

dr hab. inż. Łukasz Drobiec, prof. PŚ<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0001-9825-6343

mgr inż. Tomasz Rybarczyk<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0003-1431-9533

mgr inż. Krzysztof Grzyb<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0001-9039-5015

# Analiza porównawcza nieskrępowanych i skrępowanych ściskanych ścian z ABK

## *Comparative analysis of non-confined and confined compressed masonry made of AAC*

DOI: 10.15199/33.2020.01.03

**Streszczenie.** Mury skrępowane są stosowane dość powszechnie, a mimo to nie prowadzi się zbyt wielu badań dotyczących ich zachowania pod wpływem obciążenia statycznego. W Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej zostały przeprowadzone kompleksowe badania ścian wykonanych z elementów murowych z betonu komórkowego. Ich głównym celem było określenie wpływu skrępowania, w postaci żelbetowych rdzeni połączonych rygłem, na nośność, odkształcalność oraz rysoodporność ścian murowanych, poddanych ściskaniu w ich płaszczyźnie. Badania pozwoliły również na obserwację mechanizmu zarysowania i zniszczenia elementów próbnych.

**Słowa kluczowe:** autoklawizowany beton komórkowy; mur skrępowany; ściana ściskana.

**Abstract.** Although this type of construction is used quite widely, there is not much research on its behavior under static load. In the Laboratory of the Faculty of Civil Engineering at Silesian University of Technology, masonry walls made of autoclaved aerated concrete were tested under static load. The main purpose of the research was to determine the influence of confining masonry walls by reinforced concrete columns and beam on the load-bearing capacity, deformability and scratch resistance of masonry walls subjected to compression in their plane. Indirectly, the research also allowed for observations of the mechanism of scratches and destruction of sample elements.

**Keywords:** autoclaved aerated concrete; confined masonry; compressed walls.

Zgodnie z PN-EN 1996-1-1 [7] mur skrępowany charakteryzuje się tym, że odkształcenia w jego płaszczyźnie, w pionie i poziomie, zostały ograniczone przez przylegającą do niego konstrukcję żelbetową bądź mur zbrojony. Choć konstrukcja tego typu jest stosowana dość powszechnie, to nie prowadzi się zbyt wielu badań dotyczących jej zachowania pod wpływem obciążenia statycznego. Z drugiej jednak strony istnieje wiele badań dotyczących zachowania się tego typu konstrukcji na terenach aktywnych sejsmicznie. Warto nadmienić, że zagadnień tego rodzaju nie znajdziemy w EC6. Mury skrępowane wykonywano jednak w Polsce wcześniej, zanim wprowadzono normę europejską. Do projektowania takich ścian służyły publikacje czy też lokalne tradycje. Pomocna była również instrukcja ITB 391/2003 [3], dotycząca projektowania budynków na wpływy wstrząsów górniczych.

Ściana skrępowana składa się z części murowanej wykonanej z różnego rodzaju elementów murowanych, takich jak

błoczki z betonu komórkowego, pustaki ceramiczne, bloczki silikatowe, bloczki z betonu zwykłego. Skrępowanie natomiast może być zrealizowane za pomocą żelbetowych elementów kępujących w formie słupków, rygli, elementów dodatkowych lub muru zbrojonego. W rozdziale ósmym wspomnianej już normy EC6 wymaga się, aby pionowe i poziome elementy kępujące, wykonane z muru zbrojonego bądź żelbetu, pracowały z murowaną ścianą przy przenoszeniu oddziaływań jak jednorodny element. Ponadto elementy kępujące powinny być wykonane po wybudowaniu muru, aby zapewnić integralne połączenie ze ścianą. Elementy ograniczające odkształcenia muszą być na każdej kondygnacji, w każdym odcinku pomiędzy poszczególnymi ścianami i po bokach otworów o powierzchni większej niż 1,5 m<sup>2</sup>. Jeżeli rozpiętość w pionie czy poziomie danej ściany wynosi 4,0 m i więcej, mogą być potrzebne dodatkowe elementy kępujące.

### Badania prowadzone na świecie

Wiele publikacji dotyczy badań ścian skrępowanych poddanych oddziaływaniom sejsmicznym. Możemy do nich za-

liczyć analizy sześciu modeli ścian w skali rzeczywistej przeprowadzone na Uniwersytecie Ain Shams w Kairze [6] oraz badania modeli budynków murowanych z autoklawizowanego betonu komórkowego w skali 1:4 z wykorzystaniem stołu wstrząsowego [8]. Problem badawczy dotyczący zachowania się konstrukcji murowanej poddanej oddziaływaniu sejsmicznemu podjęty został również na Uniwersytecie w Minho, w Portugalii, gdzie przeprowadzono nie tylko badania eksperymentalne, ale również dokonano wnikliwej analizy numerycznej. Testowane modele badawcze różniły się pomiędzy sobą sposobem zbrojenia, wypełnieniem spoin pionowych oraz skrępowaniem. W badaniach wykorzystano bloczki z betonu komórkowego wykonane w skali 1:2 [4].

Do publikacji poruszających problematykę ścian skrępowanych obciążonych monotonicznie możemy zaliczyć badania elementów próbnych, różniących się konfiguracją zbrojenia, zrealizowane w Kanadzie, na Uniwersytecie Concordia [5], a także badania w Rumunii, w których zastosowano elementy próbne nieposiadające zbrojenia prętowego [2].

<sup>1)</sup> Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

<sup>2)</sup> Solbet Sp. z o.o.

<sup>\*</sup> Adres do korespondencji: lukasz.drobiec@polsl.pl

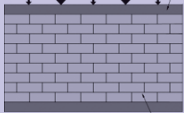
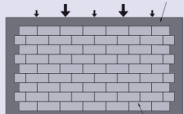
## Badania przeprowadzone na Politechnice Śląskiej

W Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej zostały przeprowadzone kompleksowe badania ścian wykonanych z elementów mурowych z betonu komórkowego. Ich głównym celem było określenie wpływu skrępowania, zrealizowanego w postaci żelbetowych rdzeni połączonych rygłem, na nośność, odkształcalność oraz rysoodporność mурowanych ścian, poddanych ścisłaniu w ich płaszczyźnie. Pośrednio badania pozwoliły również na obserwację mechanizmu zarysowania i zniszczenia elementów próbnych.

Badania polegały na analizie zachowania nieskrępowanych i skrępowanych ścian mурowanych z autoklawizowanego betonu komórkowego, poddanych oddziaływaniu ścisłającemu. W tym celu wykonano modele próbne w skali naturalnej o długości 4,43 m, wysokości 2,65 m oraz grubości 0,18 m. Murwane ściany różniły się wypełnieniem spoin czołowych. Mury nieskrępowane opisano jako „MNS”, skrępowane zaś jako „MS”. W każdym opisie występował również symbol związany z niewypełnieniem bądź wypełnieniem spoin pionowych (kolejno „Z1” i „Z2”) oraz numer modelu w danej serii [1]. Wszystkie badane ściany wraz z oznaczeniami, sposobem skrępowania i widokiem geometrii zestawiono w tabeli 1. Na poglądowych rysunkach ścian zaznaczono strzałkami miejsca przekazywania obciążenia, które było realizowane za pomocą dwóch siłowników tłokowych (strzałki dłuższe) oraz układu cięgien (strzałki krótsze).

**Tabela 1. Badane ściany nieskrępowane i skrępowane**

Table 1. Tested non-confined and confined walls

Widok ściany	Elementy badawcze	Liczba
	ściany nieskrępowane MNS-Z1-1 MNS-Z1-2 MNS-Z2-1 MNS-Z2-2	4
	ściany skrępowane MS-Z1-1 MS-Z1-2 MS-Z2-1 MS-Z2-2	4
Razem: 8		

Ściany zostały wykonane z elementów mурowych z betonu komórkowego SOLBET OPTIMAL grubości 180 mm. Bloczki były profilowane na pióro i wpust (oznaczono jako „PW”). Z takich elementów można wznosić konstrukcje ścian na cienkiej i zwykłej spoinie, przy czym spoiny pionowe mogą być wypełnione lub niewypełnione. Deklarowana wytrzymałość na ścisłanie  $f_b$  omawianych elementów wynosiła 4 N/mm<sup>2</sup>, klasa gęstości  $\rho = 600$  kg/m<sup>3</sup>, a kategoria elementów mурowych I. W przypadku spoiny wykonanej z dowolnej zaprawy cienkowarstwowej, deklarowana przez producenta wytrzymałość spoiny na ścisłanie wynosi 0,3 N/mm<sup>2</sup>, a wytrzymałość na zginanie w płaszczyźnie równoległej i prostopadłej do spoin wspornych, przy wypełnionych spoinach czołowych 0,14 N/mm<sup>2</sup>. Jeżeli nie wypełniono spoin pionowych, to deklarowana wytrzymałość na zginanie w płaszczyźnie prostopadłej do spoin wspornych również wynosi 0,14 N/mm<sup>2</sup>. Wymiary pojedynczego bloczka są następujące: 180 x 240 x 590 mm.

W celu umożliwienia łatwego transportu modeli badawczych wykonano je na belkach żelbetowych, w których można było również zakotwić zbrojenie pionowe rdzeni, w przypadku mурów skrępowanych. Ściany nieskrępowane były w górnej części zwieńczone żelbetowym wieńcem z betonu klasy C20/25, zbrojonym czterema prętami średnicy 10 mm, ze stali klasy A-IIIIN (gatunek B500SP) oraz strzemionami średnicy 8 mm co 125 mm.

Skrępowanie ścian zrealizowano w formie dwóch pionowych rdzeni usytuowanych wzdłuż krawędzi muru oraz górnego i dolnego rygla. Połączenie pionowych elementów krępujących z konstrukcją mурową wykonano w postaci ząbzących się strzępi o minimalnym zakładzie 50 mm. W związku z tym szerokość poprzecznego przekroju rdzeni wynosiła 180 – 230 mm (pole przekroju poprzecznego zmieniło się od 0,032 do 0,041 m<sup>2</sup>), przy stałej grubości muru 180 mm.

Pionowe rdzenie były zbrojone prętami ze stali B500SP średnicy 10 mm, umieszczonymi w każdym narożu przekroju. Uzyskano dzięki temu, przy minimalnej szerokości przekroju, stopień zbrojenia większy od minimalnego

( $\rho = 1,29\% > \rho_{\min} = 0,8\%$ ). Zbrojenie poprzeczne składało się ze strzemiń średnicy 8 mm, ze stali B500SP w rozstawie 125 mm na odcinkach górnych i dolnych oraz 250 mm w środkowej części rdzeni. Betonowe otulenie strzemiń wynosiło  $c_{\text{nom}} = 25$  mm.

Połączenie żelbetowych rdzeni z prefabrykowanym rygłem było możliwe dzięki zastosowaniu prętów zwanych „starterami” o średnicy 10 mm, połączonych na zakład z pionowym zbrojeniem rdzeni na odcinku o długości 1000 mm. Dolny rygiel reprezentował rzeczywisty strop lub wieńiec w konstrukcji i miał wymiary przekroju poprzecznego 250 x 165 mm (b x h) oraz długość wynoszącą 4,6 m. Element ten był prefabrykowaną podwaliną pozwalającą na wznoszenie konstrukcji modelu oraz jej transport do stanowiska badawczego. Było to możliwe dzięki zastosowaniu silnego zbrojenia na zginanie w postaci trzech prętów średnicy 16 mm przy każdej krawędzi oraz strzemiń o średnicy 10 mm w rozstawie równym 150 mm.

Górny rygiel wykonany został jako monolityczny o szerokości i wysokości wynoszącej 180 mm, zbrojony prętami ze stali B500SP o średnicy 10 mm. Strzemiona miały średnicę 8 mm i były rozmieszczone co 125 mm na odcinkach zakładów prętów podłużnych oraz co 250 mm w pozostałej części elementu. W celu zapewnienia ciągłości połączenia górnego rygla z pionowymi rdzeniami zastosowano w narożach dodatkowe zbrojenie w postaci prętów o średnicy 10 mm, wygiętych pod kątem prostym. Minimalny zasięg dozbrojenia w górnym ryglu wynosił 580 mm, a w żelbetowych rdzeniach 1250 mm. Elementy krępujące zostały wykonane z betonu klasy C20/25 z zachowaniem betonowej otuliny wynoszącej  $c_{\text{nom}} = 25$  mm.

Badane ściany obciążano w dwóch etapach. W pierwszym równomierne oddziaływanie ścisłające zrealizowano za pomocą trzech układów cięgnowych połączonych z siłownikami tłokowymi, aż do wyczerpania zakresu ich pracy. W drugim etapie wykorzystano siłowniki hydrauliczne. Jednostajny przyrost obciążenia uzyskano dzięki zastosowaniu automatycznej pompy zwiększającej ciśnienie w siłownikach, zapierających

się o stalowe ramy zamocowane w płycie wielkich sił. W czasie badania rejestrowano siły uzyskane w siłomierzach, które zabudowane były pod stalowymi ramami oraz na ciągnach. Za pomocą transformatorowych przetworników przemieszczeń liniowych mierzono również przemieszczenia na każdej bazie pomiarowej przymocowanej do ściany. Dokładność pomiaru wynosiła 0,02 mm. Rejestrację poszczególnych odczytów prowadzono za pomocą automatycznego stanowiska pomiarowego wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie. W badaniach wykorzystano również bezdotykowy pomiar optyczny systemem Aramis. Związane to było z koniecznością pomalowania muru w nieregularny wzór. W ścianach, w których zastosowano to rozwiązanie, analizowano naprzemiennie strefę boczną – krańdźwiową oraz strefę środkową modeli.

## Wyniki badań

Za całkowitą siłę przyłożoną na dany model badawczy uznano sumę poszczególnych obciążeń dla układów ciągnowych oraz siłowników hydraulicznych. W obliczeniach pominięto ciężar własny stalowych trawersów. W tabeli 2 zestawiono wartości sił rysujących  $P_{cr}$  oraz sił niszczących  $P_{max}$  wszystkich modeli. Podano również wielkość przyrostu nośności wynikającą z obecności elementów krępujących.

W celu określenia wpływu skrupowania na badane ściany sporządzono zbiorcze wykresy siła – odkształcenie. Poszczególne wykresy są uśrednieniem wartości uzyskanych na podstawie pomiarów z transformatorowych czujników przemieszczeń liniowych znajdujących

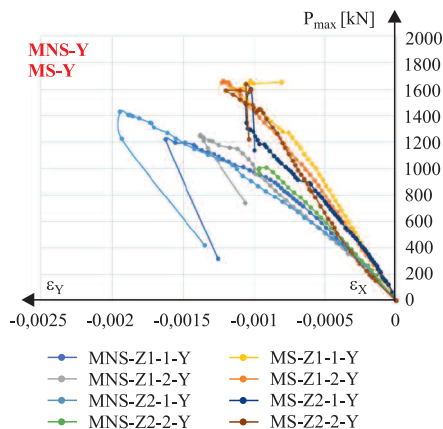
**Tabela 2. Siły niszczące i rysujące badane ściany nieskrępowane i skrupowane**  
*Table 2. Maximum forces and cracking forces for tested non-confined and confined walls*

Oznaczenie ściany	$P_{cr}$ [kN]	$P_{max}$ [kN]	Przyrost nośności [%]
MNS-Z1-1	475,62	1223,32	36,0
MS-Z1-1	480,20	1664,23	
MNS-Z1-2	473,84	1255,17	32,5
MS-Z1-2	472,73	1662,65	
MNS-Z2-1	377,08	1431,07	11,8
MS-Z2-1	456,63	1600,05	
MNS-Z2-2	332,03	1006,30	62,8
MS-Z2-2	371,83	1638,45	

się w przykrawędziowej części muru (po jednej bazie pomiarowej wyposażonej w cztery czujniki z każdej strony ściany). Wartości pionowych odkształceń obliczono na podstawie średniej z czterech czujników, oznaczonych na wykresach symbolem „Y”. Odkształcenia poziome analizowano oddzielnie w przypadku górnej i dolnej części bazy pomiarowej – kolejno czujniki „X1” i „X2” (średnia obliczona na podstawie odczytów z dwóch czujników, po jednym z każdej strony modelu).

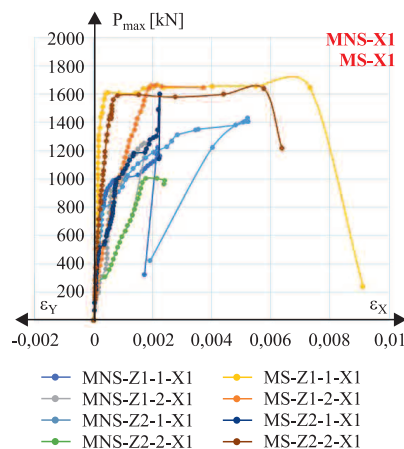
Na rysunku 1 pokazano odkształcenia pionowe w ścianach nieskrępowanych i skrupowanych bez otworów, a odkształcenia poziome na rysunku 2 (górna część bazy pomiarowej) i rysunku 3 (dolna część bazy pomiarowej).

Wykorzystana w badaniach bezdotykowa aparatura pomiarowa pozwoliła m.in. na analizę morfologii za-



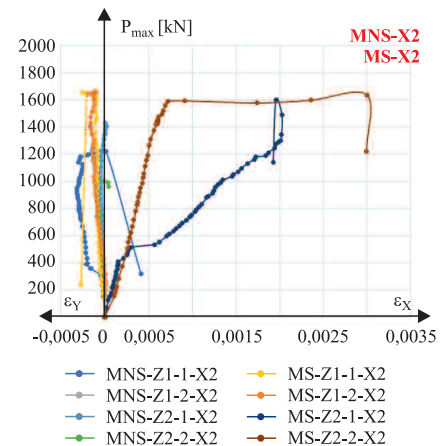
**Rys. 1. Wykres obciążenie – odkształcenie pionowe**

*Fig. 1. Stress-vertical strain curves*



**Rys. 2. Wykres obciążenie – odkształcenie poziome (górna baza pomiarowa)**

*Fig. 2. Stress-horizontal strain curves (upper measuring base)*



**Rys. 3. Wykres obciążenie – odkształcenie poziome (dolna baza pomiarowa)**

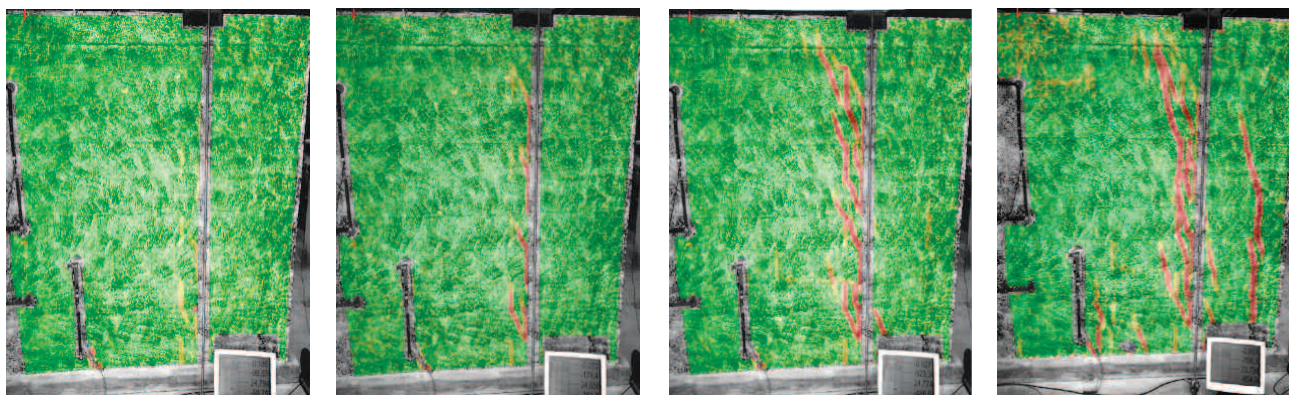
*Fig. 3. Stress-horizontal strain curves (lower measuring base)*

rysowania. Na fotografii 1 widoczne są kolejne etapy rozwoju rys modelu MS-Z2-2. Początkowo pojawiło się niewielkie zarysowanie biegnące wzdłuż układu ciągnowego, a następnie doszło do propagacji rys wzdłuż uprzednio powstałych zniszczeń. W końcowej fazie obserwowano rysy ukośne przebiegające od miejsca przyłożenia obciążenia z belek trawersowych do podstawy modelu.

## Obserwacje

Na podstawie wykresów zależności siła – odkształcenie każdej z badanych ścian można zauważyć podobny rozkład odkształceń na kierunku pionowym „Y”. W przypadku odkształceń poziomych uzyskanych w górnej i dolnej części bazy pomiarowej występują różnice w przebiegu krzywych. We wszystkich ścianach nieskrępowanych i skrupowanych z niewypełnionymi spoinami pionowymi rozciąganie uzyskano w przypadku odkształceń poziomych w górnej części ramki pomiarowej, a ściskanie w dolnej części. Ściany pełne skrupowane z wypełnionymi spoinami pionowymi charakteryzowały się zbliżonym przebiegiem odkształceń poziomych. W tym przypadku uzyskano tylko rozciąganie.

Zniszczenie badanych ścian było podobne i nastąpiło przez zmiążdżenie lub odspojenie bocznych powierzchni elementów murowych usytuowanych bezpośrednio poniżej żelbetowego wieńca. W ścianach nieskrępowanych MNS-Z1-2 oraz MNS-Z2-1 pojawiły się również rysy ukośne przebiegające od miejsca



**Fot. 1. Obraz postępującego zarysowania ściany skrepowanej MS-Z2-2, uzyskany dzięki wykorzystaniu bezdotykowej aparatury pomiarowej ARAMIS**

*Photo 1. Cracking confined wall MS-Z2-2 – pictures obtained using non-contact Aramis apparatus*

przyłożenia siły z trawersu ramy do dolnej części modelu. W momencie zniszczenia ścian nieskrepowanych rozwarcie rys było znaczące i w niektórych miejscach przekraczało 7 mm. W murze oznaczonym jako MNS-Z2-1 doszło do zawalenia się modelu wzdłuż uprzednio powstałej krawędzi zarysowania (fotografia 2). W ścianach skrepowanych zaobserwowano również rysy ukośne. Miały one jednak zdecydowanie mniejsze rozwarcie, które nie przekraczało 0,5 mm, co wskazuje na bardzo korzystny wpływ elementów krepujących na ograniczenie deformacji muru obciążonego pionowo. W ścianach skrepowanych, podobnie jak w ścianach bez



**Fot. 2. Zarysowanie modelu MNS-Z2-1**

*Photo 2. Cracked model MNS-Z2-1*

elementów krepujących, zniszczenie następowało przez miażdżenie elementów murowych oraz lokalne odspojenie powierzchni bocznych bloczków, zlokalizowanych głównie pod rygłem wieńczącym daną ścianę (fotografia 3).



**Fot. 3. Zarysowanie modelu MS-Z2-2**

*Photo 3. Cracked model MS-Z2-2*

## Podsumowanie

Wypełnienie spoin pionowych nie wpłynęło na wartość sił rysujących i niszczących poszczególne modele, a uzyskanie prostej zależności pomiędzy wypełnieniem spoin czołowych a zachowaniem się ściany było nieoczywiste. Badania wykazały istotną rolę elementów krepujących w zwiększeniu nośności ściany murowanej. Porównując ze sobą poszczególne konstrukcje, zarejestrowano średni przyrost nośności 11,8 ÷ 62,8%. Samo skrepowanie nie miało jednak wpływu na wartości sił rysujących – modele ulegały zarysowaniu przy podobnym poziomie obciążenia.

Zastosowanie elementów krepujących miało bardzo duże znaczenie w przypadku morfologii zarysowań. W ścianach nieskrepowanych obserwowano zarysowania o rozwarości nawet 7 mm, a w odpowiadających ścianach skrepowanych rozwarcie rys nie przekraczało warto-

ści 0,5 mm. W przypadku ściany nieskrepowanej z wypełnionymi spoinami pionowymi doszło nawet do zawalenia się części modelu. Sytuacja ta nie miała miejsca w ścianach wymurowanych pomiędzy elementami krepującymi.

## Literatura

- [1] Drobiec Łukasz, Tomasz Rybarczyk. 2018. „Influence of reinforced concrete confining on the load-bearing capacity of the AAC walls”. *ce/papers*, Vol. 2, No. 4, p. 409 – 415.
- [2] Iemutan Răzvan Andrei, Florin Babota. 2017. „Autoclaved Cellular Concrete (ACC) Masonry with Vertical Hollows Confined with Disperse Reinforced Concrete”. *Procedia Engineering*, Vol. 181, p. 300 – 307.
- [3] Instrukcja nr 391/2003. Projektowanie budynków podlegającym wpływowi wstrząsów gómiczych. Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie.
- [4] Medeiros P., G. Vasconcelos, P. B. Lourenço, J. Gouveia. 2013. „Numerical modelling of non-confined and confined masonry walls.” *Construction and Building Materials*, Vol. 41, p. 968 – 976.
- [5] Obaidat Ala T, Ahmad Abo El Ezz, Khaled Galal. 2017. „Compression behavior of confined concrete masonry boundary elements”. *Engineering Structures*, Vol. 132, p. 562 – 575.
- [6] Okail Hussein, Amr Abdelrahman, Amr Abdelkhalik, Mostafa Metwaly. 2016. „Experimental and analytical investigation of the lateral load response of confined masonry walls”. *HBRC Journal*, Vol. 12, No. 1, p. 33 – 46.
- [7] PN-EN 1996-1-1:2013. Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych. PKN.
- [8] Tomažević Miha, Matija Gams. 2010. „Seismic Behaviour of Confined Autoclaved Aerated Concrete Masonry Buildings: a Shaking Table Study”. *Mauerwerk*, Vol. 14, No. 3, p. 153-160.

*Przyjęto do druku: 29.11.2019 r.*

Partner działu:

**Stowarzyszenie Producentów Betonów**

