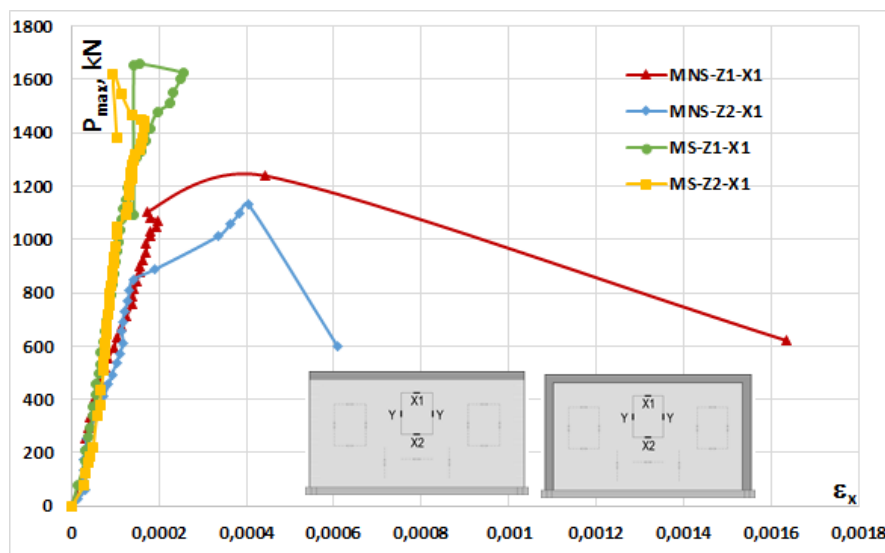
Natomiast z zestawionych wyników w Tablica 8.1.1 oraz Rys. 8.1.1 oraz Rys. 8.1.2 widać, że wpływ skrępowania elementami żelbetowymi wykonanymi z betonu lekkiego nie ma żadnego znaczenia w stosunku do modeli murów bez skrępowania. Siła niszcząca była wyższa o 1,9%, a siła rysująca była znacznie niższa w stosunku do modelu bez skrępowania.



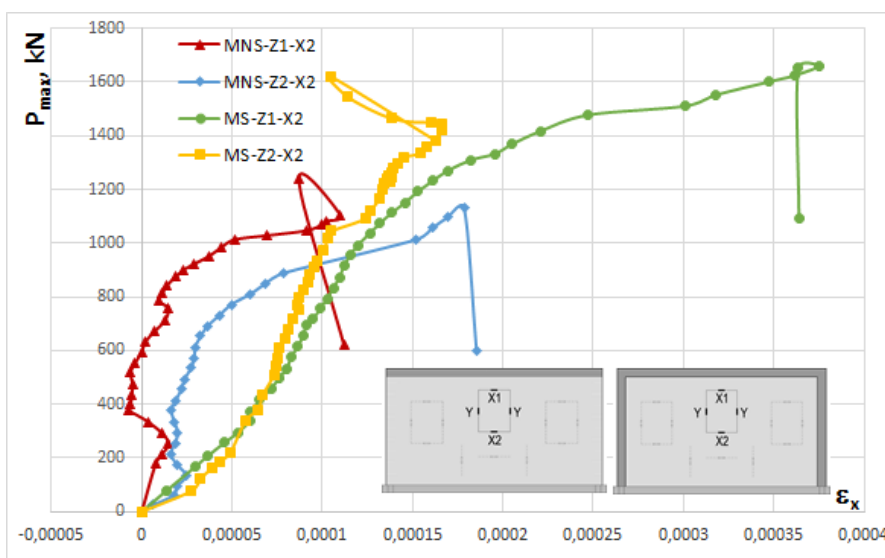
Rys. 8.1.3 Uśrednione wyniki w ramach serii zależności σ_y - ϵ_y



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



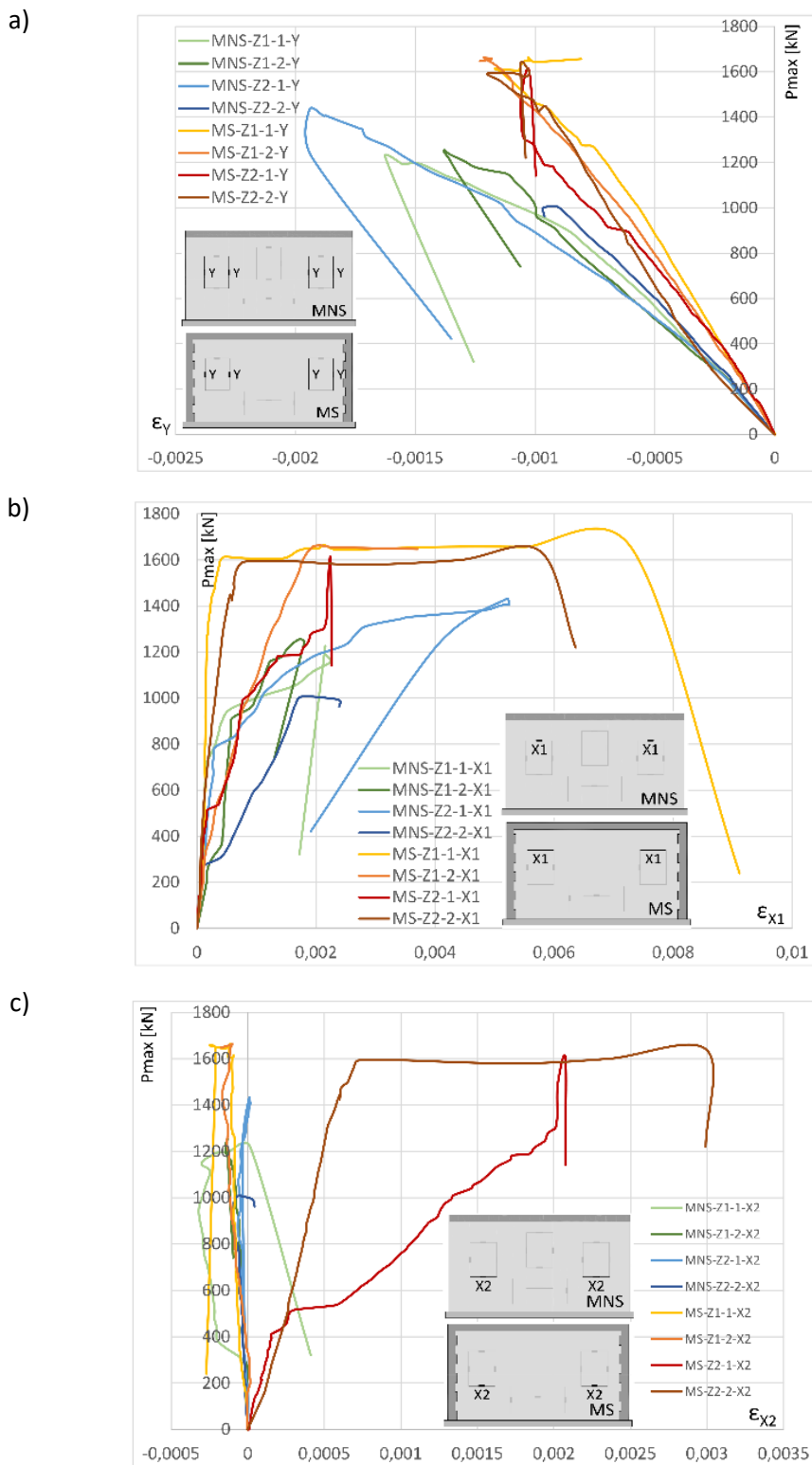
Rys. 8.1.4 Uśrednione wyniki w ramach serii zależności σ_y - ϵ_{x1} (górne czujniki)



Rys. 8.1.5 Uśrednione wyniki w ramach serii zależności σ_y - ϵ_{x2} (dolne czujniki)



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 8.1.6 Wykresy z badań nieskrępowanych i skrępowanych ścian pełnych: a) maksymalna siła – odkształcenie pionowe, b) maksymalna siła – odkształcenie poziome na górnych czujnikach c) maksymalna siła – odkształcenie poziome na dolnych czujnikach



8.2. Porównanie i analiza wyników badań murów z otworem

W Tablica 8.2.1 zestawiono siły rysujące i niszczące dla wszystkich modeli murów z otworem, a więc modele z nadprożem z ABK bez skrępowania (tzw. świadki), modele z nadprożem z ABK skrępowane żelbetem pojedynczo i podwójnie, modele skrępowane betonem lekkim oraz modele skrępowane pojedynczo i podwójnie z nadprożem żelbetowym. Dla zilustrowania pokazano te wartości na wykresach: Rys. 8.2.1 oraz Rys. 8.2.2.

Jak w każdym badaniu za siły te uznano sumę obciążenia ze stalowych ram i układów ciągnowych, powiększoną o ciężar stalowych trawersów odpowiednio w momencie zniszczenia ściany i w momencie pojawienia się pierwszej rysy.

Jak w przypadku modeli bez otworu, również w przypadku modeli z otworem nie stwierdzono istotnego wpływu wypełnienia spoin czołowych zaprawą murarską zarówno na nośność modeli skrępowanych, jak i nieskrępowanych. Widać to w Tablica 8.2.1 oraz na Rys. 8.2.1. W modelu bez skrępowania z otworem MNSO-Z2-1 doszło do zawalenia się części ściany przy krawędzi modelu, wzdłuż krawędzi zarysowania. Rysy ukośne występowały również w modelach skrępowanych, przy czym ich rozwarcie było znacznie mniejsze i nie przekraczało 0,5 mm. Nie stwierdzono ponadto wpływu skrępowania na poziom sił powodujących zarysowanie modeli z zewnętrznym skrępowaniem, co związane było z pojawieniem się pierwszych rys zawsze w nadprożach. Jedynie w murach z dodatkowymi elementami krępującymi przy otworach stwierdzono wyraźny wzrost poziomu naprężeń rysujących, który w modelach z niewypełnionymi spoinami pionowymi wynosił 59,4% - w porównaniu do modeli nieskrępowanych i 49,2% w porównaniu do modeli skrępowanych tylko zewnątrz. Oczywiście, wzrost ten wynika z utwierdzenia nadproży w żelbetowych wewnętrznych rdzeniach. Wzrost średnich naprężeń rysujących modele z dodatkowymi elementami krępującymi przy otworach w modelach z wypełnionymi spoinami pionowymi wynosił 56,4% - w porównaniu do modeli nieskrępowanych i 65,4% - w porównaniu do modeli skrępowanych tylko zewnątrz. Widać to po wynikach w Tablica 8.2.1 oraz na Rys. 8.2.2.

Skrępowanie ścian miało również istotny wpływ na poziom sił niszczących modele jedynie w razie zastosowania dodatkowych elementów krępujących. W wypadku modeli z niewypełnionymi spoinami czołowymi skrępowanie czterema rdzeniami spowodowało wzrost nośności modeli średnio o ponad 29,6% w porównaniu do modeli nieskrępowanych, a w przypadku modeli



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

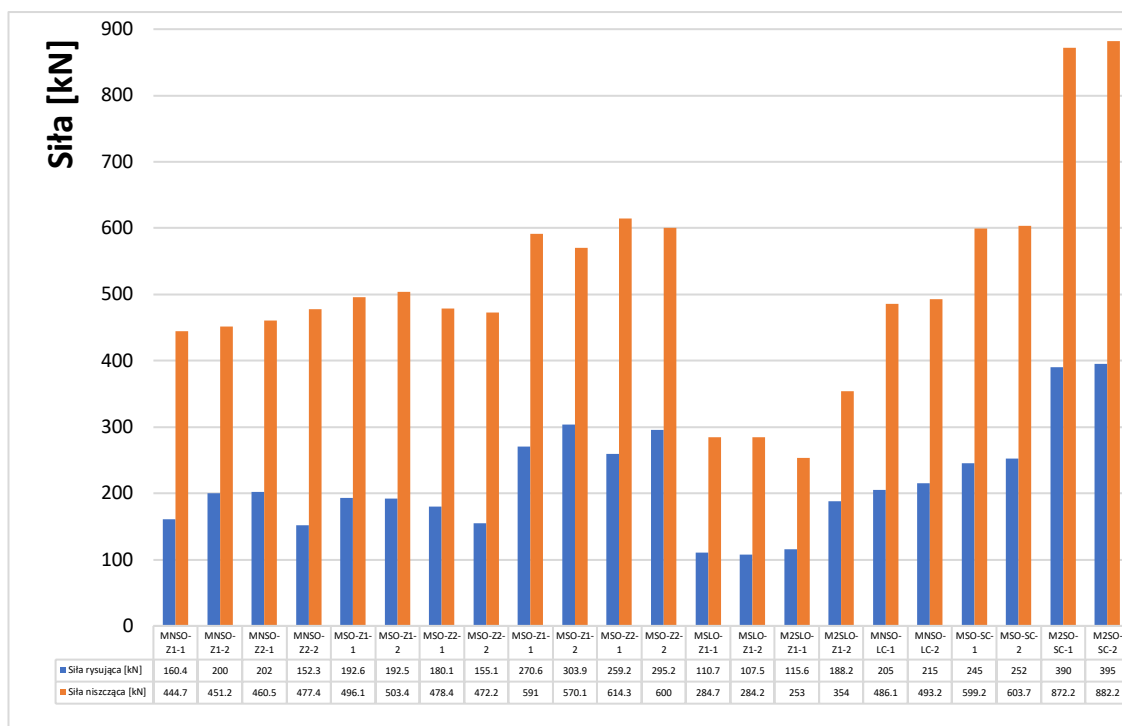
z wypełnionymi spoinami wzrost ten wyniósł 29,5%. Wzrosty te widać wyraźnie w Tablica 8.2.1 oraz na Rys. 8.2.2 i na uśrednionych wykresach siła-odkształcenie.

Tablica 8.2.1 Siły rysujące i niszczące w modelach murów z otworem bez skrępowania i ze skrępowaniem (również betonem lekkim oraz z nadprożem żelbetowym)

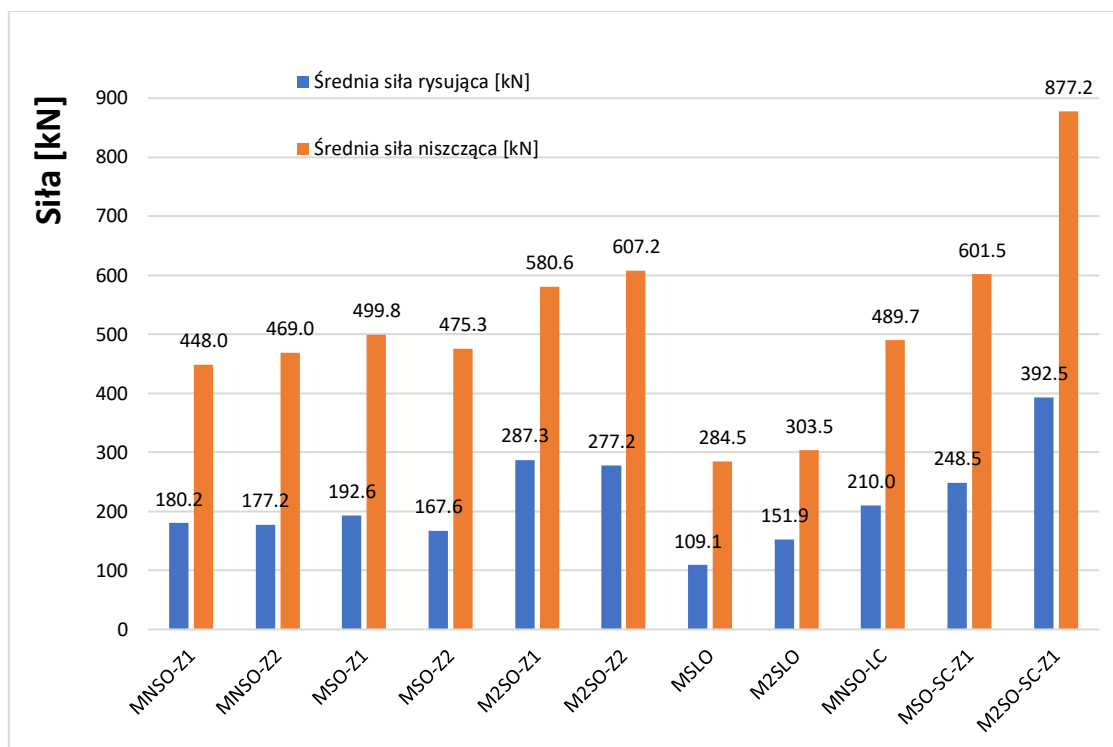
Schemat	Nazwa serii oraz opis	oznaczenie	Siła rysująca [kN]	Średnia siła rysująca [kN]	Siła niszcząca [kN]	Średnia siła niszcząca [kN]
	MNSO-Z1 mur nieskrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MNSO-Z1-1	160,4	180,2	444,7	448,0
		MNSO-Z1-2	200,0		451,2	
	MNSO-Z2 mur nieskrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MNSO-Z2-1	202,0	177,2	460,5	469,0
		MNSO-Z2-2	152,3		477,4	
	MSO-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z1-1	192,6	192,6	496,1	499,8
		MSO-Z1-2	192,5		503,4	
	MSO-Z2 mur skrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z2-1	180,1	167,6	478,4	475,3
		MSO-Z2-2	155,1		472,2	
	M2SO-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z1-1	270,6	287,3	591,0	580,6
		MSO-Z1-2	303,9		570,1	
	M2SO-Z2 mur skrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z2-1	259,2	277,2	614,3	607,2
		MSO-Z2-2	295,2		600,0	
	MSLO mur skrępowany betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSLO-Z1-1	110,7	109,1	284,7	284,5
		MSLO-Z1-2	107,5		284,2	
	M2SLO mur skrępowany betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi	M2SLO-Z1-1	115,6	151,9	253,0	303,5
		M2SLO-Z1-2	188,2		354,0	
	MNSO-LC mur nieskrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi oraz nadprożem żelbetowym	MNSO-LC-1	205,0	210,0	486,1	489,7
		MNSO-LC-2	215,0		493,2	
	MSO-SC-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi oraz nadprożem żelbetowym	MSO-SC-1	245,0	248,5	599,2	601,5
		MSO-SC-2	252,0		603,7	
	M2SO-SC-Z1 mur skrępowany podwójnie z niewypełnionymi spoinami czołowymi oraz nadprożem żelbetowym	M2SO-SC-1	390,0	392,5	872,2	877,2
		M2SO-SC-2	395,0		882,2	



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odcztałcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 8.2.1 Wykres - siły rysujące i niszczące w modelach murów z otworem



Rys. 8.2.2 Wykres – uśrednione siły rysujące i niszczące w modelach murów z otworem



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

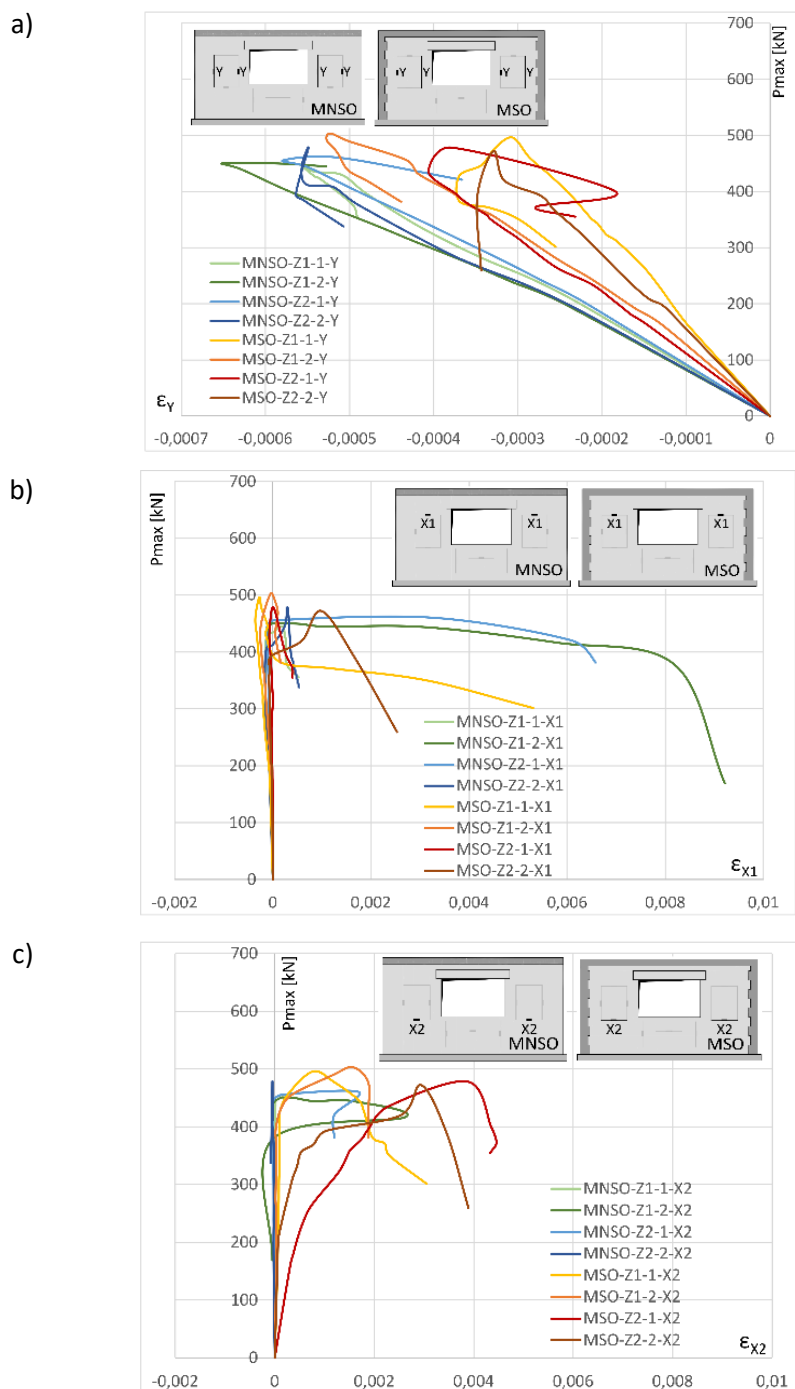
W przypadku modeli skrępowanych z nadprożem żelbetowym (które były przedmiotem badań dodatkowych) odnotowano polepszenie odporności na zarysowanie i na zniszczenie. Wzrost naprężeń rysujących dla tych modeli z pojedynczym skrępowaniem wynosił 37,9% oraz dla modeli z dodatkowym skrępowaniem 117,9%, natomiast naprężeń niszczących dla modeli z pojedynczym skrępowaniem 34,3% oraz dla modeli z dodatkowym skrępowaniem 95,8% w stosunku do modeli bez skrępowania i z nadprożem z ABK.

Jeśli chodzi o skrępowanie betonem lekkim, to nie miało to wpływu na polepszenie odporności muru na zarysowanie oraz na zniszczenie. Wręcz zanotowano pogorszenie tych właściwości, ponieważ poziomy naprężeń rysujących oraz naprężeń niszczących się zmniejszyły w stosunku do świadców.

Na Rys. 8.2.3 pokazano zależności siła-odkształcenie pionowe, oraz siła-odkształcenie poziome mierzone na czujnikach zabudowanych wyżej, a na Rys. 8.2.4 siła-odkształcenie poziome mierzone na czujnikach zabudowanych niżej. Warto zauważyć, że w murach skrępowanych tylko zewnętrznie wypełnienie spoin pionowych spowodowało zmniejszenie odkształceń pionowych. Podobna tendencja jest zauważalna w modelach z dodatkowymi rdzeniami (niezależnie od wypełniania spoin w murze). W modelach z dodatkowymi elementami krępującymi przy otworach zniszczenie występowało w nadprożu i murze nad nadprożem. Dochodziło do zarysowania żelbetowego rygla górnego. Wpływ nadproży z ABK w murach skrępowanych opisano w pracy [15].



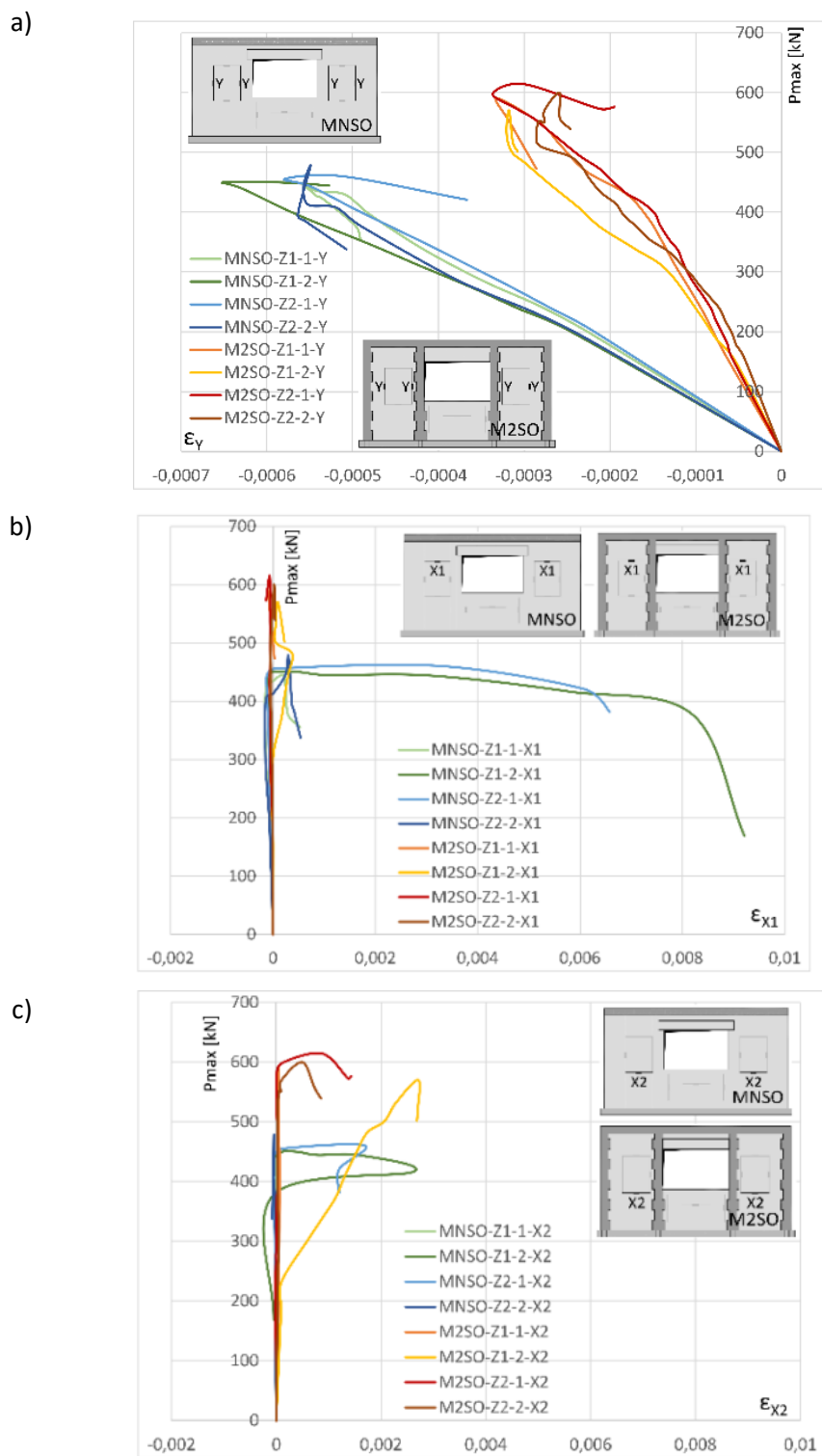
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 8.2.3 Wykresy z badań nieskrępowanych i skrępowanych zewnętrznie ścian z otworem:
a) maksymalna siła – odkształcenie pionowe,
b) maksymalna siła – odkształcenie poziome na górnych czujnikach,
c) maksymalna siła – odkształcenie poziome na dolnych czujnikach



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 8.2.4 Wykresy z badań nieskrępowanych i skrępowanych zewnętrznie i wewnętrznie ścian z otworem:
a) maksymalna siła – odkształcenie pionowe,
b) maksymalna siła – odkształcenie poziome na górnych czujnikach,
c) maksymalna siła – odkształcenie poziome na dolnych czujnikach



8.3. Porównanie murów pełnych z murami z otworem

Dla uzyskania pełnego obrazu badań zestawiono wszystkie wyniki badanych murów (z badań zasadniczych oraz badań dodatkowych – modele z nadprożem żelbetowym) w Tablica 8.3.1. Graficznie też zaprezentowano wyniki na wykresach sił rysujących i niszczących Rys. 8.3.1 oraz średnich sił rysujących i niszczących Rys. 8.3.2.

Z porównania wyników modeli murów bez otworu do wyników modeli murów z otworem można stwierdzić, że wpływ otworu w murze na wartości sił rysujących i niszczących jest istotny. Nawet to, co wynikało z badań dodatkowych - modele z otworem oraz z podwójnym skrępowaniem i nadprożem żelbetowym nie osiągnęły takich naprężeń rysujących i niszczących jak modele murów pełnych.

Na Rys. 8.3.3a pokazano porównanie wykresów siła-odkształcenie uzyskanych z badań ścian bez skrępowania, wzniesionych bez wypełnienia spoin czołowych – ścian pełnych oraz z otworem. Na Rys. 8.3.3b pokazano analogiczne wykresy murów bez skrępowania, wzniesionych z wypełnieniem spoin czołowych - pełnych i z otworem. W obu przypadkach widać znaczny spadek wartości siły rysującej i niszczącej, które w ścianach z niewypełnionymi spoinami czołowymi wyniosły odpowiednio 62,0% - siła rysująca oraz 63,9% - siła niszcząca, a w ścianach z wypełnionymi spoinami odpowiednio 50,0% - siła rysująca oraz 58,6% - siła niszcząca. To samo wynika z Rys. 8.3.1.

Jeśli się porówna analogiczne modele skrępowane pełne do modeli skrępowanych obwodowo z otworem, to spadki sił rysujących oraz niszczących są znaczne (59,6% – siła rysująca oraz 69,9% siła niszcząca - w modelach z niewypełnionymi spoinami czołowymi) oraz (59,5% - siła rysująca oraz 70,6% siła niszcząca - w modelach z wypełnionymi spoinami czołowymi). Widać zatem duże podobieństwo spadków przy porównaniu modeli skrępowanych bez otworu z modelem skrępowanym obwodowo z otworem. Również zanotowano spadki dla modeli skrępowanych podwójnie z otworem vs. mur bez otworu ze skrępowaniem.

Spadek nośności modeli z otworem względem modeli bez otworu zależy oczywiście od nośności i sztywności nadproża oraz od nośności muru na obciążenia skupione (reakcja z nadproża).



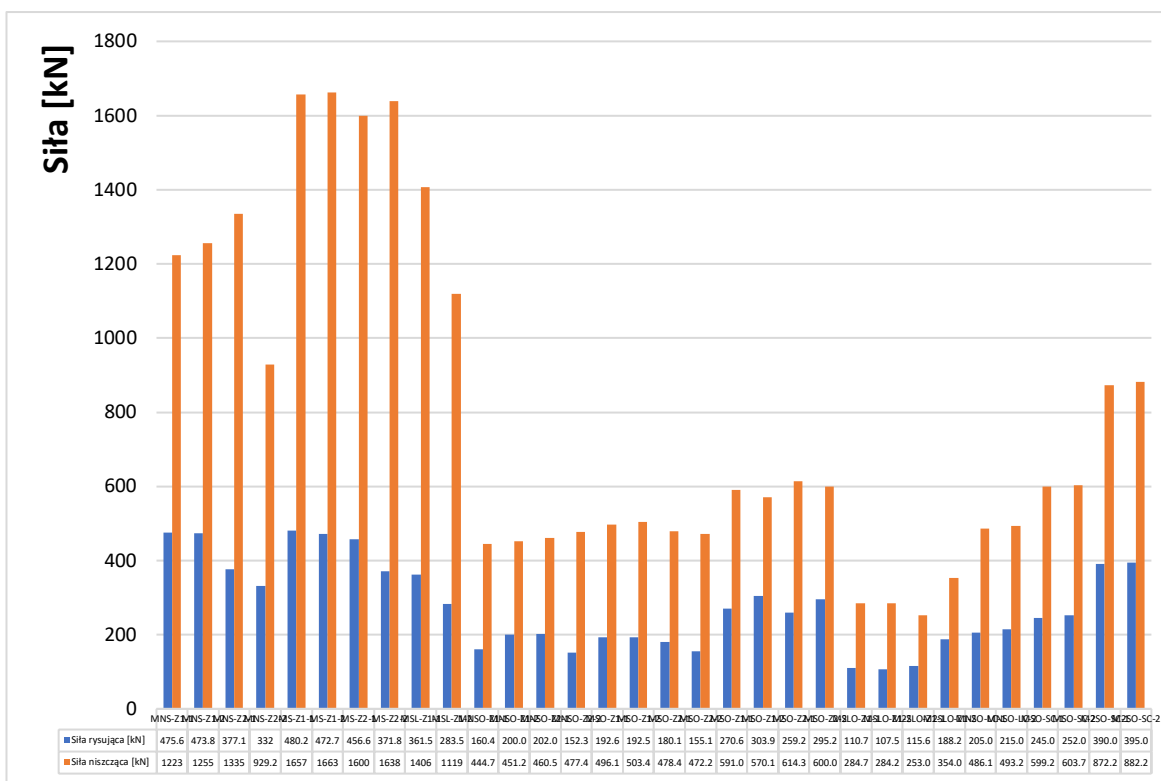
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 8.3.1 Zestawienie wyników sił w badanych murach

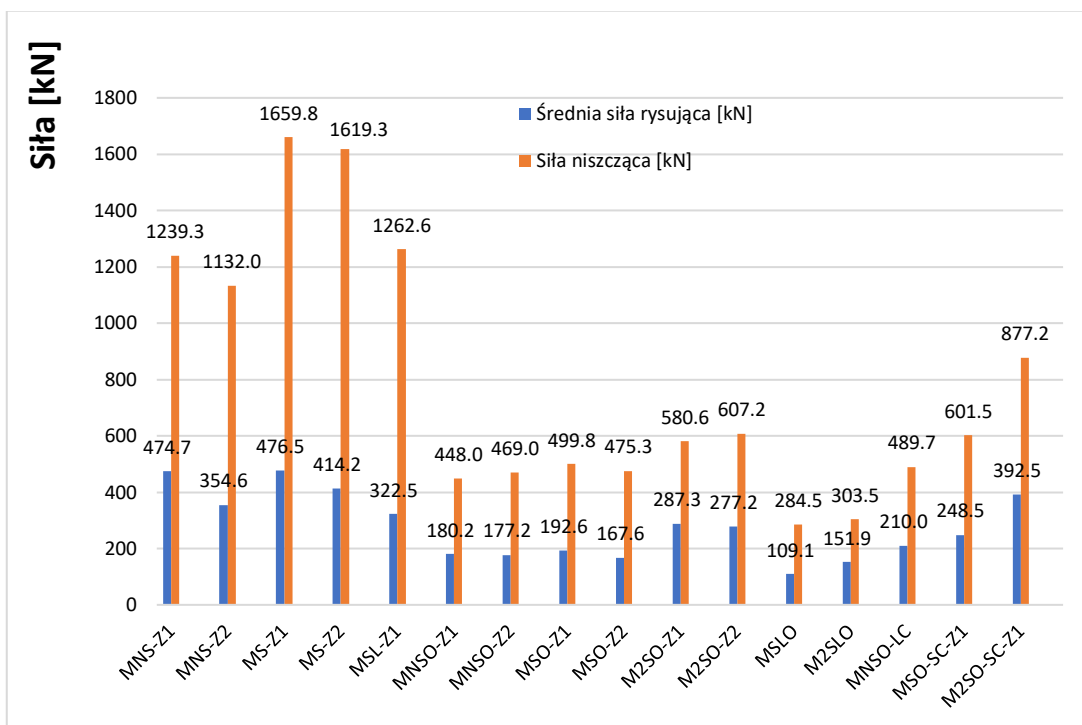
Schemat	Nazwa serii oraz opis	oznaczenie	Siła rysująca [kN]	Średnia siła rysująca [kN]	Siła niszcząca [kN]	Średnia siła niszcząca [kN]
	MNS-Z1 mur nieskrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MNS-Z1-1	475,6	474,7	1223,3	1239,3
		MNS-Z1-2	473,8		1255,2	
	MNS-Z2 mur nieskrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MNS-Z2-1	377,1	354,6	1334,7	1132,0
		MNS-Z2-2	332		929,2	
	MS-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MS-Z1-1	480,2	476,5	1656,9	1659,8
		MS-Z1-2	472,7		1662,6	
	MS-Z2 mur skrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MS-Z2-1	456,6	414,2	1600,1	1619,3
		MS-Z2-2	371,8		1638,4	
	MSL-Z1 mur skrępowany betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSL-Z1-1	361,5	322,5	1406,2	1262,6
		MSL-Z1-2	283,5		1118,9	
	MNSO-Z1 mur nieskrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MNSO-Z1-1	160,4	180,2	444,7	448,0
		MNSO-Z1-2	200,0		451,2	
	MNSO-Z2 mur nieskrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MNSO-Z2-1	202,0	177,2	460,5	469,0
		MNSO-Z2-2	152,3		477,4	
	MSO-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z1-1	192,6	192,6	496,1	499,8
		MSO-Z1-2	192,5		503,4	
	MSO-Z2 mur skrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z2-1	180,1	167,6	478,4	475,3
		MSO-Z2-2	155,1		472,2	
	M2SO-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z1-1	270,6	287,3	591,0	580,6
		MSO-Z1-2	303,9		570,1	
	M2SO-Z2 mur skrępowany z wypełnionymi spoinami czołowymi	MSO-Z2-1	259,2	277,2	614,3	607,2
		MSO-Z2-2	295,2		600,0	
	MSLO mur skrępowany betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi	MSLO-Z1-1	110,7	109,1	284,7	284,5
		MSLO-Z1-2	107,5		284,2	
	M2SLO mur skrępowany betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi	M2SLO-Z1-1	115,6	151,9	253,0	303,5
		M2SLO-Z1-2	188,2		354,0	
	MNSO-LC mur nieskrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi oraz nadprożem żelbetowym	MNSO-LC-1	205,0	210,0	486,1	489,7
		MNSO-LC-2	215,0		493,2	
	MSO-SC-Z1 mur skrępowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi oraz nadprożem żelbetowym	MSO-SC-1	245,0	248,5	599,2	601,5
		MSO-SC-2	252,0		603,7	
	M2SO-SC-Z1 mur skrępowany podwójnie z niewypełnionymi spoinami czołowymi oraz nadprożem żelbetowym	M2SO-SC-1	390,0	392,5	872,2	877,2
		M2SO-SC-2	395,0		882,2	



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 8.3.1 Wykres - siły rysujące i niszczące w modelach murów pełnych i z otworem

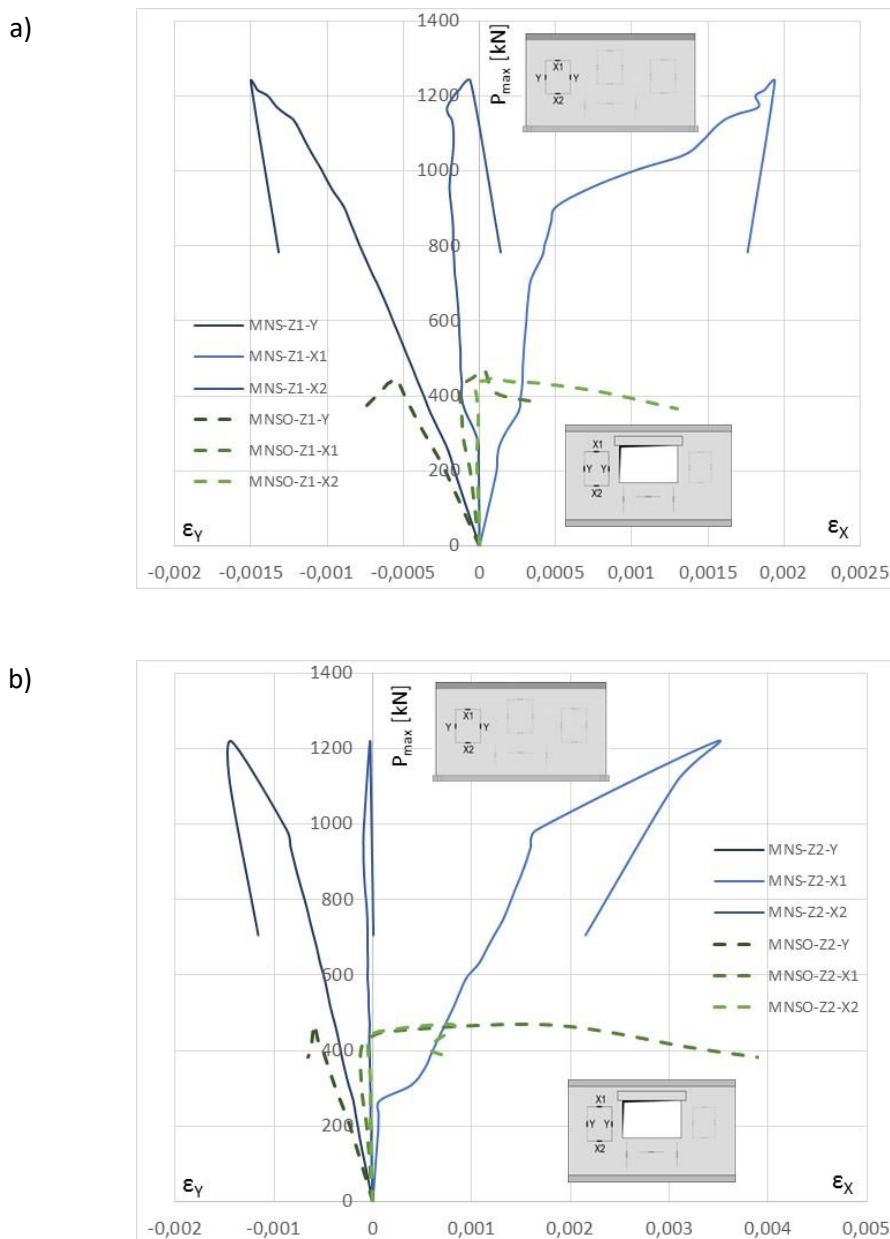


Rys. 8.3.2 Wykres – uśrednione siły rysujące i niszczące w modelach murów pełnych i z otworem



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

W badaniach zastosowano prefabrykowane zbrojone nadproża z betonu komórkowego. Nadproża te cechują się dobrą nośnością i sztywnością, a mimo to w murach z otworem zanotowano znaczne spadki sił rysujących i niszczących. Wpływ otworu w murach skrępowanych opisano w pracy [32].



Rys. 8.3.3 Porównanie uśrednionych wykresów siła-odkształcenie modeli bez otworu i z otworem: a) ściany z niewypełnionymi spoinami pionowymi, b) ściany z wypełnionymi spoinami pionowymi



Przeprowadzone badania wykazały, że ściany z otworem cechują się nośnością i rysoodpornością mniejszą o nawet 2/3 w porównaniu do nośności i rysoodporności ściany pełnej. Nośność ściany z otworem zależy od nośności i sztywności samego nadproża oraz od nośności muru na obciążenia skupione wywołane reakcją z nadproża. Widać to po siłach rysujących i niszczących w modelach z nadprożem żelbetowym.

Nie stwierdzono istotnego wpływu wypełnienia spoin pionowych na uzyskane wyniki sił rysujących i niszczących zarówno w ścianach pełnych jak i z otworem.

9. Analizy obliczeniowe

9.1. Nośność murów skrępowanych według projektu oraz najnowszej wersji EC6

Przeprowadzono obliczenia badanych skrępowanych ścian ściskanych z ABK, opisanych w rozdziale 4.5 niniejszej pracy. Obliczenia wykonano zgodnie z projektem Eurokodu według algorytmu obliczeń ścian obciążonych głównie pionowo. [N26]Nośność muru skrępowanego obliczono według wzoru (55) oraz wg wzoru (54). Do obliczeń przyjęto parametry materiałowe uzyskane z badań. Do obliczeń przyjęto ponadto charakterystyczną granicę plastyczności stali. Parametry przyjęte do obliczeń ujęto w Tablica 9.1.1.

Tablica 9.1.1 Parametry przyjęte do obliczeń

Parametr	Przyjęta wartość
Wytrzymałość na ściskanie muru z niewypełnionymi spoinami czołowymi f_{z1}	2,97 N/mm ²
Wytrzymałość na ściskanie muru z wypełnionymi spoinami czołowymi f_{z2}	2,61 N/mm ²
Moduł sprężystości muru z niewypełnionymi spoinami czołowymi E_{z1}	2040 N/mm ²
Moduł sprężystości muru z wypełnionymi spoinami czołowymi E_{z2}	2447 N/mm ²
Wysokość ściany h	2,49 m
Długość całego modelu l	4,425 m
Długość części murowanej modelu (między rdzeniami) l_m	3,965 m
Wytrzymałość stali zbrojeniowej f_y	500 N/mm ²
Końcowa wartość współczynnika pełzania ϕ_∞	1,5



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Sztywność krępujących rdzeni była mniejsza od sztywności ściany o długości 1/5 wysokości. Nie został zatem spełniony warunek zamieszczony w punkcie 7.5.1.3 (6) nowej edycji normy PN- EN 1996-1-1 [N18]. Dlatego przyjęto współczynnik redukcji wysokości efektywnej ściany $\rho_2 = 1,0$. Ponieważ modele nie były obciążone stropami i były obciążone osiowo w obliczeniach uwzględniono tylko mimośród niezamierzony e_{init} . Obliczenia wykonano w trzech przekrojach: górnym, dolnym i środkowym. Największe wyężenie uzyskano w przekrojach środkowych. W Tablica 9.1.2 przedstawiono wyniki obliczeń nośności badanych modeli w przekroju środkowym. Wyniki te porównano ze średnimi wynikami uzyskanymi z badań, uwzględniając dodatkowo obciążenie ciężarem połowy ściany oraz stalowego osprzętu. Na Rys. 9.1.1 zilustrowano zgodność wyników z badań z PrEN EC6 [N26] oraz EN EC6 [N18].

Tablica 9.1.2 Porównanie wyników badań z wynikami obliczeń

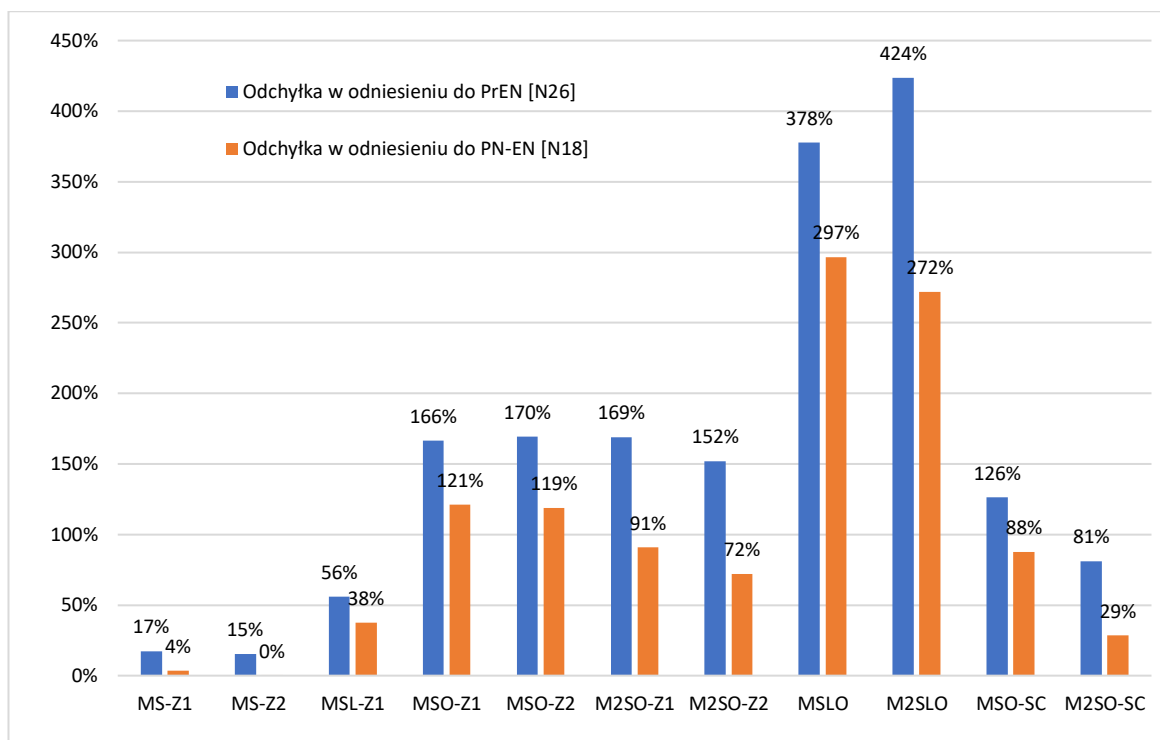
Model	Całkowite obciążenie modeli laboratoryjnych powiększone o połowę ciężaru modelu i ciężar stalowego osprzętu, N_E , [kN]	Obliczona według wzoru (55) nośność ściany skrępowanej w przekroju środkowym, $N_{Rm(1)}$, [kN]	Obliczona według wzoru (54) nośność ściany bez skrępowania w przekroju środkowym, $N_{Rm(2)}$, [kN]	$N_{Rm(1)} / N_E$	$N_{Rm(2)} / N_E$
MS-Z1	1675,2	1967,5	1736,8	1,17	1,04
MS-Z2	1631,0	1882,6	1635,5	1,15	1,00
MSL-Z1	1262,6	1967,5	1736,8	1,56	1,38
MSO-Z1	510,3	1359,1	1128,5	2,66	2,21
MSO-Z2	485,8	1309,7	1062,6	2,70	2,19
M2SO-Z1	591,0	1589,8	1128,5	2,69	1,91
M2SO-Z2	617,6	1556,9	1062,6	2,52	1,72
MSLO	284,5	1359,1	1128,5	4,78	3,97
M2SLO	303,5	1589,8	1128,5	5,24	3,72
MSO-SC	601,0	1359,1	1128,5	2,26	1,88
M2SO-SC	877,2	1589,8	1128,5	1,81	1,29

Porównując wyniki nośności uzyskanych z obliczeń z wynikami przeprowadzonych badań modeli stwierdzić można, że model obliczeniowy przyjęty w projekcie EC6 dość dobrze opisuje ściany pełne. Paradoksalnie idealną wręcz zgodność uzyskano ze wzoru (54) zamieszczonego w finalnej wersji EC6 [N18], który jednak nie uwzględnia wpływu skrępowania. Zgodnie z najnowszą wersją normy [N18] nie ma obliczeniowej różnicy między ścianą skrępowaną i nieskrępowaną, a przecież taki wpływ na poziomie 34÷43% został w badaniach wykazany. Większe niedoszacowania



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

występują w obliczeniach murów pełnych skrępowanych betonem lekkim, co wynika z braku uwzględnienia wytrzymałości tego betonu we wzorze (55).



Rys. 9.1.1 Wykres – zgodność nośności z wyników z badań z PrEN EC6 [N26] oraz EN EC6 [N18]

Jak widać z Tablica 9.1.2 oraz Rys. 9.1.1 znacznie większe rozbieżności, w porównaniu do ścian pełnych, stwierdzono pomiędzy obliczeniami i wynikami badań murów z otworem. Nośność uzyskana z obliczeń w przypadku skrępowania betonem zwykłym, jest wyższa od sił uzyskanych w badaniach o 72÷170%. W przypadku skrępowania betonem lekkim następuje znaczne, ponad czterokrotne przeszacowanie nośności. Tak znaczna różnica wynika z faktu zastosowania nadproży. Ściany z otworem rysowały się i niszczyły właśnie w rejonie oparcia nadproży z ABK oraz żelbetowych. Model obliczeniowy zamieszczony w EC6 w ogóle nie uwzględnia nośności nadproża ani sił docisku w strefie jego oparcia na murze.

9.2. Analizy numeryczne

Dla każdego modelu badawczego wykonano model numeryczny ściany. Wykorzystano symetrię modeli badawczych w modelu numerycznym, dlatego wykonano połowę ściany. Do opisu zachowania materiału w stanie ściskania zastosowano opis sprężysto-plastyczny oparty



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

na powierzchni Menétrey'a-Willama [74]. W modelach materiałowych uwzględnione zostały następujące właściwości materiału:

- nieliniowe zachowanie w stanie ściskania z uwzględnieniem wzmocnienia i osłabienia,
- pękanie (zarysowanie) materiału w wyniku rozciągania oparte na nieliniowej mechanice pękania,
- ustalone kryterium zniszczenia materiału znajdującego się w dwuosiowym stanie naprężenia,
- efekt osłabienia materiału w wyniku rozciągania,
- redukcję sztywności ścinania po zarysowaniu,
- możliwość modelowania rysy o ustalonym lub zmiennym kierunku.

Zastosowana powierzchnia graniczna umożliwia dostosowanie kształtu w przekroju dewiatorowym do wyników badań konkretnego materiału. Do opisu zachowania materiału w stanie rozciągania zastosowano kryterium Rankine'a z modelem rozmytych rys o stałych kierunkach, z wykładniczą funkcją osłabienia. Do zamodelowania stalowego zbrojenia zastosowano powierzchnię plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego. Model materiałowy został wykalibrowany na podstawie badań materiałowych przez Jasińskiego [63], [58], [62]. Szczegółowy opis modelu zamieszczono w pracy [16].

Obliczenia wykonano w systemie ATENA 2D stosując model materiału 3D Non Linear Cementitious 2. Zastosowano modele materiałowe umożliwiające analizę w płaskim i przestrzennym stanie naprężeń: sprężysty model z degradacją (SBeta Material) w przypadku betonowych elementów krępujących oraz sprężysto-plastyczny model z degradacją (3D Non Linear Cementitious 2) do modelowania muru oraz nadproży [6].

Modelowano ściany z niewypełnionym spoinami czołowymi. Wykorzystując symetrię modeli badawczych modelowano połowę modelu laboratoryjnego wraz ze stalowymi elementami stanowiska badawczego. Elementom murowym i nadprożom z autoklawizowanego betonu komórkowego nadano model sprężysto-plastyczny o parametrach podanych w Tablica 9.2.1. W spoinach wspornych i w spoinach czołowych, a także pomiędzy murem a żelbetem wprowadzono elementy kontaktowe o parametrach ujętych w Tablica 9.2.2. Stalowemu zbrojeniu umieszczonemu w nadprożu nadano model sprężysto-plastyczny z parametrami zestawionymi w Tablica 9.2.3. Żelbetowym elementom nadano materiał sprężysty z degradacją o parametrach



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

podanych w Tablica 9.2.4. Do zamodelowania muru i nadproży zastosowano czterowęzłowe elementy skończone o dwóch stopniach swobody w każdym węźle oraz płaski stan naprężeń. Długość boku każdego elementu skończonego nie była większa od 20 mm. Natomiast zbrojenie nadproży z ABK oraz zbrojenie elementów krępujących i wieńców zamodelowano przy pomocy prętowych elementów skończonych o jednym stopniu swobody w każdym węźle. Zastosowano pełną przyczepność zbrojenia do otaczającego betonu. Obciążenie w modelach fragmentów ścian przykładano sekwencyjnie, w fazach zgodnych z fazami obciążeń modeli laboratoryjnych. W fazie I przykładano obciążenia wynikające z ciężaru własnego modelu oraz stanowiska. W fazie II modelowano pierwszy etap obciążenia, czyli obciążenia poziome przekazywane przez zestaw cięgien sprężających. W fazie III modele obciążano siłami w miejscach przyłożenia obciążeń z belek trawersowych. W poszczególnych fazach obciążenie dzielono na kroki: trzy kroki w fazie I, dziesięć kroków w fazie II, natomiast w ostatniej fazie prowadzono wzrost obciążenia o 1 kN, aż do wyczerpania nośności modelu.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 9.2.1 Parametry modelu plastycznego i sprężystego ABK stosowane w obliczeniach

Parametr	Wynik badania lub wzór	Mur	Nadproże
Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie f_b , [N/mm ²]	Na podstawie badań	4.04	3.71
Odształcenie plastyczne przy ściskaniu ϵ_{cp}	Na podstawie badań	3.33 E-04	3.771
Wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie f_{bt} , [N/mm ²]	Na podstawie badań	0.61	0.61
Początkowy moduł sprężystości E_c , [N/mm ²]	Na podstawie badań	2204	2198
Współczynnik Poissona ν [-]	Na podstawie badań	0.200	0.179
Energia pękania G_f , [MN/m]	Na podstawie badań	1.07 E-05	1.602 E-05
Funkcja osłabienia przy rozciąganiu	Zakładane osłabienie opisane funkcją wykładniczą	--	--
Przemieszczenia w_c przy rozciąganiu [m]	przemieszczenia obliczono ze wzoru $w_c = 5,14G_f/f_t'w_c = 5,14 \frac{G_f}{f_t}$	4.36 E-04	--
Rozstaw rys s_{max} [m]	Zakładana wartość stała	0.5	0.5
Współczynnik redukcji wytrzymałości na rozciąganie w fazie osłabienia c_{ts}	Założona stała wartość dla materiału niezbrojonego	0	0
Model rys	O stałych kierunkach	--	--
Krytyczne przemieszczenie pod wpływem ściskania [m]	Zakładana wartość stała	-5.0 E-04	-5.0 E-04
Redukcja wytrzymałości na ściskanie spowodowana zarysowaniem f_{c-lim}	Zakładana wartość stała	0.8	0.8
Rozmiar kruszywa [m]	Ustalone na podstawie obserwacji makroskopowych elementów murowych	0.02	0.02
Kierunek uplastycznienia	Przyjęto jak dla materiału nieściśliwego	$\beta = 0$	$\beta = 0$



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 9.2.2 Parametry elementów kontaktowych na styku muru i elementów żelbetowych

Parametr	Wynik badania lub wzór	Spoiny wsporne (poziome)	Spoiny czołowe (pionowe)
Sztywność normalna K_{nn} , [MN/m]	Obliczona z równania: $K_{nn} = \frac{E}{a} 10$	3.92 E06	1.02 E06
Sztywność styczna K_{tt} , [MN/m]	Obliczona z równania: $K_{tt} = \frac{G}{a} 10$	1.67 E05	4.51 E05
Wytrzymałość na rozciąganie f_{bt} , [N/mm ²]	Zakładana wartość jak dla muru	1.5	1.5
Kohezja f_{v0}		∞	∞
Współczynnik tarcia $tg\alpha$		∞	∞
Sztywność normalna $K_{nn,min}$, [MN/m]	Obliczona jako 0.01 K_{nn}	3.92 E04	1.02 E04
Sztywność styczna $K_{tt,min}$, [MN/m]	Obliczona jako 0.01 K_{tt}	1.67 E03	4.51 E03

Tablica 9.2.3 Parametry mechaniczne stali zastosowane w modelu numerycznym

Rodzaj zbrojenia i wymiary przekroju pręta zbrojeniowego [mm]	Parametr					
	E_s [N/mm ²]	ν	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	E_T [N/mm ²]	R_t [N/mm ²]	ϵ_{lim} %
Zbrojenie główne w nadprożach (okrągłe pręty zbrojeniowe o średnicy 8 mm)	198000	0.3	520	245	544	9,9
Zbrojenie główne w nadprożach (okrągłe pręty zbrojeniowe o średnicy 8 mm)	201000		479	233	501	9,6
Zbrojenie główne w elementach krępujących (okrągłe pręty zbrojeniowe o średnicy 12 mm)	179330		616	242	644	11,9
Strzemiona w nadprożach (okrągłe pręty zbrojeniowe o średnicy 4,5 mm)	178500		685	261	716	12,3



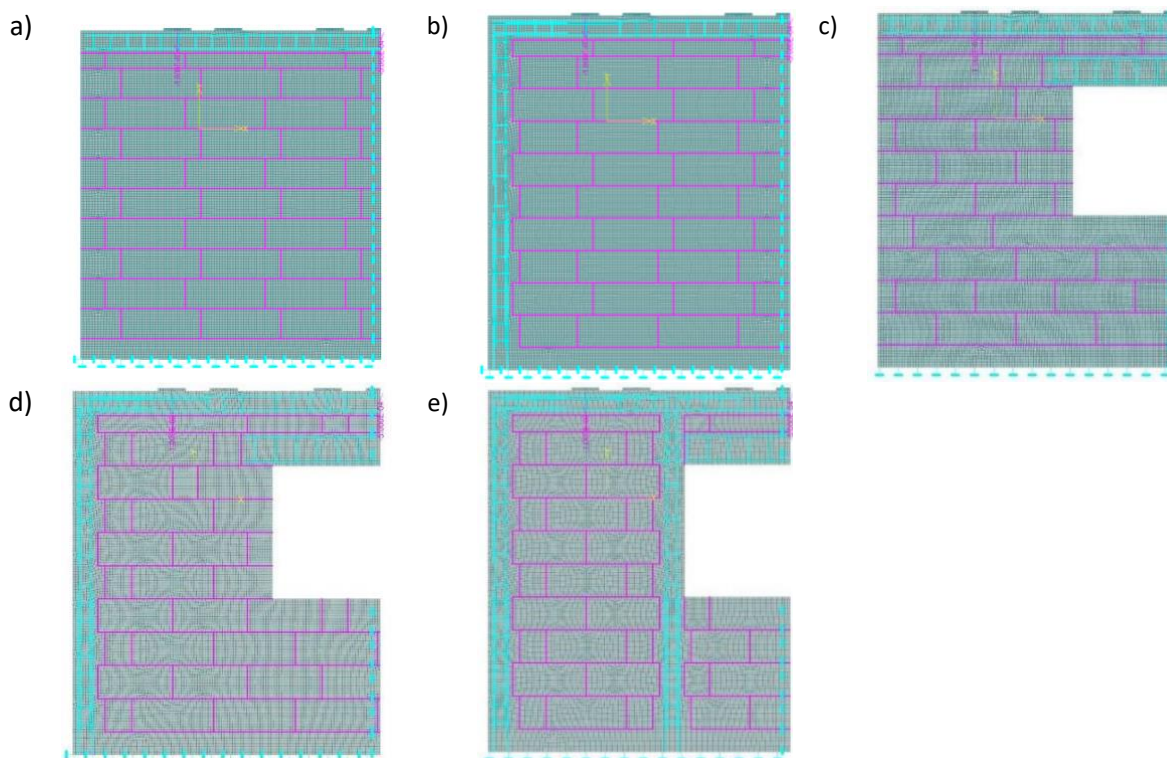
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 9.2.4 Parametry sprężystego modelu degradacji elementów betonowych stosowane w obliczeniach

Parametr	Sposób badania lub formuła	Beton w elementach krępujących
Osiowa wytrzymałość na ściskanie $f'_c = f_{c,cyl}$, [N/mm ²]	Otrzymane w wyniku badań próbek cylindrycznych $\varnothing 150 \times 300$ mm	25.5
Odształcenia odpowiadające osiowej wytrzymałości betonu na ściskanie ϵ_c		1.682×10^{-3}
Osiowa wytrzymałość na rozciąganie f'_t , [N/mm ²]	Uzyskano z „Testu brazylijskiego” dla próbek cylindrycznych $\varnothing 150 \times 300$ mm	2.32
Początkowy moduł sprężystości E_c , [N/mm ²]	Otrzymane w wyniku badań próbek cylindrycznych $\varnothing 150 \times 300$ mm	3032
Współczynnik Poissona ν [-]		0.2
Energia pęknięcia G_f , [MN/m]	Obliczono z zależności $G_f = 0.000025 f'_t$	5.793×10^{-5}
Funkcja osłabienia przy rozciąganiu	Zakładane osłabienie opisane funkcją wykładniczą	wykładniczy
Przemieszczenie w_c przy rozciąganiu [m]	Obliczono z równania $w_c = 5,14 \frac{G_f}{f'_t}$	-5.0×10^{-4}
Model rys	Rozwijające się w różnych kierunkach	ustalony
Oslabienie pod wpływem ściskania w_d	Przyjęta domyślna wartość przemieszczenia w_d	0.05 mm
Zmniejszona wytrzymałość na ściskanie w kierunku równoległym do pęknięć	Zakładana domyślna wartość współczynnika c	0.8



Widok modeli numerycznych ścian pokazano na Rys. 9.2.1.



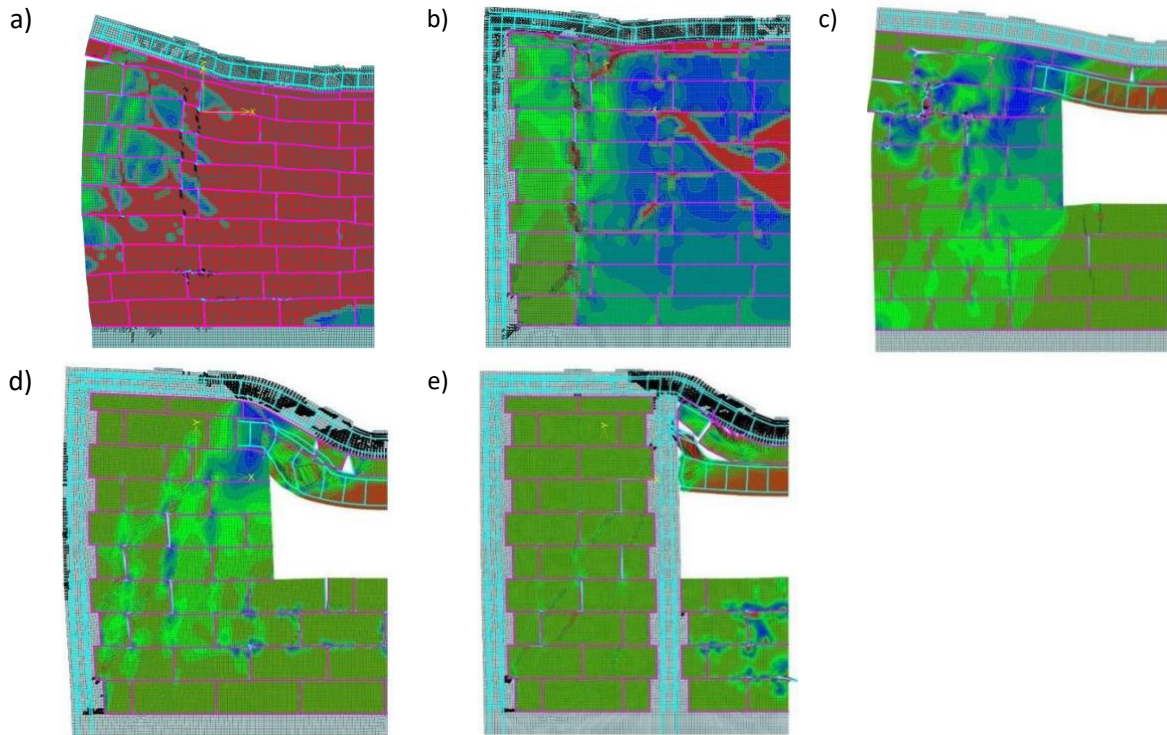
Rys. 9.2.1 Modele numeryczne ścian: a) MNS-Z1, b) MS-Z1, c) MNO-Z1, d) MSO-Z1, e) M2SO-Z1

W nadprożu oraz żelbetowych trzpieniach zamodelowano zbrojenie w postaci prętów i strzemion stosując sprężysto-plastyczny model materiału z powierzchnią plastyczności Hubera-Misesa-Hency'ego. Wszystkie modele odwzorowują wymiary geometryczne oraz układ elementów murowych identycznie jak w rzeczywistych modelach badawczych. W pierwszej kolejności realizowano obciążenie odwzorowujące obciążenie pochodzące od cięgien, a w kolejnych krokach, aż do zniszczenia elementu przykładano obciążenie przekazywane przez stalowe trawersy. Widok modeli numerycznych przedstawiono na Rys. 9.2.2.

Model Atena MNSO uzyskał siłę niszczącą wynoszącą 250 kN i odpowiadające mu ugięcie wynoszące 5,5 mm. W modelu Atena MSO siła niszcząca wyniosła 195 kN a ugięcie 9,5 mm. Wartości siły niszczącej i odpowiadającego ugięcia wyniosły w modelu Atena M2SO odpowiednio 175 kN i 12 mm. Widok modeli numerycznych w ostatnim kroku obciążenia przedstawiono na Rys. 9.2.2. Na prezentowanych widokach pokazano rysy o rozwartości większych niż 0,05 mm.

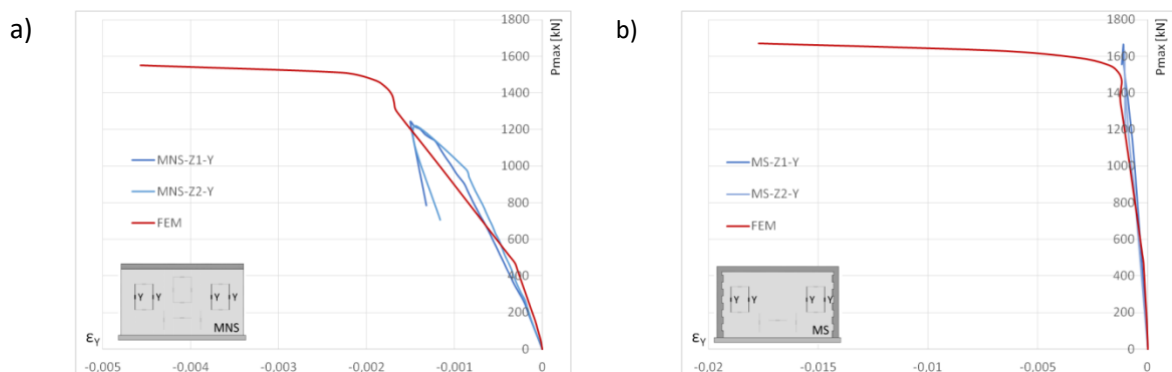


Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 9.2.2 Modele numeryczne w fazie zniszczenia: a) MNS-Z1, b) MS-Z1, c) MNO-Z1, d) MSO-Z1, e) M2SO-Z1

W modelach ścian pełnych uzyskano dobrą zgodność modelu numerycznego z wynikami badań. Na Rys. 9.2.3 pokazano porównanie wykresu naprężenie-odkształcenie pionowe dla ścian pełnych. W przypadku murów nieskrępowanych nośność modelu numerycznego stanowiła 126% średniej nośności modeli laboratoryjnych, natomiast nośność modelu muru skrępowanego wyniosła 102% średniej nośności modeli laboratoryjnych.

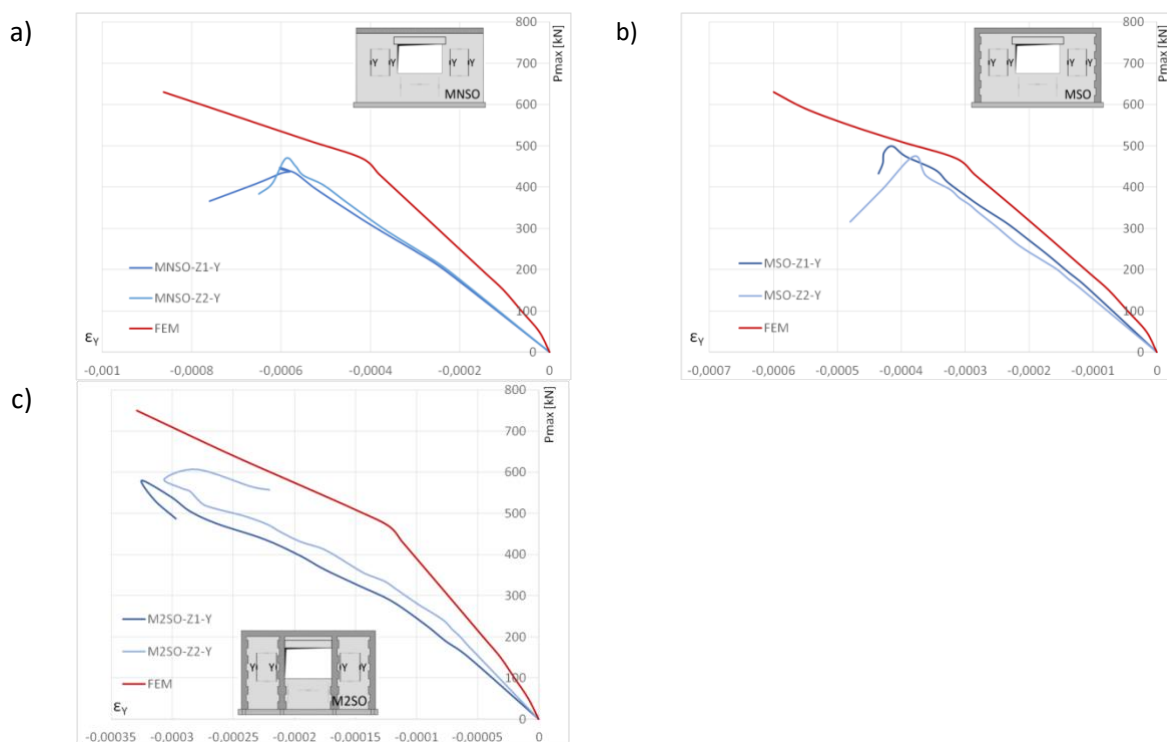


Rys. 9.2.3 Porównanie wyników badań ścian pełnych z wynikami symulacji numerycznych: a) ściany nieskrępowane, b) ściany skrępowane



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

W przypadku ścian z otworem uzyskane wyniki obliczeń numerycznych porównano również ze średnimi wartościami sił niszczących (Rys. 9.2.4). W ścianach nieskrępowanych nośność modelu numerycznego wynosiła 137% średniej nośności modeli numerycznych, w murach skrępowanych zewnętrznie było to 129%, a w ścianach skrępowanych zewnętrznie i wewnętrznie 126%.



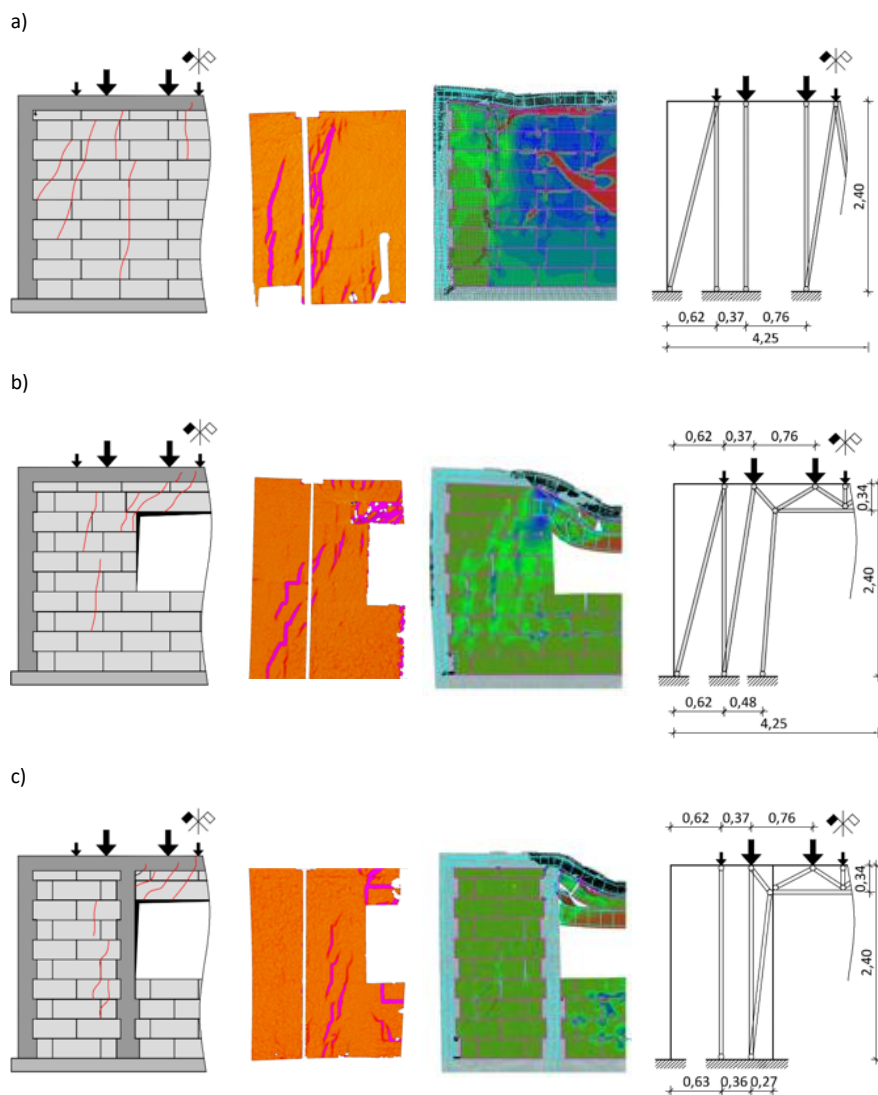
Rys. 9.2.4 Porównanie wyników badań ścian z otworem z wynikami symulacji numerycznych:
a) ściany nieskrępowane,
b) ściany skrępowane zewnętrznie,
c) ściany skrępowane zewnętrznie i wewnętrznie

Zastosowanie kryterium wytrzymałościowego ze sprężysto-plastycznym modelem materiału, oraz z elementami kontaktowymi pozwoliło prześledzić morfologię zarysowań i sposób zniszczenia modeli. Otrzymano zadowalające rezultaty pod względem przebiegu zależności obciążenie – odkształcenie w fazie sprężystej oraz w fazie wzmocnienia. Największa rozbieżność wyników obliczeń z wynikami eksperymentów stwierdzono w fazie osłabienia po uzyskaniu największych obciążeń. Najistotniejszy wpływ na obserwowane rozbieżności z pewnością miał sposób modelowania w stanie płaskim (2D) (zamiast rzeczywistego stanu przestrzennego) oraz możliwe rozrzuty parametrów materiałowych elementów murowych i muru w stadium po zniszczeniu.



9.3. Modele prętowe – Strut & Tie

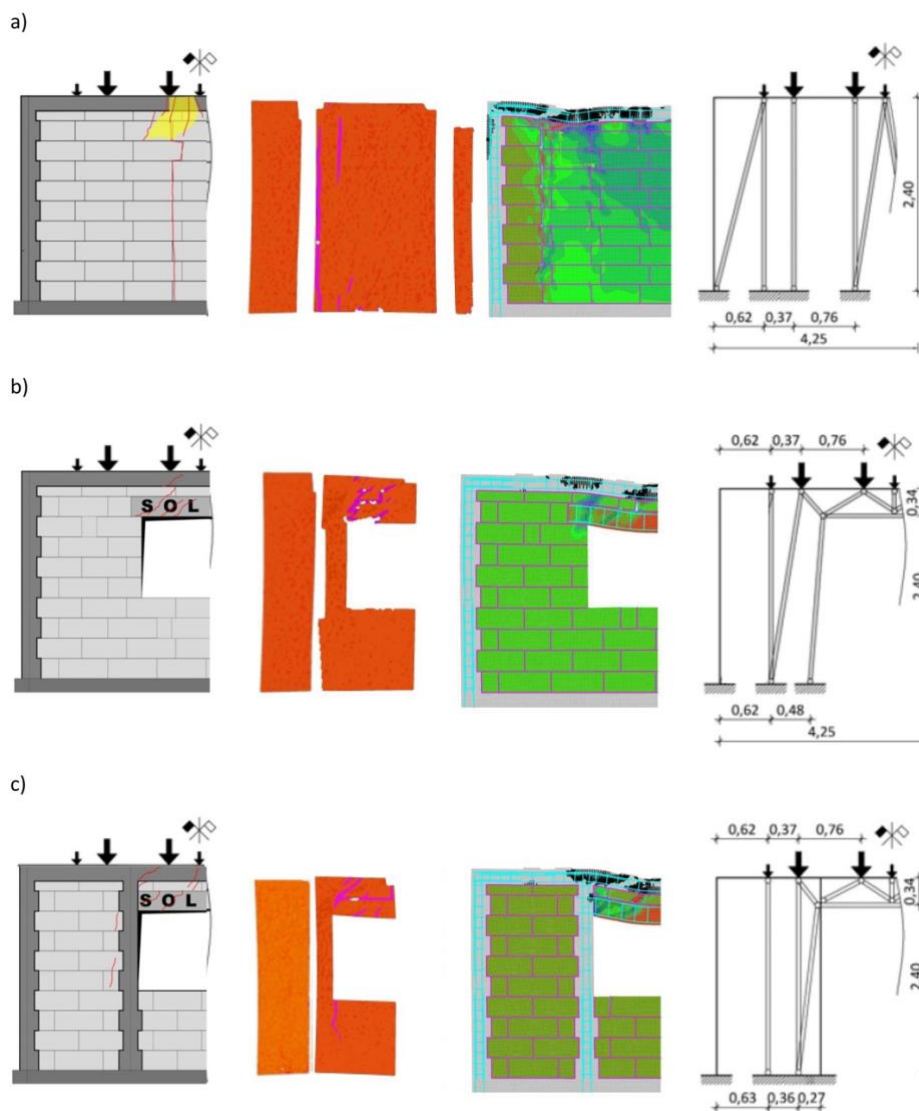
Podjęto próbę wykonania obliczeń badanych murów skrępowanych modelami prętowymi Strut & Tie (S-T). W celu przyjęcia przebiegu ściskanych prętów odwzorowujących mur w modelach S-T przeanalizowano wyniki obliczeń uzyskane z metody elementów skończonych oraz obrazy zarysowań uzyskane z pomiarów optycznych. Na tej podstawie przyjęto geometrię modeli prętowych do metody S-T. Na Rys. 9.3.1. oraz Rys. 9.3.2 zamieszczono obraz zarysowań, naprężenia i deformacje uzyskanych w modelach numerycznych oraz propozycje modeli prętowych analizowanych modeli badawczych.



Rys. 9.3.1 Układ zarysowań, naprężenia główne MES oraz propozycja modelu prętowego dla: a) modeli skrępowanych bez otworu serii MS-Z1, b) modeli skrępowanych obwodowo serii MSO-Z1, c) modeli skrępowanych obwodowo i wewnątrz serii M2SO-Z1



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 9.3.2 Układ zarysowań, naprężenia główne MES oraz propozycja modelu prętowego dla: a) modelu skrępowanego bez otworu serii MSL-Z1, b) modeli skrępowanych z otworem MSLO, c) modeli skrępowanych obwodowo i wewnątrznie serii M2SLO

W programie Specbud zbudowano modele prętowe S-T. W modelach tych uwzględniono rzeczywiste wartości parametrów materiałowych i rzeczywiste wymiary. Następnie prowadzono iteracje polegające na przyjęciu takiego obciążenia zewnętrznego, które powoduje osiągnięcie kryterium zniszczenia modelu. Jako kryterium zniszczenia przyjmowano:

- Osiągnięcie przez ściskane pręty wytrzymałości muru na ściskanie.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

- Osiągnięcie sił zbliżonych do wykresu interakcji moment M – siła ściskająca N w rdzeniach krępujących (wykres interakcji zbudowano w programie Specbud).
- W modelach z otworem osiągnięcie nośności układu: wieniec - warstwa muru – nadproże. Nośności te dla modeli z nadprożem z ABK i wieńcem żelbetowym przyjmowano z pracy doktorskiej [69], a dla modeli z nadprożem z ABK i wieńcem z betonu lekkiego z badań własnych (badania dodatkowe).

Podczas badań modele obciążano dwuetapowo – najpierw za pomocą cięgien przykładano do modelu trzy siły o wartościach 50 kN, a następnie modele obciążano do zarysowania, a następnie obciążano do zniszczenia za pomocą dwóch siłowników mocowanych do ram (siły z siłowników rozkładano przez belki trawersowe). Dlatego w modelach prętowych przyłożono siły o wartościach 50 kN oraz ciężar własny ścian i stalowego osprzętu, a wartości pozostałych 4 sił reprezentujących obciążenia z ram różnicowano, aż do uzyskania sił wewnętrznych odpowiadających któremuś granicznemu kryterium zniszczenia.

Jak wykazały badania prowadzone w ramach pracy doktorskiej [69] nośność układu nadproże-mur-rygiel (wieniec) jest znacznie większa niż nośność samego nadproża. Dlatego sprawdzono dodatkowo zachowanie się układów: wieniec żelbetowy z betonu zwykłego, mur, nadproże z ABK oraz wieniec z betonu lekkiego, mur, nadproże z ABK.

Tablica 9.3.1 zawiera porównanie wyników obliczeń metodą prętową Strut & Tie z wynikami z badań. Porównano sumaryczną siłę rejestrowaną w badaniach i sumaryczną siłę oddziałującą na model obliczeniowy. Zgodność wyników z metody Strut & Tie z wynikami z badań przedstawiono również na Rys. 9.3.3.

Jak widać, uzyskano zadowalającą zgodności wyników obliczeń metodą S-T z eksperymentem. W zależności od modelu obliczeniowe obciążenie stanowi 82÷94% wartości obciążenia uzyskanego w badaniach.



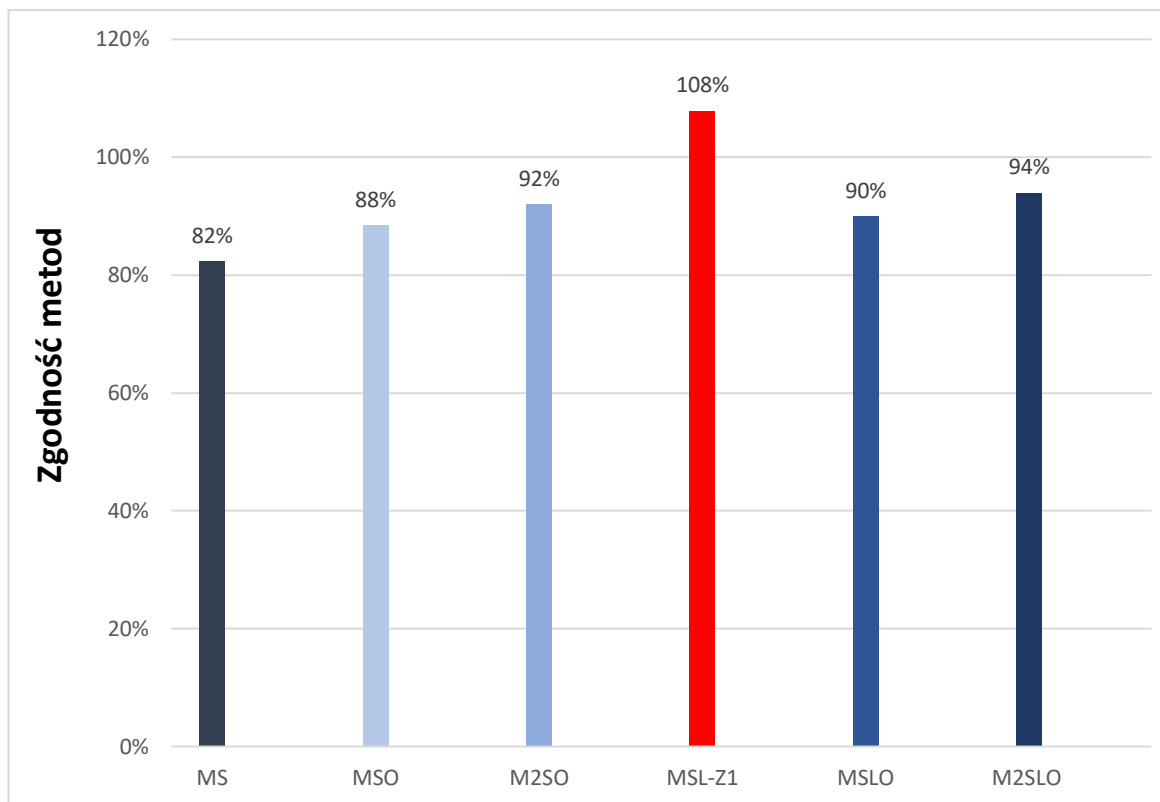
Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Tablica 9.3.1 Porównanie wyników obliczeń metodą S-T z wynikami badań

Analizowana ściana	Sumaryczne obciążenie w modelu S-T P_{S-T} , [kN]	Sumaryczne obciążenie uzyskane w badaniach P_{Test} , [kN]	P_{S-T} / P_{Test}
MS Mury skrępowane bez otworu	1370,0	1663,4	0,824
MSO Mury z otworem skrępowane obwodowo	442,0	499,8	0,884
M2SO Mury z otworem skrępowane obwodowo	534,0	580,5	0,920
MSL-Z1 Mury skrępowane bez otworów	1362,0	1262,6	1,078
MSLO Mury z otworem skrępowane obwodowo	256,0	284,5	0,900
M2SLO Mury z otworem skrępowane obwodowo	285,3	303,5	0,940



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową



Rys. 9.3.3 Zgodność nośności metody Strut & Tie z wynikami z badań

Największą zgodność uzyskano w modelu z dodatkowymi rdzeniami wewnętrznymi. Jedynie w przypadku modelu bez otworów skrępowanego betonem lekkim (MSL-Z1) w badaniach uzyskano mniejszą siłę niż w analizie obliczeniowej modelem prętowym. Może to być związane z wstępnym zarysowaniem modelu podczas dojrzewania (zob. 7.2, Rys. 7.2.14).

9.4. Wnioski z badań i analiz obliczeniowych

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań ścian nieskrępowanych i skrępowanych wykonanych z bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego. Przebadano ściany wykonane różnymi technikami (z wypełnionymi i niewypełnionymi spoinami czołowymi) oraz o różnej budowie (z otworem i bez otworu). Zastosowano różnego rodzaju skrępowania: zewnętrzne (obwodowe) i zewnętrzne obwodowe wraz z wewnętrznymi elementami krępującymi występującymi przy otworze. Ponadto przebadano dodatkowo modele skrępowane betonem lekkim oraz modele z nadprożem żelbetowym. Zakres badań był więc bardzo szeroki, jak również liczba przebadanych modeli (w sumie zbadano 32 modele murów w skali naturalnej).



Uzyskane wyniki badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Wypełnienie spoin nie wpływa na siły rysujące i niszczące modeli skrępowanych zewnętrznie (obwodowo), jak i nieskrępowanych.
- Skrępowanie murów bez otworu nie miało wpływu na poziom sił rysujących modele (modele nieskrępowane i skrępowane rysowały się przy podobnych siłach).
- Skrępowanie miało wpływ na ograniczenie rozwarcia rys w tych murach. W modelach skrępowanych bez otworu rysy miały maksymalne rozwarcie 0,5 mm, a w modelach bez skrępowania występowały pęknięcia o szerokości 10 mm.
- Skrępowanie murów miało istotny wpływ na poziom sił niszczących modele. W przypadku modeli pełnych z niewypełnionymi spoinami czołowymi skrępowanie spowodowało wzrost nośności modeli średnio o ponad 33,9%, a w przypadku modeli z wypełnionymi spoinami o ponad 43,0%.
- Podobnie jak w wypadku badań murów bez otworu, w murach z otworem nie stwierdzono istotnego wpływu wypełnienia zaprawą murarską spoin czołowych zarówno na nośność modeli skrępowanych, jak i nieskrępowanych.
- Nie stwierdzono również wpływu skrępowania na poziom sił powodujących zarysowanie modeli nieskrępowanych z zewnętrznym (obwodowym) skrępowaniem (co związane było z pojawieniem się pierwszych rys zawsze w nadprożach).
- Jedynie w murach z dodatkowymi elementami krępującymi przy otworach stwierdzono wyraźny wzrost poziomu naprężeń rysujących, który w modelach z niewypełnionymi i wypełnionymi spoinami pionowymi wynosił odpowiednio 59,4% i 56,5% w porównaniu do modeli nieskrępowanych.
- Skrępowanie ścian z otworem miało istotny wpływ na poziom sił niszczących modele jedynie w wypadku zastosowania dodatkowych wewnętrznych elementów krępujących.
- W przypadku modeli skrępowanych czterema rdzeniami uzyskano wzrost nośności modeli średnio o około 30% w porównaniu do modeli nieskrępowanych.
- Skrępowanie betonem lekkim w porównaniu do modeli bez skrępowania powodowało, że mury rysowały się i ulegały zniszczeniu przy niższych siłach. Zarysowania następowały przy siłach niższych o 15,7% - przy murach skrępowanych podwójnie oraz 39,5% - przy murach skrępowanych obwodowo.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

- Przeprowadzone analizy numeryczne wykazały, że zastawienie kryterium wytrzymałościowego ze sprężysto-plastycznym modelem M-W-3, oraz z elementami kontaktowymi pozwoliły prześledzić morfologię zarysowań i sposób zniszczenia modeli. Otrzymano zadowalające rezultaty pod względem przebiegu zależności obciążenie – odkształcenie w fazie sprężystej oraz w fazie wzmocnienia.
- Obliczenia wykonane na podstawie projektu EC6 wykazały, że istnieją znaczne rozbieżności między wynikami badań i obliczeniami, szczególnie w przypadku murów z otworem.
- Przeprowadzone analizy obliczeniowe z wykorzystaniem modeli prętowych typu Strut & Tie wykazały, że modele takie mogą być z powodzeniem stosowane w obliczeniowych analizach murów skrępowanych. Uzyskano akceptowalne zgodności wyników obliczeń metodą S-T z wynikami badań (82÷94%).

Ponadto z badań dodatkowych można wysnuć następujące wnioski:

- Wykonanie sztywniejszego nadproża żelbetowego spowodowało wzrost odporności na zarysowania oraz potrzebne były większe siły niszczące. Już model bez skrępowania, ale z nadprożem żelbetowym wykazywał wyższą rysoodporność (16,5%) oraz nośność (9,3%) w stosunku do modelu bez skrępowania, ale z nadprożem z ABK. W przypadku skrępowania obwodowego odnotowano odpowiednio 37,9% zwiększania rysoodporności oraz 34,3% zwiększania nośności – w porównaniu do modelu bez skrępowania, ale z nadprożem z ABK. W przypadku skrępowania obwodowego i przy otworze uzyskano 117,8% wzrostu rysoodporności oraz 95,8% wzrostu nośności – w stosunku do modelu bez skrępowania, ale z nadprożem z ABK.

10. Wnioski końcowe

W ramach niniejszej pracy doktorskiej wykonano przegląd stanu wiedzy, badania materiałowe, badania modeli ścian w skali naturalnej, badania mniejszych ścian oraz opracowano model numeryczny i model prętowy muru skrępowanego. Wykonane badania i analizy pozwoliły na sformułowanie licznych wniosków, które zamieszczono na końcach poszczególnych rozdziałów pracy. Poniżej zamieszczono najważniejsze wnioski, odnoszące się do nakreślonych w rozdziale 5 celów naukowych. Mając na uwadze postawione cele naukowe pracy można stwierdzić, że:



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

- Przeprowadzone badania były pionierskimi badaniami laboratoryjnymi murów wykonanych z ABK w kraju i na świecie. Unikatowość tych badań polegała m.in. na tym, że badano modele w skali naturalnej a modele były poddane monotonicznemu ściskaniu.
- Badania wykazały rzeczywisty wpływ skrępowania na wartość naprężeń ściskających w murze z ABK. Mury skrępowane wykazywały wyraźnie większą odporność na zarysowania oraz większą nośność w stosunku do murów bez skrępowania. W przypadku murów bez otworów i bez wypełnienia spoin czołowych skrępowanie nie spowodowało wzrostu rysoodporności, ale spowodowało 33,9% wzrost nośności. W przypadku murów bez otworów i z wypełnieniem spoin czołowych skrępowanie spowodowało 16,8% wzrost rysoodporności i spowodowało 43,0% wzrost nośności. W murach z otworem i bez wypełnionych spoin czołowych skrępowanie obwodowe spowodowało 6,9% wzrost rysoodporności i 11,6% wzrost nośności. W murach z otworem i z wypełnieniem spoin czołowych skrępowanie spowodowało 5,4% spadek rysoodporności i spowodowało 1,4% wzrost nośności. W murach z otworem i bez wypełnionych spoin czołowych skrępowanie obwodowe i przy otworze spowodowało 59,4% wzrost rysoodporności i 29,6% wzrost nośności. W murach z otworem i z wypełnieniem spoin czołowych skrępowanie obwodowe i przy otworze spowodowało 56,5% wzrost rysoodporności i 29,5% wzrost nośności. W kontekście betonu komórkowego, który ma dosyć niską wytrzymałość na ściskanie można stwierdzić, że skrępowanie może być jedną z metod podwyższenia nośności murów wykonanych z ABK oraz optymalnego wykorzystania właściwości materiałowych.
- Wykazano również, że wykonanie nadproża o większej sztywności w murach skrępowanych wpływa na podwyższenie odporności na zarysowania oraz na nośność modeli.
- Zweryfikowano badania doświadczalne z wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz wyznaczono w modelach numerycznych trajektorie naprężeń ściskających w murze. W tym zakresie uzyskano dobrą zgodność modelu numerycznego z wynikami badań za pomocą obliczeń wykonanych w systemie ATENA 2D.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

- Eurokod 6 [N18] nie uwzględnia w obliczeniach wpływ skrępowania muru. Obliczeniowa nośność ściany skrępowanej i bez skrępowania jest taka sama. W projekcie EC6 [N26] zamieszczono wzory do obliczania wpływu skrępowania. Przeprowadzona analiza wykazała, że dają one zadowalające rezultaty jedynie w ścianach pełnych, przy zastosowaniu skrępowania betonem zwykłym.
- Stworzono i zweryfikowano analityczny model prętowy (Strut & Tie) do określania nośności skrępowanych ścian z ABK. Wykonana analiza poprawności obliczeniowego modelu prętowego dała dobre rezultaty. Metodę prętową można z powodzeniem stosować w analizach obliczeniowych murów skrępowanych.

Ponadto, zdaniem autora dysertacji, niniejsza praca doktorska ma bardzo istotny aspekt praktyczny.

- Po pierwsze, ściany z betonu komórkowego ze względu na niską nośność (ze względu na niską wytrzymałość na ściskanie elementów murowych) wymagają czasem większych nośności i dlatego bywają zastępowane materiałami o wyższej wytrzymałości na ściskanie. Alternatywą jest tu wprowadzenie elementów krępujących i podniesienie nośności muru z ABK.
- Drugi aspekt praktyczny jest związany z tym, że ściany skrępowane są coraz częściej stosowane w praktyce projektowej oraz wykonawstwie. W wielu projektach rezygnuje się z wewnętrznych ścian konstrukcyjnych, które również pełnią w budynku funkcję usztywniającą. Wówczas wprowadza się właśnie trzpienie żelbetowe jako elementy usztywniające, które jak pokazują badania wpływają na poprawienie właściwości tych ścian w kontekście konstrukcyjnym.
- Trzecim aspektem jest też możliwość zastosowania murów skrępowanych jako metody budowania budynków o lepszej odporności na zarysowania i większej nośności na terenach eksploatacji górniczej oraz w miejscach występowania niestabilności podłoża gruntowego, czy występowania obciążeń wyjątkowych.



11. Kierunki dalszych działań

Przeprowadzone badania i analizy nie wyczerpują tematu ściskanych skrępowanych ścian z ABK. Zdaniem autora badania powinny być uzupełnione o ściany z innymi rodzajami otworów, np. z otworami drzwiowymi, ponieważ coraz częściej projektuje się budynki ze stolarką okienną sięgającą posadzki (przykład Rys. 4.3.7).

Należy rozważyć przeprowadzanie badań wpływu skrępowania murów o innych grubościach i wykonanych z ABK o innych wytrzymałościach na ściskanie. W praktyce najczęściej wykonuje się mury o grubości 24 cm z bloczków wytrzymałości na ściskanie $2,5 \text{ N/mm}^2$. W stosunku do wykonanych badań, w których zastosowano bloczki o szerokości 18 cm i wytrzymałości na ściskanie 4 N/mm^2 oznacza to, że smukłość takich murów z bloczków o szerokości 24 cm jest co prawda korzystniejsza, ale wytrzymałość na ściskanie elementów murowych jest mniejsza. Przy pogrubieniu murów wzrośnie również przekrój poprzeczny elementów krępujących o minimum 30%, co może mieć jeszcze większy wpływ na poprawienie właściwości konstrukcyjnych murów.

Zasadnym jest też sprawdzenie wpływu elementów krępujących w ścianach jednowarstwowych, w których elementy żelbetowe systemowo wykonuje się w U-kształtkach z betonu komórkowego, które są elementem traconego szalunku dla trzpieni żelbetowych oraz dla wieńców, zabudowanych płytkami wraz z dodatkowym ociepleniem (przykład Rys. 4.3.1). Tego typu ściany wykonuje się z bloczków znacznie szerszych od przebadanych modeli, bo bloczki mają szerokość 42 cm i mają też znacznie mniejszą wytrzymałość na ściskanie, wynoszącą $1,7 \text{ N/mm}^2$.

Można zastanowić się nad możliwością wykreowania systemu, w którym byłyby specjalne elementy murowe z otworem, przystosowanym do wykonania trzpieni żelbetowych. Może to być pomysł na rozwój systemu łatwego budowania z betonu komórkowego z systemem wykonywania elementów krępujących w traconym szalunku z ABK.

Wykonane w ramach pracy doktorskiej badania i analizy mogą posłużyć do przygotowania zeszytu technicznego dla projektantów dotyczącego zastosowania murów skrępowanych. Metoda krępowania murów jest sposobem na uzyskanie budynków o większej odporności na zarysowania murów. W praktyce brak jest jednak odpowiednich zaleceń i rozwiązań projektowych przyjmowanych jako rozwiązania standardowe.



12. Streszczenie

Przedmiotem pracy doktorskiej jest określenie wpływu skrępowania wykonanego za pomocą układu żelbetowych elementów (trzpieni i wieńców żelbetowych) w murach wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK). W zakres pracy wchodziło wykonanie badań materiałowych, zasadniczych i dodatkowych oraz analizy obliczeniowe wykonane przy pomocy programu bazującego na metodzie elementów skończonych, analizy algorytmami normowymi oraz analizy modelami prętowymi. W ramach badań zasadniczych przeprowadzono laboratoryjne testy monotonicznego ściskania murów bez otworu oraz z otworem w skali naturalnej. Skrępowanie modeli ścian wykonano za pomocą elementów żelbetowych wykonanych z betonu zwykłego oraz niekurczliwego betonu lekkiego. Badania zasadnicze były uzupełnione badaniami materiałowymi, w których przebadano elementy murowe, zaprawę murarską do cienkich spoin, prefabrykowane, zbrojone belki nadprożowe z betonu komórkowego, betony oraz stal zbrojeniową zastosowane w elementach krępujących. Oprócz badań zasadniczych wykonano również badania dodatkowe polegające na skrępowaniu murów elementami żelbetowymi wraz z wykonaniem wylewanego nadproża żelbetowego.

Celem pracy było określenie:

- wpływu niewypełnienia zaprawą murarską spoin czołowych,
- wpływu wypełnienia zaprawą murarską spoin czołowych,
- wpływu skrępowania,
- wpływu wykonania otworu,
- wpływu różnego rodzaju skrępowania,
- wpływu zastosowania betonu zwykłego do wykonania elementów krępujących,
- wpływu zastosowania betonu lekkiego do wykonania elementów krępujących,
- wpływu zastąpienia systemowego nadproża z ABK nadprożem żelbetowym.

Ważnym elementem pracy jest analiza poprawności obliczeniowego modelu prętowego oraz weryfikacja metod obliczeniowych, wynikających z normy projektowej Eurokod 6.

Jednym z celów pracy było również znalezienie możliwości wykonywania murów z ABK o wyższej nośności, jak również sposobu na zastosowanie betonu komórkowego w trudnych warunkach (tereny eksploatacji górniczej, tereny narażone na trzęsienia ziemi). To sposób na rozwoju konstrukcji murowych z betonu komórkowego oparty na współpracy muru wraz z krępującymi elementami żelbetowymi wykonanymi w konstrukcji murowej. Badania



dodatkowo wykonano do porównania murów wykonanych z elementów systemowych włącznie z nadprożami prefabrykowanymi z ABK do murów skrzepowanych z nadprożami wykonanymi z nadprożem żelbetowym.

Powyższe badania oraz przyjęcie metodologii projektowania mają na celu realne wykorzystanie niniejszej pracy badawczo-naukowej w praktyce. Celem jest przygotowanie materiałów dla projektantów oraz wykonawców, którzy w swoich realizacjach będą stosować mury skrzepowane z betonu komórkowego.

13. Summary

The aim of this doctoral thesis is to present the effect of confinement composed of the system of reinforced concrete elements (reinforced concrete ties and bond beams) in masonry structures made of autoclaved aerated concrete (AAC). The performed research included material tests, both fundamental and complementary, computational analyses performed with the software based on the finite element method, analyses based on standard algorithms, and analyses based on rebar models. Laboratory testing of masonry structures without an opening and with a full-scale opening subjected to monotonous compression was a part of the fundamental tests. The wall models were confined with reinforced concrete elements made of ordinary concrete and non-shrinkable lightweight concrete. These fundamental tests were completed with material tests conducted on masonry units, thin-layer mortar, precast reinforced concrete lintel beams made of AAC, concretes, and reinforcing steel used in confining elements. Additionally to the fundamental tests, the complementary tests were conducted. They consisted in confining masonry with reinforced concrete elements and performing cast-in-place reinforced concrete lintel.

The doctoral thesis was designed to determine:

- the effect of absence of mortar in head joints,
- the effect of filling head joints with mortar,
- the effect of wall confinement,
- the effect of performing an opening,
- the effect of different types of confinement,
- the effect of using ordinary concrete to prepare confining elements,
- the effect of using lightweight concrete to prepare confining elements,
- the effect of replacing the commercial AAC lintel with reinforced concrete lintel.



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Validation of computational rebar model and verification of computational methods specified in the design standard EC6 were the important part of the research.

One of aims of the doctoral thesis was also to develop methods of performing AAC masonry structures characterized by greater resistance, and the method of applying autoclaved aerated concrete in poor conditions (mining areas, flood risk areas, areas subjected to seismic actions, etc.). They can contribute to development of masonry structures made of AAC based on the interaction between the masonry structure and reinforced concrete confining elements in the masonry structure. Complementary works were performed to compare masonry structures made of system elements, including precast lintels made from AAC, with confined masonry structures with lintels made from reinforced concrete.

The above tests and the adopted designing methodology are intended to implement the results of this research work into practice. It will be achieved by preparing materials for designers and contractors, who use AAC confined wall in their construction projects.



14. Literatura

- [1] A Sanchez S., Mébarki A.: A Simplified Model of Shear-Capacity in Confined Masonry Walls. Proceedings of the Eighth International Conference on Computational Structures Technology, Civil-Comp Press, 2006, Scotland.
- [2] Asinari M: Buildings with structural masonry walls connected to tie-columns and bond-beams. Praca doktorska, Università degli Studi di Pavia, 2007.
- [3] Brzev S. Meli R.: International guideline for seismic design of low-rise confined masonry buildings in regions of high seismic risk 15 WCEE Lisboa 2012.
- [4] Brzev S., Perez-Gavilán J.J.: Application of Strut-and-Tie Model for seismic design of confined masonry shear walls. Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, Padova, Italy, 26-30 June 2016.
- [5] Brzev S.: Earthquake-resistant confined masonry construction 2007.
- [6] Červenka, J.; Papanikolaou, V. K. Three dimensional combined fracture-plastic material model for concrete. Int. J. of Plasticity 2008, 24, 2192–2220. <http://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.01.004>.
- [7] Constantinescu, Sorina. Study of confined masonry buildings in seismic areas. Energy Procedia, 112, 2017, pp. 545-554.
- [8] Da Porto F., Mosele F., Modena C.: Compressive behaviour of a new reinforced masonry system. Materials and Structures, 2011, vol. 44, s. 565-581.
- [9] Decanini L.D., Fantin G.E.: Modelos simplificados de la mampostería incluidas en porticos. Características de rigidez y resistencia lateral en estado límite. Proceedings of 6th Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, 1986, s. 817–36.
- [10] Dhanasekar M., Shrive Nigel G. Strength and Deformation of Confined and Unconfined Grouted Concrete Masonry. ACI Structural Journal, vol. 99, 6, 2002, pp. 819÷826.
- [11] Drobiec Ł. Limitation of cracking in AAC masonry under the window zone / Begrenzung von Rissbildung in Porenbetonmauerwerk im Brüstungsbereich. Mauerwerk 21. 2017, H. 5, S. 332÷342.
- [12] Drobiec Ł., Jasiński R, Rybarczyk T., Cygan G., Mazur W.: Badania zmian odkształceń ścian wykonanych z elementów murowych z ABK spowodowanych oddziaływaniem, żelbetowych elementów skrępowania. VI Konferencja Stowarzyszenia Producentów Betonów SPB 2019. Beton komórkowy i prefabrykacja betonowa w nowoczesnym budownictwie. s. 121-127.



- [13] Drobiec Ł., Jasiński R., Rybarczyk T., Cygan G., Mazur W.: Zmiana odkształceń ścian z elementów murowych z ABK spowodowana oddziaływaniem żelbetowych elementów krępujących. *Materiały Budowlane* nr 12/2019. s. 30-33. DOI: 10.15199/33.2019.12.03.
- [14] Drobiec Ł., Jasiński R., Mazur W., Rybarczyk T., Połubiński T.: Analysis of the impact of horizontal reinforcement on the compression and diagonal compression strength of walls made of AAC. *CE/Papers*, vol. 6, issue 2, pp. 170-176. <https://doi.org/10.1002/cepa.1975>.
- [15] Drobiec Ł., Jasiński R., Mazur W., Rybarczyk T.: Influence of the type of lintel and the method of covering the window opening on the compressive strength of walls made of AAC. *CE/Papers*, vol. 6, issue 2, pp. 102-108. <https://doi.org/10.1002/cepa.1968>.
- [16] Drobiec Ł., Jasiński R., Mazur W., Rybarczyk T.: Numerical Verification of Interaction between Masonry with Precast Reinforced Lintel Made of AAC and Reinforced Concrete Confining Elements. *Applied Sciences*, 10, 5446; <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/16/5446>.
- [17] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Mazur W., (Rybarczyk T., Chojnowski J., Janiak R., Kwaśniak J. – autorzy rozdziału 3): Projektowanie konstrukcyjne ścian z betonu komórkowego. *Zeszyt 2, część 1*.
- [18] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Mazur W., (Rybarczyk T., Chojnowski J., Janiak R., Kwaśniak J. – autorzy rozdziału 3): Projektowanie konstrukcyjne ścian z betonu komórkowego. *Zeszyt 2, część 2*.
- [19] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Konstrukcje murowe według Eurokodu 6 i norm związanych. Tom 1. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
- [20] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Konstrukcje murowe według Eurokodu 6 i norm związanych. Tom 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2014.
- [21] Drobiec Ł., Jasiński R., Rybarczyk T. The influence of the type of mortar on the compressive behavior of walls made of Autoclaved Aerated Concrete (AAC). *Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges*. Taylor & Francis Group, London 2016, pp. 1531÷1538.
- [22] Drobiec Ł., Jasiński R., Rybarczyk T.: Murowe konstrukcje skrępowane sposobem na zwiększenie nośności konstrukcji murowych i na realizację okazałych zamierzeń architektonicznych. VIII Konferencja Naukowo-Techniczna Archbud 2017. S. 61-79.



- [23] Drobiec Ł., Jasiński R., Rybarczyk T.: Wpływ skrępowania i wypełnienia spoin czołowych w ściskanych murach z autoklawizowanego betonu komórkowego. IX Konferencja Naukowo-Techniczna Archbud 2019, s. 37-46.
- [24] Drobiec Ł., Jasiński R.: Możliwości zupełnego wykorzystania właściwości betonu komórkowego / Possibilities for optimal use of properties of autoclaved aerated concrete. Cement Wapno Beton, nr 5/2019, s. 383-399.
- [25] Drobiec Ł., Mazur W., Rybarczyk T.: Analysis of confined AAC walls under monotonic compression. Engineering Structures, Volume 253, 15 February 2022, 113756. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113756>.
- [26] Drobiec Ł., Mazur W., Rybarczyk T.: Analysis of confined masonry with Strut and Tie models. MATEC Web of Conferences 323, 02002 (2020). <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032302002>.
- [27] Drobiec Ł., Rybarczyk T., Badania ścian z betonu komórkowego skrępowanych obwodowo. Materiały Budowlane, 4/2019. DOI: 10.15199/33.2019.04.1.
- [28] Drobiec Ł., Rybarczyk T., Grzyb K.: Analiza porównawcza nieskrępowanych i skrępowanych ścian z ABK. Materiały Budowlane, nr 1/2020, s. 50-53. DOI 10.1519933.2020.01.03.
- [29] Drobiec Ł., Rybarczyk T., Grzyb K.: Mury skrępowane. Wyniki badań. Nowe metody projektowania. XXXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 5-8 marca 2019 r., t. II, s. 151-203.
- [30] Drobiec Ł., Rybarczyk T.: Badania wpływu skrępowania na zachowanie się murów z otworami obciążonych pionowo. Materiały Budowlane, nr 3/2020, s. 27-29. DOI: 10.15199/33.2020.03.02.
- [31] Drobiec Ł., Rybarczyk T.: Influence of reinforced concrete confining on the load-bearing capacity of the AAC walls. Ce/Papers, Volume 2, Issue 4, 2018, s. 409-415. DOI: 10.1002/cepa.847.
- [32] Drobiec Ł., Rybarczyk T.: Wpływ otworu i sztywności nadproża na nośność ścian z ABK. Materiały Budowlane, nr 1/2022, s. 59-61. DOI: 10.15199/33.2022.01.08.
- [33] Drobiec Ł., Rybarczyk T.: Wpływ żelbetowych elementów krępujących na nośność i odkształcenia muru z autoklawizowanego betonu komórkowego. Monografie technologii betonu. X Konferencja Dni Betonu, Wisła, 8-10 października 2018. T. 2. Ed. Piotr Kijowski. Kraków : Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2018, s. 617-631.



- [34] Drobiec Ł.: Mury skrępowane. *Materiały Budowlane*, 4/2012, s. 18-20.
- [35] Drobiec Ł.: Przeciwdziałanie zarysowaniu ściskanych murów zbrojeniem spoin wspornych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, seria monografie nr 452, Gliwice 2013.
- [36] Ezz A.A., Eldin H.M.S., Galal K.: Influence of confinement reinforcement on the compression stress–strain of grouted reinforced concrete block masonry boundary elements. *Structures*, vol. 2 (2015), s. 32-43.
- [37] Gąsiorowski T.: Nośność i odkształcalność skrępowanych żelbetem ścian z ABK ścinanych monotonicznie. Rozprawa Doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 2023.
- [38] Ghaisas K.V., Basu D., Brzev S., Perez-Gavilán J.J.: Strut-and-Tie Model for seismic design of confined masonry buildings. *Construction and Building Materials* 2017, vol. 147, s. 677–700.
- [39] Gołaszewski J., Cygan G., Drewniak M.: Laserowy system do badania skurczu wczesnego elementów betonowych w powiązaniu z oznaczaniem czasu wiązania. *Przegląd Budowlany* 5/2014, s. 34 – 36.
- [40] Graubner C-A.: Differentiation between the terms “confined masonry” and “infill masonry”. *Mauerwerk* 22 (2018), Heft 2, s. 126-127.
- [41] Guy Nordenson and Associates New York NY: Build change post-earthquake housing reconstruction technical assistance program, Haiti 2011. Design and construction guidelines for confined masonry housing.
- [42] Hart T., Brzev S.: The Confined Masonry Network's Design and Construction Guidelines. Proceedings of the 10th US National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska 2014.
- [43] Hart T.M., Brzev S.: The confined masonry network’s design and construction guidelines 2017
- [44] Iernutan R.A., Babota F.: Autoclaved Cellular Concrete (ACC) Masonry with Vertical Hollows Confined with Disperse Reinforced Concrete. *Procedia Engineering* 181 (2017), s. 300-307.
- [45] Iyer K., Kulkarni S. M., Subramaniam S., Murty C. V. R., Goswami R., Vjayanarayanan A.R.: Build a safe house with confined masonry.
- [46] Jäger W., Schöps P. Confined masonry - a chance to improve the load bearing capacity. 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete, pp. 225÷236.



- [47] Jäger W., Schöps P. Eingefasstes Mauerwerk als Möglichkeit zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Aussteifungswänden. Fraunhofer IRB Verlag, 2009.
- [48] Jäger W., Schöps P.: Confined masonry - a chance to improve the load bearing capacity. 11th Canadian Masonry Symposium, Toronto, Ontario, May 31- June 3, 2009.
- [49] Jäger W., Schöps P.: Confined masonry - a chance to improve the load bearing capacity. Proceedings of the 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete, Bydgoszcz, 14-17 September 2011, s. 225-236.
- [50] Jäger, W., Schöps, P.: Confined Masonry subjected to Lateral Loads. Mauerwerk nr 4, vol. 19, 2015, s. 277–286.
- [51] Jäger, W., Schöps, P.: Eingefasstes Mauerwerk als Möglichkeit zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Aussteifungswänden. Einführung von Eingefasstem Mauerwerk zur Erhöhung der Tragfähigkeit von aussteifenden Scheiben mit dem Ziel der Kompensation von Mehrkosten infolge erhöhter, horizontaler Einwirkungen. Forschungsbericht. Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl für Tragwerksplanung. Erarbeitet i. A. des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung. Dresden 2008.
- [52] Jain S., Basu D, Ghosh I., Rai D., Brzev S., Bhargava L.: Application of confined masonry in a major project in India 2014.
- [53] Jain S., Brzev S., Bhargava L. K., Basu D., Ghosh I., Rai D., Ghaisas K. V.: Confined masonry for residential construction 2015.
- [54] Jasiński R., Drobiec Ł. Study of Autoclaved Aerated Concrete Masonry Walls with Horizontal Reinforcement under Compression and Shear. Procedia Engineering 161, 2016, S. 918÷924.
- [55] Jasiński R., Gąsiorowski T., 2019, Morfologia zarysowań ścian skrępowanych ścinanych poziomo. Materiały Budowlane, 4, Vol. 560, str. 23 – 25. DOI: 10.15199/33.2019.04.03A
- [56] Jasiński R., Gąsiorowski T., Zarysowanie i zniszczenie ścian skrępowanych ścinanych poziomo. Materiały Budowlane, 5/2019, s 38 - 39.
- [57] Jasiński R.: Badania i modelowanie murowanych ścian usztywniających. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, seria monografie nr 673, Gliwice 2017.
- [58] Jasiński R.: Badania i modelowanie murowych ścian usztywniających. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2017.
- [59] Jasiński R.: Experimental Verification of Some Simple Equilibrium Models of Masonry Shear Walls. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 245, 2017.



- [60] Jasiński R.: Modele nośności granicznej ścian ścinanych. Podstawy teoretyczne. Materiały Budowlane nr 5, 2016, s. 141–144.
- [61] Jasiński R.: Murowane wypełnienie szkieletu. Nowe rozwiązania w projektowaniu, konstruowaniu, wykonawstwie. XXXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 5-8 marca 2019, tom II, s. 59 - 120.
- [62] Jasiński R.: Proposal of procedure for identification of Menétrey–Willam (M-W-3) plasticity surface of homogeneous and hollow masonry units. Engineering Structures and Technologies, 2019, 11(2), s. 40-49.
- [63] Jasiński R.: Validation of Elastic-Brittle, and Elastic-Plastic FEM Model of the Wall Made of Calcium Silicate and AAC Masonry Units. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 603 (2019) 032001. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/603/3/032001>.
- [64] Lang A.F., Crisafulli F.J., Torrisi G.S.: Overview and Assessment of Analysis Techniques for Confined Masonry Buildings. Proceedings of the 10th US National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska 2014.
- [65] Ledwoń J.A.: Budownictwo na terenach górniczych. Arkady, Warszawa 1983.
- [66] Liberatore L., Noto F., Mollaioli F., Franchin P.: In-plane response of masonry infill walls: Comprehensive experimentally-based equivalent strut model for deterministic and probabilistic analysis. Engineering Structures 2018, vol. 167, s. 533–548.
- [67] Lu S., Unger C.: Bemessungsmethode für eingefasstes Mauerwerk auf Grundlage des Eurocode 6. Mauerwerk nr 5, vol. 14, 2010, s. 293–296.
- [68] Marques Rui, Lourenço Paulo, B. Unreinforced and confined masonry buildings in seismic regions: Validation of macro-element models and cost analysis. Engineering Structures, vol. 64, 2014, s. 52÷67.
- [69] Mazur W., Analiza nośności i odkształcalności wybranych systemowych nadproży z betonu komórkowego. Praca doktorska Politechnika Śląska, Gliwice (2018)
- [70] Mazur W., Drobiec Ł., Jasiński R.: Research and numerical investigation of masonry - AAC precast lintels interaction. Procedia Engineering, 193 (2017), 385-392. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.228>.
- [71] Mazur W., Rybarczyk T., Jasiński R., Drobiec Ł.: Cracking and failure of precast AAC lintels in walls subjected to in-plane vertical loading. Acta Scientiarum Polonorum, Architectura 2018 vol. 17 nr 4, s. 93-104, DOI: 10.22630/ASPA.2018.17.4.44.



- [72] Mazur W., Rybarczyk T., Jasiński R., Drobiec Ł.: Zarysowanie i zniszczenie prefabrykowanych nadproży z autoklawizowanego betonu komórkowego zabudowanych w ścianach obciążonych pionowo w płaszczyźnie. 64. Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB. Krynica 2018, Krynica Zdrój, 16-20.09.2018 r. Materiały konferencyjne s. 55-56.
- [73] Meli R., Brzev S., Astoza M., Boen T., Crisafulli F., Dai J., Farsi M., Hart T., Mebrarki A., Moghadam A.S., Quiun D., Tomazevic M., Yamin L.: Seismic design guide for low-rise confined masonry buildings 2011.
- [74] Menétrey P., Willam K.J.: Triaxial failure criterion for concrete and its generalization, *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 3, 1995, s. 311 - 318.
- [75] Mosele F., da Porto F., Benetta M.D., Modena C.: Experimental behaviour of newly developed system for load bearing reinforced masonry walls. *Proceedings of the 14th International Brick and Block Masonry Conference, Sydney, Australia, 17-20 February 2008.*
- [76] Obaidat, Ala' T., El Ezz, A., Abo, Galal, K. Compression behavior of confined concrete masonry boundary elements. *Engineering Structures*, 132, 2017, pp. 562÷575.
- [77] Priestley M.J.N., Calvi M.: Towards a capacity-design assessment procedure for reinforced concrete frames. *Earthq Spectra*, nr 7, vol. 3, 1991, s.413–37.
- [78] Roca P., Lobato M., Viviescas Á., Villalba V.: Limit analysis of shear walls by simple equilibrium models. 8th International Masonry Conference 2010 in Dresden.
- [79] Roca P.: Assessment of masonry shear-walls by simple equilibrium models. *Construction and Building Materials*. Vol. 20, 2006, s. 229–238.
- [80] Rybarczyk T., Drobiec Ł., Jasiński R., Jonderko K.: Ustalenia normowe, praktyczne aplikacje i wybrane badania murowych ścian z elementów murowych z ABK skrępowanych żelbetem. XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 6-9.03.2018.
- [81] Rybarczyk T., Drobiec Ł., Jasiński R.: Badania wpływu zaprawy na właściwości mechaniczne murów wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego Solbet. XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 25-28 marca 2015, tom IV, s. 59 - 120.
- [82] Rybarczyk T., Drobiec Ł., Jasiński R.: Badania wpływu zaprawy na właściwości mechaniczne murów wykonanych z autoklawizowanego betonu komórkowego. *Problemy Współczesnej*



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

- Architektury i Budownictwa „Archbud 2015:”. Materiały konferencyjne Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania. s. 269 – 328.
- [83] Rybarczyk T., Drobiec Ł., Jasiński R.: Wpływ zbrojenia na parametry mechaniczne ściskanego muru z betonu komórkowego. XXXI Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 24-27 luty 2016, tom IV, s. 59 - 75.
- [84] Rybarczyk T., Drobiec Ł.: Effect of filling joints on resistance of walls under vertical loading. Ce/Papers, Volume 2, Issue 4, 2018, s. 403-408. DOI: 10.1002/cepa.848.
- [85] Rybarczyk T., Drobiec Ł.: Wpływ wypełnienia spoin na wytrzymałość ścian obciążonych pionowo. Materiały Budowlane, nr 8/2018, s. 62-63.
- [86] Saneinejad A., Hobbs B.: Inelastic design of infilled frames. ASCE Journal of Structural Engineering, nr 4, vol. 121, 1995, s. 634–50.
- [87] Schacher T.: Confined masonry for one and two storey building in low-tech environments. A guidebook for technicians and artisans. NICEE National Information Centre of Earthquake Engineering 2009.
- [88] Sreejith P.P., Sivan P.P., Praveen A., Gajendran C., Nisha V.: Simplified method for shear strength prediction of confined masonry walls subjected to in plane loads. Procedia Technology 2016, vol. 24, s. 155-160.
- [89] Starosolski W.: Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych. Tom III. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [90] Tena-Colunga A., Juárez-Ángeles A., Salinas-Vallejo V. Cyclic behavior of combined and confined masonry walls. Engineering Structures, vol. 31, 2009, s. 240÷259.
- [91] Tomazevic M: Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings, Imperial College Press 1999.
- [92] Tripathy D., Singhal V. Estimation of in-plane shear capacity of confined masonry walls with and without openings using strut-and-tie analysis. Engineering Structures 188, (2019), 290-304. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.002>.
- [93] Tu Y.H., Chuang T.H., Lin P.C., Weng P.W., Weng Y.T.: Experiment of Slender Confined Masonry Panels under Monotonic and Cyclic Loading. Structures Congress ASCE 2011, s. 2730-2740.
- [94] Vinayak Ghaisas K., Brzev S., Shukla G., Kant Bhargava L., Greene M., Porst C.F.: Campus on the Sabarmati IIT Gandhinagar. Confined masonry for residential construction.



- [95] Zulqarnain A.S.; Aftab A., Rao A.K., Ajjad A.: Earthquake resistant confined masonry structure with concrete beams and columns. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology 2011.

15. Normy, instrukcje i wytyczne

- [N1] ASTM C1581 / C1581M - 18a. Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage
- [N2] EN 1996-1-1:2023 Eurocode 6. Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Final Draft 10.2021 r.
- [N3] FEMA 306. Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings – basic procedures manual. Prepared by The Applied Technology Council; 1998.
- [N4] GNDT:1984 Norme Tecniche per le Costruzioni in Zone Sismiche.
- [N5] Inpres-Cirsoc 103:1983 Normas Argentinas para construcciones sismorresistentes, Parte III. Construcciones de Mampostería.
- [N6] Instrukcja nr 391/2003. Projektowanie budynków podlegających wpływom wstrząsów górniczych. Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie, Warszawa 2003.
- [N7] NSR-98 Mamposteria Estructural, Colombian Code.
- [N8] NTC-07-02 Normas Dinamic loads:Técnicas complementarias para diseño y Static loads: construcción de estructuras de mampostería.
- [N9] PN-B-03002:1999 Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie.
- [N10] PN-B-03340:1989 Konstrukcje murowe zespolone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [N11] PN-EN 1015-11:2020-04 Metody badań zapraw do murów. Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy.
- [N12] PN-EN 1052-1:2000 Metody badań murów. Określenie wytrzymałości na ściskanie
- [N13] PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- [N14] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [N15] PN-EN 12602:2016-11 Prefabrykowane elementy zbrojone z autoklawizowanego betonu komórkowego.



- [N16] PN-EN 1745:2020-12 Mury i wyroby murowe - Metody określania właściwości cieplnych
- [N17] PN-EN 1992-1+AC+Ap 1,2,3: 2008, Eurokod 2 - Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [N18] PN-EN 1996-1-1:2023-08 - Eurokod 6 - Projektowanie konstrukcji murowych - Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych
- [N19] PN-EN 1998-1:2005/A1:2014-01. Eurokod 8: Projektowanie konstrukcji poddanych oddziaływaniom sejsmicznym. Część 1: Reguły ogólne, oddziaływania sejsmiczne i reguły dla budynków.
- [N20] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton - Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [N21] PN-EN 771-4+A1:2015-10 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego
- [N22] PN-EN 772-1+A1:2015-10: Metody badań elementów murowych. Część 1 Określenie wytrzymałości na ściskanie
- [N23] PN-EN 845-2+A1:2016-10 Specyfikacja wyrobów dodatkowych do murów - Część 2: Nadproża
- [N24] PN-EN 998-2:2016-12 Wymagania dotyczące zaprawy do murów - Część 2: Zaprawa murarska
- [N25] PN-EN ISO 6892-1:2020-05 Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
- [N26] PrEN 1996-1-1:2019 Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Final Draft 10.2019 r.

16. Strony internetowe

- [W1] <https://durrelajm.al/rajoni/rrezik-epidemish-pas-p%C3%ABrmytjeve-n%C3%AB-ballkan>
- [W2] <https://www.britannica.com/event/Haiti-earthquake-of-2010>
- [W3] <http://wiadomosci.dziennik.pl/swiat/artykuly/459320,powodz-w-bosni-i-serbiipolscy-strazacy-pomoga-pomoc-tez-od-unii-europejskiej.html>



17. Wykaz rysunków

<i>Rys. 4.3.1 Przykład odporności konstrukcji budynku ze ścianami skrępowanymi na obciążenia wyjątkowe (budynek po powodzi w Bośni 2014) [W1]</i>	15
<i>Rys. 4.3.2 Przykład odporności konstrukcji budynku ze ścianami skrępowanymi na obciążenia wyjątkowe (budynek po powodzi w Bośni 2014) [W3]</i>	15
<i>Rys. 4.3.3 Przykład odporności konstrukcji budynku ze ścianami skrępowanymi na obciążenia wyjątkowe (budynek po trzęsieniu ziemi w Haiti w 2010 roku) [W2]</i>	16
<i>Rys. 4.3.4 Przykład budynku mieszkalnego jednorodzinnego ze skrępowaniem ścian jednowarstwowych z betonu komórkowego (krępujące elementy żelbetowe trzpienie i wieńce są wykonywane w kształtkach U) 16</i>	
<i>Rys. 4.3.5 Przykład budynku mieszkalnego jednorodzinnego ze skrępowaniem ścian jednowarstwowych z betonu komórkowego (krępujące elementy żelbetowe trzpienie i wieńce są wykonywane w kształtkach U) 17</i>	
<i>Rys. 4.3.6 Przykład budynku mieszkalnego jednorodzinnego ze skrępowaniem murów z betonu komórkowego</i>	17
<i>Rys. 4.3.7 Przykład budynku mieszkalnego jednorodzinnego wielolokalowego ze skrępowaniem murów z betonu komórkowego</i>	18
<i>Rys. 4.3.8 Przykład budynku mieszkalnego wielorodzinnego</i>	18
<i>Rys. 4.3.9 Przykład budynku komercyjnego z murami skrępowanymi</i>	19
<i>Rys. 4.3.10 Przykład zagrożenia w przypadku wykonywania ścian skrępowanych</i>	20
<i>Rys. 4.3.11 Przykład elewacji budynku ze ścianami skrępowanymi Campus on the Sabarmati IIT Gandhinagar – Indie [94]</i>	21
<i>Rys. 4.3.12 Przykład elewacji budynku ze ścianami skrępowanymi Campus on the Sabarmati IIT Gandhinagar – Indie [94]</i>	21
<i>Rys. 4.4.1 Badane próbki [36]: a) BE-R-0, b) BE-R-10M/200, c) BE-R-15M/200, d) BE-R-10M/100, e) BE-R15M/100</i>	23
<i>Rys. 4.4.2 Wykresy naprężenie-odkształcenie uzyskane z badań [36], [76]</i>	24
<i>Rys. 4.4.3 Modele wykorzystane w badaniach [44]: a) nieskrępowane, b) skrępowane</i>	25
<i>Rys. 4.4.4 Wykresy naprężenie odkształcenie z badań [44]</i>	25
<i>Rys. 4.4.5 Elementy murowe i mur: a) kształt elementu murowego i idea zbrojenia b) wykonawstwo w badaniach Da Porto, Mosele i Modeny [8], [75]</i>	26
<i>Rys. 4.4.6 Modele badawcze w badaniach Da Porto, Mosele i Modeny: a) murowane słupki zbrojone pionowo (serie C3 i C5), b) murowane ściany zbrojone poziomo (serie SRHC i TRHC), c) murowane ściany zbrojone pionowo i poziomo (serie SRC i TRC) [8] [75]</i>	27
<i>Rys. 4.5.1 Założenia modelu prętowego muru ścinanego: a) geometria konstrukcji,</i>	29



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Rys. 4.5.2 Modele prętowe ścian: a) modele obciążone siłami skupionymi (modele typu I), b) modele obciążone równomiernie (modele typu II).....	34
Rys. 4.5.3 Przykładowe modele prętowe skrępowanych ścian ściskanych [38]: a) ściana bez otworu, b) ściana z otworem.....	36
Rys. 4.5.4 Przykładowe modele prętowe skrępowanych ścian ścinanych [38]: a) wszystkie pasma muru spełnią warunek $0,3 < h_m / l_m < 2,0$, b) w lewym paśmie $h_m / l_m > 2,0$,	37
Rys. 4.5.5 Model obliczeniowy przyjęty przez Jägera i Schöpsa [51] i [50]: a) fazy zniszczenia muru zginanego z płaszczyzny i przebieg ściskań, b) model prętowy, c) analiza deformacji dolnej części modelu.....	38
Rys. 4.5.6 Założenia do wyprowadzenia wzoru (43)	42
Rys. 4.5.7 Założenia do wyprowadzenia określenia nośności skrępowanych murów zginanych i ściskanych.	43
Rys. 4.5.8 Pionowe elementy krępujące wg instrukcji ITB nr 391/2003 [N6]: a) rdzeń w pionowych otworach elementów krępujących, b) rdzeń wykształcony przez odpowiednie ułożenie elementów murowych, c) rdzeń w między murowanymi ścianami	45
Rys. 4.5.9 Przykłady murów skrępowanych w budynkach wielokondygnacyjnych [80]	46
Rys. 4.5.10 Przykład murów skrępowanych w budynku mieszkalnym jednorodzinny	47
Rys. 4.5.11 Przykład murów skrępowanych w budynku komercyjnym jednokondygnacyjnym.....	47
Rys. 4.5.12 Przykłady sposobów połączenia żelbetu i muru: a) przez strzępia, b) przez zbrojenie, c) przez zbrojenie spoin wspornych	49
Rys. 4.5.13 Połączenie rdzenia i muru: przez zbrojenie wypuszczone ze spoin	49
Rys. 4.5.14 Minimalny przekrój i minimalne zbrojenie elementu krępującego wg Eurokodu 6 [N18].....	51
Rys. 4.5.15 Założenia do wyprowadzenia wzoru na nośność ściany skrępowanej poddanej zginaniu i ściskaniu według EC6 [N26]	56
Rys. 6.2.1 Element murowy – bloczek z autoklawizowanego betonu komórkowego zastosowany w badaniach	61
Rys. 6.2.2 Widok elementu murowego zastosowanego w badaniach	61
Rys. 6.2.3 Badanie wytrzymałości na ściskanie elementów murowych:.....	64
Rys. 6.2.4 Zniszczenie ściskanych elementów murowych serii U: a) próbka S1, b) próbka S2,	64
Rys. 6.2.5 Zniszczenie ściskanych elementów próbnych serii CX: a) próbka CX-1, b) próbka CX-2	64
Rys. 6.2.6 Zniszczenie ściskanych elementów próbnych serii CY: a) próbka CY-1, b) próbka CY-2.....	65
Rys. 6.2.7 Zniszczenie ściskanych elementów próbnych serii CZ: a) próbka CZ-1, b) próbka CZ-5.....	65
Rys. 6.3.1 Aparat trójosiowego ściskania: a) widok, b) szkic – opis w tekście	67
Rys. 6.3.2 Sposób zniszczenia próbek serii SV (u góry) i SH (na dole).....	69
Rys. 6.4.1 Układ elementów murowych w elementach próbnych S1N i S2N	70
Rys. 6.4.2 Widok elementów próbnych	70
Rys. 6.4.3 Widok wybranego elementu próbnego.....	71



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

<i>Rys. 6.4.4 Wykres zależności naprężenie σ_y – odkształcenie pionowe ε_y i poziome ε_x modeli serii S1N</i>	73
<i>Rys. 6.4.5 Wykres zależności naprężenie σ_y – odkształcenie pionowe ε_y i poziome ε_x modeli serii S2N</i>	73
<i>Rys. 6.5.1 Nadproże NS R30 180x240x2000 wykorzystywane w badaniach</i>	75
<i>Rys. 6.6.1 Przygotowane próbki zaprawy</i>	76
<i>Rys. 6.6.2 Próbki przygotowane do badań</i>	77
<i>Rys. 6.6.3 Badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie zaprawy: a) badanie na rozciąganie zginanie, b) badania na ściskanie</i>	77
<i>Rys. 6.7.1 Badania stali zbrojeniowej nadproży: a) widok pręta w maszynie wytrzymałościowej, b) próbki po badaniu</i>	79
<i>Rys. 6.7.2 Wykres zależności naprężenie-odkształcenie z badań prętów zbrojeniowych</i>	80
<i>Rys. 6.8.1 Widok próbki betonu przed (a) i po badaniu (b)</i>	83
<i>Rys. 7.2.1 Geometria skrępowanych obwodowo modeli badawczych wykorzystanych w badaniach wstępnych</i>	87
<i>Rys. 7.2.2 Etap I – osadzanie starterów zbrojenia rdzeni w prefabrykowanej belce</i>	88
<i>Rys. 7.2.3 Etap II – murowanie ścian</i>	89
<i>Rys. 7.2.4 Etap III – Zbrojenie rdzeni, przygotowanie szalunku do połowy wysokości rdzenia</i>	89
<i>Rys. 7.2.5 Etap IV – Zbrojenie naroży rdzeni i rygla górnego</i>	90
<i>Rys. 7.2.6 Etapy wykonywania modeli skrępowanych bez otworu</i>	90
<i>Rys. 7.2.7 Stanowisko badawcze do badania odkształceń</i>	91
<i>Rys. 7.2.8 Widok ściany skrępowanej betonem zwykłym z układem baz pomiarowych i czujników zegarowych (model MS-Z1-1)</i>	92
<i>Rys. 7.2.9 Pomiar przemieszczeń muru systemem optycznym Aramis (model MS-Z1-1)</i>	93
<i>Rys. 7.2.10 Pomiar przemieszczeń betonu czujnikiem laserowym (model MS-Z1-1)</i>	93
<i>Rys. 7.2.11 Badania skurczu swobodnego. Widok stanowiska badawczego</i>	94
<i>Rys. 7.2.12 Wyniki modelu MSL-Z1-1</i>	95
<i>Rys. 7.2.13 Odkształcenia baz pomiarowych modelu MSL-Z1-1</i>	96
<i>Rys. 7.2.14 Model MSL-Z1-1: a) zarysowanie muru; b) zarysowanie betonu</i>	96
<i>Rys. 7.2.15 Wyniki modelu MS-Z1-1</i>	98
<i>Rys. 7.2.16 Odkształcenia baz pomiarowych modelu MS-Z1-1</i>	98
<i>Rys. 7.2.17 Wyniki pomiarów skurczu swobodnego</i>	99
<i>Rys. 7.3.1 Widok modeli badawczych bez otworu: a) model bez skrępowania, b) model skrępowany obwodowo</i>	104
<i>Rys. 7.3.2 Widok modeli badawczych z otworem: a) model bez skrępowania, b) model skrępowany obwodowo, c) model skrępowany obwodowo z dodatkowymi rdzeniami przy otworze</i>	105



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

<i>Rys. 7.3.3 Widok nadproży z usuniętym betonem w strefie przypodporowej do zastosowania w modelach z dodatkowym skrępowaniem wokół otworu</i>	106
<i>Rys. 7.3.4 Etap III – Częściowo zabetonowane rdzenie</i>	107
<i>Rys. 7.3.5 Etap IV – wykonane modele serii MS-Z2 i M2SO-Z2 (etapy I, II oraz część etapu IV przedstawiono na rys. 7.2.2, rys. 7.2.3, rys. 7.2.4)</i>	107
<i>Rys. 7.3.6 Etapy wykonywania modeli skrępowanych z otworem MSO</i>	108
<i>Rys. 7.3.7 Etapy wykonywania modeli M2SO</i>	108
<i>Rys. 7.3.8 Stanowisko badawcze muru bez skrępowania i skrępowanego (dla modelu bez otworu)</i>	110
<i>Rys. 7.3.9 Stanowisko badawcze muru bez skrępowania i skrępowanego (dla modelu z otworem)</i>	110
<i>Rys. 7.3.10 Stanowisko do badań modeli w skali naturalnej</i>	111
<i>Rys. 7.3.11 Belka trawersowa oraz siłownik i siłomierz przymocowane do ramy</i>	112
<i>Rys. 7.3.12 Szczegóły układu przekazywania obciążenia</i>	112
<i>Rys. 7.3.13 Po prawej stronie widoczny nieregularny „nakrapiany” wzór do prowadzenia bezdotykowego pomiaru optycznego systemem cyfrowej korelacji obrazu Aramis</i>	113
<i>Rys. 7.3.14 Widok modeli przed badaniem</i>	114
<i>Rys. 7.3.15 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli nieskrępowanych z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MNS-Z1-1, b) MNS-Z1-2</i>	117
<i>Rys. 7.3.16 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań nieskrępowanych modeli z wypełnionymi spoinami czołowymi: a) MNS-Z2-1, b) MNS-Z2-2</i>	118
<i>Rys. 7.3.17 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MS-Z1-1, b) MS-Z1-2</i>	119
<i>Rys. 7.3.18 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań skrępowanych modeli z wypełnionymi spoinami czołowymi: a) MS-Z2-1, b) MS-Z2-2</i>	120
<i>Rys. 7.3.19 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań skrępowanych modeli betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MSL-Z1-1, b) MSL-Z1-2</i>	121
<i>Rys. 7.3.20 Szkice uszkodzeń ścian bez skrępowania a) MNS-Z1, b) MNS-Z2 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania, kolorem żółtym zaznaczono powierzchnie odłupane, kolorem ciemnym szarym (poza elementami żelbetowymi) zaznaczono elementy odspojone</i>	122
<i>Rys. 7.3.21 Szkice uszkodzeń ścian bez skrępowania a) MS-Z1, b) MS-Z2 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania, kolorem żółtym zaznaczono powierzchnie odspojone</i>	123
<i>Rys. 7.3.22 Szkic uszkodzeń ściany skrępowanej betonem lekkim (MSL-Z1) – liniami czerwonymi pokazano zarysowania, kolorem żółtym zaznaczono powierzchnie odspojone</i>	123
<i>Rys. 7.3.23 Uszkodzenie modeli nieskrępowanych z niewypełnionymi spoinami pionowymi:</i>	124
<i>Rys. 7.3.24 Uszkodzenie modeli nieskrępowanych z wypełnionymi spoinami pionowymi:</i>	125



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

<i>Rys. 7.3.25 Uszkodzenie modeli z skrępowanych niewypełnionymi spoinami pionowymi: a) MS-Z1-1, b) MS-Z1-2</i>	126
<i>Rys. 7.3.26 Uszkodzenie modeli skrępowanych z wypełnionymi spoinami pionowymi:</i>	127
<i>Rys. 7.3.27 Uszkodzenia muru skrępowanego betonem lekkim</i>	128
<i>Rys. 7.3.28 Uszkodzenia muru skrępowanego betonem lekkim</i>	128
<i>Rys. 7.3.29 Uszkodzenia muru skrępowanego betonem lekkim</i>	129
<i>Rys. 7.3.30 Uszkodzenia muru (model MSL-Z1-2) skrępowanego betonem lekkim zarejestrowane przez system Aramis – bezdotykowy pomiar optycznej korelacji cyfrowej</i>	129
<i>Rys. 7.3.31 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli nieskrępowanych z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MNSO-Z1-1, b) MNSO-Z1-2</i>	131
<i>Rys. 7.3.32 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli nieskrępowanych z wypełnionymi spoinami czołowymi: a) MNSO-Z2-1, b) MNSO-Z2-2</i>	132
<i>Rys. 7.3.33 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MSO-Z1-1, b) MSO-Z1-2</i>	133
<i>Rys. 7.3.34 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych z wypełnionymi spoinami czołowymi: a) MSO-Z2-1, b) MSO-Z2-2</i>	134
<i>Rys. 7.3.35 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych podwójnie z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) M2SO-Z1-1, b) M2SO-Z1-2</i>	135
<i>Rys. 7.3.36 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych podwójnie z wypełnionymi spoinami czołowymi: a) M2SO-Z2-1, b) M2SO-Z2-2</i>	136
<i>Rys. 7.3.37 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) MSLO-Z1-1, b) MSLO-Z1-2</i>	137
<i>Rys. 7.3.38 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych podwójnie betonem lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi: a) M2SLO-Z1-1, b) M2SLO-Z1-2</i>	138
<i>Rys. 7.3.39 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli bez skrępowania z niewypełnionymi spoinami czołowymi i nadprożem żelbetowym: a) MNSO-LC-1, b) MNSO-LC-2</i>	139
<i>Rys. 7.3.40 Szkice uszkodzeń modeli a) MNSO-Z1, b) MNSO-Z2 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania, kolorem żółtym zaznaczono powierzchnie odspojone</i>	140
<i>Rys. 7.3.41 Szkice uszkodzeń modeli a) MSO-Z1 b) MSO-Z2 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania, kolorem żółtym zaznaczono powierzchnie odspojone</i>	141
<i>Rys. 7.3.42 Szkice uszkodzeń modeli a) M2SO-Z1 b) M2SO-Z2 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania</i>	142
<i>Rys. 7.3.43 Szkic uszkodzeń modelu MSLO-Z1– liniami czerwonymi pokazano zarysowania</i>	143
<i>Rys. 7.3.44 Szkic uszkodzeń modelu M2SLO-Z1– liniami czerwonymi pokazano zarysowania</i>	143



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Rys. 7.3.45 Uszkodzenia modeli nieskrępowanych z niewypełnionymi spoinami pionowymi: a) MNSO-Z1-1, b) MNSO-Z1-2	144
Rys. 7.3.46 Uszkodzenia modeli nieskrępowanych z wypełnionymi spoinami pionowymi: a) MNSO-Z2-1, b) MNSO-Z2-2	145
Rys. 7.3.47 Uszkodzenia modeli skrępowanych obwodowo z wypełnionymi spoinami pionowymi: a) MSO-Z1-1, b) MSO-Z1-2	146
Rys. 7.3.48 Uszkodzenia modeli skrępowanych obwodowo z wypełnionymi spoinami pionowymi: a) MSO-Z2-1, b) MSO-Z2-2	147
Rys. 7.3.49 Uszkodzenia modeli skrępowanych podwójnie z wypełnionymi spoinami pionowymi: a) M2SO-Z1-1, b) M2SO-Z1-2	148
Rys. 7.3.50 Uszkodzenia modeli skrępowanych podwójnie z wypełnionymi spoinami pionowymi: a) M2SO-Z2-1, b) M2SO-Z2-2	149
Rys. 7.4.1 Żelbetowe prefabrykowane nadproże stosowane w badaniach dodatkowych	152
Rys. 7.4.2 Widok murów podczas badań: a) MNSO-LC-Z1-1, b) MNSO-LC-Z1-2	152
Rys. 7.4.3 Widok murów podczas badań: a) MSO-SC-Z1-1, b) MSO-SC-Z1-2	153
Rys. 7.4.4 Widok murów podczas badań: a) M2SO-SC-Z1-1, b) M2SO-SC-Z1-2	153
Rys. 7.4.5 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli bez skrępowania z niewypełnionymi spoinami czołowymi i nadprożem żelbetowym: a) MNSO-LC-1, b) MNSO-LC-2	156
Rys. 7.4.6 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych z niewypełnionymi spoinami czołowymi i nadprożem żelbetowym:	157
Rys. 7.4.7 Wykresy siła-odkształcenie uzyskane z badań modeli skrępowanych podwójnie, z niewypełnionymi spoinami czołowymi i nadprożem żelbetowym: a) M2SO-SC-1, b) M2SO-SC-2	158
Rys. 7.4.8 Szkic uszkodzeń modelu MNSO-LC – liniami czerwonymi pokazano zarysowania	159
Rys. 7.4.9 Szkic uszkodzeń modelu MSO-SC-Z1 – liniami czerwonymi pokazano zarysowania	159
Rys. 7.4.10 Szkic uszkodzeń modelu M2SO-SC-Z1 - liniami czerwonymi pokazano zarysowania	159
Rys. 7.4.11 Uszkodzenia modeli bez skrępowania z niewypełnionymi spoinami pionowymi: a) i b) MNSO-LC	160
Rys. 7.4.12 Uszkodzenia modeli skrępowanych obwodowo z niewypełnionymi spoinami pionowymi: a) i b) MSO-SC	161
Rys. 7.4.13 Uszkodzenia modeli skrępowanych podwójnie z niewypełnionymi spoinami pionowymi: a) i b) M2SO-SC	162
Rys. 7.4.14 Model badawczy fragmentu ściany: a) rysunek modelu, b) model po badaniu	163
Rys. 7.4.15 Model badawczy fragmentu ściany na stanowisku badawczym a) rysunek z opisem: 1 – bloczki z ABK, 2 – posadzka, 3 – rama przyłożenia siły, 4 – siłomierz, 5 – siłownik, 6 – trawersy przekazujące obciążenie, 7 – podkładki walcowe i płaskie przekazujące obciążenie, 8 – ściąg poziomy, 9 – płyta dociskowa	



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

<i>ściąggu, 10 – mierniki przemieszczeń, 11 – sprężyna przekazująca siłę ze ściąggu, 12 – siłomierz, 13 – wieniec żelbetowy lub z betonu lekkiego.....</i>	<i>164</i>
<i>Rys. 7.4.16 Zniszczenia modeli badawczych a) Model NIII – N [69].....</i>	<i>166</i>
<i>Rys. 7.4.17 Zniszczenia modeli badawczych Model NIII - L – N1.....</i>	<i>167</i>
<i>Rys. 7.4.18 Zniszczenia modeli badawczych Model NIII - L – N2.....</i>	<i>168</i>
<i>Rys. 7.4.19 Model oddziaływania sił, na podstawie którego obliczono nośność układu nadproże-warstwa muru-wieniec z betonu lekkiego.....</i>	<i>169</i>
<i>Rys. 8.1.1 Wykres - siły rysujące i niszczące w modelach murów pełnych</i>	<i>172</i>
<i>Rys. 8.1.2 Wykres – uśrednione siły rysujące i niszczące w modelach murów pełnych</i>	<i>172</i>
<i>Rys. 8.1.3 Uśrednione wyniki w ramach serii zależności σ_y-ϵ_y.....</i>	<i>173</i>
<i>Rys. 8.1.4 Uśrednione wyniki w ramach serii zależności σ_y-ϵ_{x1} (górne czujniki).....</i>	<i>174</i>
<i>Rys. 8.1.5 Uśrednione wyniki w ramach serii zależności σ_y-ϵ_{x2} (dolne czujniki)</i>	<i>174</i>
<i>Rys. 8.1.6 Wykresy z badań nieskrępowanych i skrępowanych ścian pełnych: a) maksymalna siła – odkształcenie pionowe, b) maksymalna siła – odkształcenie poziome na górnych czujnikach c) maksymalna siła – odkształcenie poziome na dolnych czujnikach</i>	<i>175</i>
<i>Rys. 8.2.1 Wykres - siły rysujące i niszczące w modelach murów z otworem</i>	<i>178</i>
<i>Rys. 8.2.2 Wykres – uśrednione siły rysujące i niszczące w modelach murów z otworem.....</i>	<i>178</i>
<i>Rys. 8.2.3 Wykresy z badań nieskrępowanych i skrępowanych zewnętrznie ścian z otworem:</i>	<i>180</i>
<i>Rys. 8.2.4 Wykresy z badań nieskrępowanych i skrępowanych zewnętrznie i wewnętrznie ścian z otworem:</i>	<i>181</i>
<i>Rys. 8.3.1 Wykres - siły rysujące i niszczące w modelach murów pełnych i z otworem</i>	<i>184</i>
<i>Rys. 8.3.2 Wykres – uśrednione siły rysujące i niszczące w modelach murów pełnych i z otworem</i>	<i>184</i>
<i>Rys. 8.3.3 Porównanie uśrednionych wykresów siła-odkształcenie modeli bez otworu i z otworem: a) ściany z niewypełnionymi spoinami pionowymi, b) ściany z wypełnionymi spoinami pionowymi.....</i>	<i>185</i>
<i>Rys. 9.1.1 Wykres – zgodność nośności z wyników z badań z PrEN EC6 [N26] oraz EN EC6 [N18].....</i>	<i>188</i>
<i>Rys. 9.2.1 Modele numeryczne ścian: a) MNS-Z1, b) MS-Z1, c) MNO-Z1, d) MSO-Z1, e) M2SO-Z1</i>	<i>194</i>
<i>Rys. 9.2.2 Modele numeryczne w fazie zniszczenia: a) MNS-Z1, b) MS-Z1, c) MNO-Z1, d) MSO-Z1, e) M2SO-Z1</i>	<i>195</i>
<i>Rys. 9.2.3 Porównanie wyników badań ścian pełnych z wynikami symulacji numerycznych: a) ściany nieskrępowane, b) ściany skrępowane.....</i>	<i>195</i>
<i>Rys. 9.2.4 Porównanie wyników badań ścian z otworem z wynikami symulacji numerycznych: a) ściany nieskrępowane, b) ściany skrępowane zewnętrznie, c) ściany skrępowane zewnętrznie i wewnętrznie.....</i>	<i>196</i>
<i>Rys. 9.3.1 Układ zarysowań, naprężenia główne MES oraz propozycja modelu prętowego dla: a) modeli skrępowanych bez otworu serii MS-Z1, b) modeli skrępowanych obwodowo serii MSO-Z1, c) modeli skrępowanych obwodowo i wewnętrznie serii M2SO-Z1</i>	<i>197</i>



Tomasz Rybarczyk. Rozprawa Doktorska. Nośność i odkształcalność ściskanych murów z betonu komórkowego skrępowanych konstrukcją żelbetową

Rys. 9.3.2 Układ zarysowań, naprężenia główne MES oraz propozycja modelu prętowego dla: a) modelu skrępowanego bez otworu serii MSL-Z1, b) modeli skrępowanych z otworem MSLO, c) modeli skrępowanych obwodowo i wewnątrznie serii M2SLO..... 198

Rys. 9.3.3 Zgodność nośności metody Strut & Tie z wynikami z badań..... 201



18. Wykaz tabel

<i>Tablica 4.4.1 Zestawienie badanych elementów próbnych według [36] [76]</i>	<i>23</i>
<i>Tablica 4.4.2 Wyniki badań Da Porto, Mosele i Modeny [8] [75].....</i>	<i>27</i>
<i>Tablica 4.5.1 Wzory na nośność muru skrępowanego</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 4.5.2 Wzory opisujące szerokość pasma ściskanego muru.....</i>	<i>32</i>
<i>Tablica 6.2.1 Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie elementów murowych.....</i>	<i>63</i>
<i>Tablica 6.2.2 Wytrzymałość znormalizowana i klasa wytrzymałości na ściskanie</i>	<i>66</i>
<i>Tablica 6.3.1 Wyniki badań w trójosiowym stanie naprężenia</i>	<i>69</i>
<i>Tablica 6.4.1. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie elementów próbnych muru</i>	<i>72</i>
<i>Tablica 6.4.2. Uśrednione wyniki badań wytrzymałości na ściskanie elementów próbnych muru.....</i>	<i>72</i>
<i>Tablica 6.4.3. Charakterystyczna wytrzymałość muru na ściskanie.....</i>	<i>74</i>
<i>Tablica 6.6.1 Wyniki badań zaprawy murarskiej do cienkich spoin</i>	<i>78</i>
<i>Tablica 6.8.1 Wyniki badań betonu zwykłego</i>	<i>81</i>
<i>Tablica 6.9.1 Wyniki badań wytrzymałościowych betonu lekkiego po 1, 3 7 i 28 dniach dojrzewania w temperaturze 20°C i wilgotności powietrza 60 %.....</i>	<i>85</i>
<i>Tablica 7.3.1. Program badań zasadniczych ścian skrępowanych ściskanych</i>	<i>101</i>
<i>Tablica 7.3.2. Wyniki badań murów bez otworu pod obciążeniem skupionym</i>	<i>116</i>
<i>Tablica 7.3.3 Wyniki badań murów z otworem pod obciążeniem skupionym</i>	<i>130</i>
<i>Tablica 7.4.1 Program badań modeli murów z nadprożem żelbetowym.....</i>	<i>151</i>
<i>Tablica 7.4.2 Siły rysujące i niszczące w modelach murów z otworem i nadprożem żelbetowym.....</i>	<i>155</i>
<i>Tablica 7.4.3 Siły rysujące i niszczące w modelach fragmentów muru z otworem.....</i>	<i>165</i>
<i>Tablica 8.1.1 Siły rysujące i niszczące w modelach pełnych murów bez skrępowania i ze skrępowaniem....</i>	<i>171</i>
<i>Tablica 8.2.1 Siły rysujące i niszczące w modelach murów z otworem bez skrępowania i ze skrępowaniem (również betonem lekkim oraz z nadprożem żelbetowym).....</i>	<i>177</i>
<i>Tablica 8.3.1 Zestawienie wyników sił w badanych murach.....</i>	<i>183</i>
<i>Tablica 9.1.1 Parametry przyjęte do obliczeń.....</i>	<i>186</i>
<i>Tablica 9.1.2 Porównanie wyników badań z wynikami obliczeń.....</i>	<i>187</i>
<i>Tablica 9.2.1 Parametry modelu plastycznego i sprężystego ABK stosowane w obliczeniach</i>	<i>191</i>
<i>Tablica 9.2.2 Parametry elementów kontaktowych na styku muru i elementów żelbetowych.....</i>	<i>192</i>
<i>Tablica 9.2.3 Parametry mechaniczne stali zastosowane w modelu numerycznym.....</i>	<i>192</i>
<i>Tablica 9.2.4 Parametry sprężystego modelu degradacji elementów betonowych stosowane w obliczeniach</i>	<i>193</i>
<i>Tablica 9.3.1 Porównanie wyników obliczeń metodą S-T z wynikami badań</i>	<i>200</i>