

dr hab. inż. Łukasz Drobiec, prof. PŚ.¹⁾
 dr hab. inż. Radosław Jasiński, prof. PŚ.¹⁾
 mgr inż. arch. Tomasz Rybarczyk²⁾
 mgr inż. Grzegorz Cygan¹⁾
 dr inż. Wojciech Mazur^{1)*}

Zmiana odkształceń ścian z elementów murowych z ABK spowodowana oddziaływaniem żelbetowych elementów krępujących

Research of strains changes of walls made of AAC masonry units caused by the effect of reinforced concrete confined elements

DOI: 10.15199/33.2019.12.03

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów odkształceń ścian z elementów murowych z ABK w trakcie wykonywania żelbetowego skrupowania. Ściany w skali naturalnej o grubości 180 mm wzniesiono z bloczków nominalnej klasy gęstości 600, na systemowej zaprawie cienkowarstwowej, bez wypełniania zaprawą spoin czołowych. W trakcie procesu krępowania monitorowano odkształcenia ścian. Badania wykazały wpływ rodzaju zastosowanego betonu na przebieg procesu skurczu betonu oraz wartości odkształceń ścian.

Słowa kluczowe: autoklawizowany beton komórkowy (ABK); mury skrupowane; skurcz; system cyfrowej korelacji obrazu (DIC).

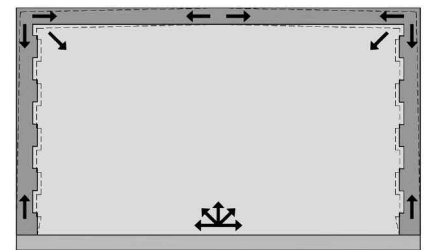
Abstract. The article presents the results of measurements of AAC wall deformations during the process of their restraint with reinforced concrete cores and beam. Full scale walls thickness of 180 mm were made of 600 nominal density class blocks on a system thin-layer mortar, without filling the perpend joints. During the restraining process, wall deformations were monitored. Studies have shown the impact of the type of concrete used on the concrete shrinkage process and the wall strains.

Keywords: Autoclaved Aerated Concrete (AAC); confined masonry; shrinkage; digital image correlation (DIC) system.

Niekorzystny wpływ skurczu betonu w konstrukcjach żelbetowych jest spowodowany jego niewłaściwą pielęgnacją, brakiem lub nadmiarem zbrojenia, względnie błędami technologicznymi, które mogą prowadzić do zarysowania konstrukcji. Zjawisko skurczu jest procesem naturalnym polegającym na samistnych odkształceniach reologicznych niezwiązanych z obciążeniami mechanicznymi i rozpoczyna się niezwłocznie po ułożeniu mieszanki betonowej. Odkształcenia skurczowe są spowodowane wiązaniem betonu oraz jego wysychaniem, a ich końcowy efekt nazywany jest **skurczem całkowitym** ϵ_{cs} [9, 11]. **Skurcz autogeniczny** $\epsilon_{cs,a}$ następuje od początku wiązania i trwa jeszcze w początkowym okresie twardnienia betonu. Główną przyczyną odkształceń skurczowych jest utrata wody wchodzącej w reakcję chemiczną oraz jej odprowadzenie z zewnętrznych powierzchni

jeszcze plastycznego betonu. W pierwszej fazie zwiększa się temperatura betonu wywołana procesem hydratacji cementu. Gdy element osiągnie maksymalną temperaturę, rozpoczyna się stygnięcie, a ciepło hydratacji jest odprowadzane do otoczenia. W związku z tym, że temperatura zewnętrzna jest niższa od temperatury wewnątrz przekroju elementu żelbetowego, powierzchnia zewnętrzna może ulegać zarysowaniu. W analogiczny sposób przebiega zjawisko skurczu spowodowanego wysychaniem zwanego **skurczem fizycznym** $\epsilon_{cs,d}$.

Zgodnie z [12] **mur skrupowany** to taki, którego odkształcenia w pionie i w poziomie zostały ograniczone przez przylegającą konstrukcję żelbetową. Aby uzyskać efekt skrupowania, najpierw wykonuje się mur, a następnie żelbetowe rdzenie i rygle [2]. W wyniku skurczu zachodzącego w elementach żelbetowych i skrócenia ich długości powstają naprężenia ściskające w murze, generując wstępny złożony stan dwuosiowego ściskania (rysunek 1). Wyniki analiz numerycznych przedstawione



Rys. 1. Wpływ skurczu betonu na odkształcenia ściany

Fig. 1. Influence of concrete shrinkage on deformation of wall

w [5, 6] wskazują, że w wyniku skrupowania powstają naprężenia w murze o wartości $0,2 \div 0,3$ MPa i zależą od skurczu spowodowanego wysychaniem. Mury skrupowane wykazują większą odporność na zarysowania i dlatego często są stosowane w obiektach wznoszonych na terenach sejsmicznych lub objętych wpływami eksploatacji górniczej.

Dostępnych jest wiele publikacji dotyczących badań murów skrupowanych poddanych obciążeniom statycznym [7, 8], cyklicznym oraz parasejsmicznym, ale nie poruszają one zagadnienia wpływu skurczu betonu na skrupowanie muru. Dotychczas do krępowania

¹⁾ Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

²⁾ Solbet Sp. z o.o.

^{*)} Adres do korespondencji: wojciech.mazur@polsl.pl

murów stosowano beton zwykły. Obecnie kładzie się duży nacisk na projektowanie budynków przyjaznych środowisku i o niewielkim zapotrzebowaniu na energię. W związku z tym projektuje się ściany o jak najmniejszym współczynniku przenikania ciepła. Wprowadzenie do muru rdzenia żelbetowego powoduje wystąpienie liniowego mostka termicznego, który pogarsza parametry termiczne przegrody budowlanej. Alternatywne rozwiązanie łączące zalety betonu oraz dobre parametry izolacyjności cieplnej może stanowić rdzeń z betonu lekkiego. W przeprowadzonych badaniach analizowano wpływ rdzenia żelbetowych wykonanych z betonu zwykłego i lekkiego na odkształcenie muru.

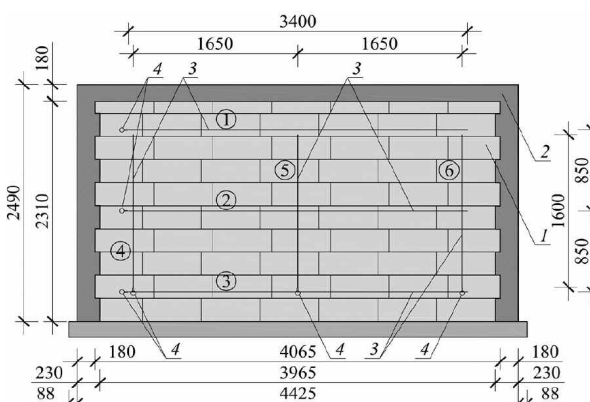
Badania

Badania doświadczalne obejmowały dwie serie elementów badawczych zróżnicowanych pod względem zastosowanego betonu, w każdej po dwa modele badawcze. Celem badań było określenie wpływu skrzepowania murów na wytrzymałość ścian na ściskanie, ale w pierwszej kolejności przeanalizowano wpływ skurczu na ich odkształcenie. Analizując wpływ rodzaju betonu, zbadano po jednej ścianie skrzepowanej betonem zwykłym i lekkim, stosując identyczną geometrię obwodowego skrzepowania i zbrojenia oraz układu elementów murowych. W modelu oznaczonym jako MS-Z1-1 (Mur Skrzepowany z niewypełnionymi spoinami czołowymi) zastosowano beton zwykły na cementzie CEM-I 42,5 R, o nominalnej klasie wytrzymałości C20/25 oraz konsystencji S3 [8]. Ścianę skrzepowaną betonem lekkim oznaczono jako MSL-Z1-1 (Mur Skrzepowany betonem Lekkim z niewypełnionymi spoinami czołowymi). Zastosowano beton lekki na kruszywie ze szkła piankowego, o gęstości 900 kg/m³ i średniej wytrzymałości na ściskanie 10 MPa. Elementy żelbetowe w przekroju poprzecznym miały wymiary 180 x 180 mm, a w miejscach występowania strzemi ząbujących 180 x 230 mm. Do wykonania murów zastosowano elementy murowe Solbet OPTIMAL o grubości 180 mm oraz systemową zaprawę do spoin cienkowarstwowych na białym cementzie. Parametry wytrzy-

małościowe elementów murowych oraz zaprawy przedstawiono w [3]. Zbrojenie podłużne elementów żelbetowych stanowiły cztery pręty o średnicy 10 mm, a zbrojenie poprzeczne pręty o średnicy 8 mm ze stali gatunku B500SP Epstal. Otulina zbrojenia wynosiła 25 mm. Modele ustawiono na stanowisku badawczym (rysunek 2) przeznaczonym do badania wytrzymałości ścian na ściskanie analogicznie jak w badaniach [3].

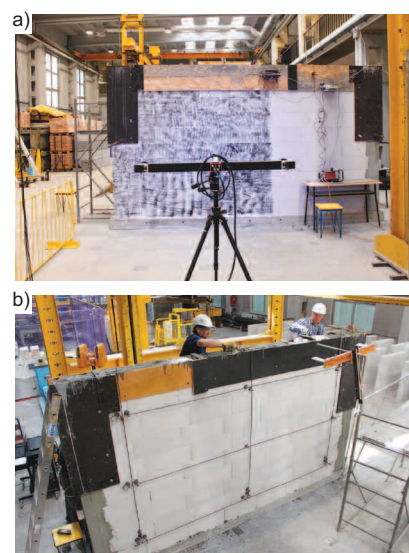
Odształcenia ściany rejestrowano trzema technikami. Pierwsza polegała na pomiarze przemieszczeń wzdłuż baz pomiarowych za pomocą czujników zegarowych. Z jednej strony ściany zainstalowano układ sześciu popychaczy oraz czujników zegarowych o zakresie 1,0 mm i dokładności 0,001 mm. Druga technika polegała na zastosowaniu systemu cyfrowej korelacji obrazu (DIC), na połowie ściany z jej drugiej strony, a trzecia technika – laserowego układu pomiarowego [4], pozwalającego na pomiar przemieszczeń dwóch punktów pomiarowych zlokalizowanych na górnej powierzchni wieńca. W modelu MSL-Z1-1 punkty zlokalizowano w rozstawie 900 mm, natomiast w modelu MS-Z1-1 w rozstawie 850 mm. Odczyty zmiany temperatury oraz odkształceń wieńca rejestrowano automatycznie z częstotliwością zapisu danych co minutę przez 108 h. W modelu MSL-Z1-1 kontrolę odkształceń muru przerwano po 93 h, kontynuując pomiary jedynie w przypadku bazy pomiarowej nr 1, a w modelu MS-Z1-1 po 340 h (fotografia 1).

Skrzepowanie murów realizowano etapami. W pierwszym ułożono mieszankę betonową do połowy wysokości trzpieni pionowych, a w drugim etapie (po 7 dniach od etapu pierwszego) w pozostałej części trzpieni pionowych oraz wieńcu poziomym. Do wykonania szalunków zastosowano płyty pokryte preparatem antyadhezyjnym, ograniczając przywieranie betonu do ich powierzchni. Rejestrację odkształceń muru rozpoczęto po zakończeniu układania mie-



Rys. 2. Stanowisko badawcze: 1 – model badawczy; 2 – wieńiec lub trzpień (skrzepowanie); 3 – ramka do pomiaru przemieszczeń; 4 – czujnik zegarowy przemieszczeń

Fig. 2. Test stand: 1 – test model; 2 – tie beam or tie (confinement); 3 – frame for measuring displacement; 4 – displacement dial indicator



Fot. 1. Widok ścian: a) skrzepowanej betonem lekkim (model MSL-Z1-1); b) skrzepowanej betonem zwykłym (model MS-Z1-1) Photo 1. View of walls: a) confined with lightweight concrete (model MSL-Z1-1); b) confined with standard concrete (model MS-Z1-1)

szanki betonowej. Z mieszanki betonowej pobrano próbki do badań skurczu betonu.

Skurcz swobodny betonu zwykłego rejestrowano na modelu „świadku”, który składał się z formy o wymiarach przekroju poprzecznego 100 mm x 100 mm i długości 500 mm wypełnionej mieszanką betonową (fotografia 2). W formie wykonano otwory, w których umieszczono repery stykające się z dojrzewającym betonem z jednej strony i zegarowymi czujnikami przemieszczeń (zakres 1 mm, dokładność wskazań 0,001 mm) z dru-



Fot. 2. Badanie skurczu swobodnego. Widok stanowiska badawczego

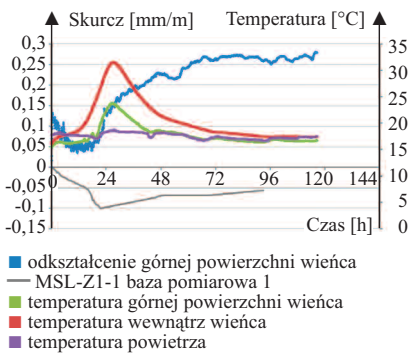
Photo 2. Test of shrinkage. View of test stand

giej strony. W celu zapewnienia swobodnego odkształcania próbki i zmniejszenia tarcia formę wyłożono podwójną warstwą folii. Przeprowadzono także badanie skurczu za pomocą urządzenia ASTM-Shrinkage Ring zgodnie z dokumentacją [1].

Wyniki badań i ich analiza

Badanie modelu MSL-Z1-1 skrepowanego betonem lekkim prowadzono w lutym 2019 r. (rysunek 3 – skurcz oznaczono wartościami dodatnimi, a pęcznienie wartościami ujemnymi). W trakcie badania temperatura powietrza wynosiła w ciągu doby $16 \div 18^\circ\text{C}$. Temperatura wewnątrz wieńca zwiększyła się dwukrotnie w ciągu 25 h, osiągając maksymalnie 32°C , a po upływie 100 h była równa temperaturze otoczenia.

Pomiar deformacji górnej powierzchni wieńca wykazał początkowo przyrost odkształceń, a następnie po 17 h spadek (skurcz). Największe odkształcenia skurczowe górnej powierzchni wieńca wyniosły $0,28 \text{ mm/m}$ po upływie ok. 108 h. W górnej części ściany (baza pomiarowa 1 – rysunek 3), od chwili rejestracji odkształceń nastąpiło narasta-

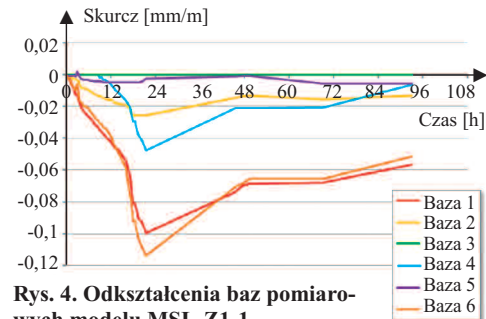


Rys. 3. Wyniki modelu MSL-Z1-1 (opis w tekście)

Fig. 3. Results of model MSL-Z1-1 (description in text)

jące wydłużenie bazy pomiarowej nr 1, osiągając po 21 h wartość $0,1 \text{ mm/m}$, a następnie skrócenie długości bazy pomiarowej do ok. $0,05 \text{ mm/m}$. Niewielki skurcz betonu lekkiego nie wywołał zatem skurczu muru. Przebieg odkształceń wszystkich baz pomiarowych muru przedstawiono na rysunku 4.

Rezultaty uzyskane za pomocą systemu optycznego potwierdziły zjawisko rozciągania ściany w pierwszych kilku-

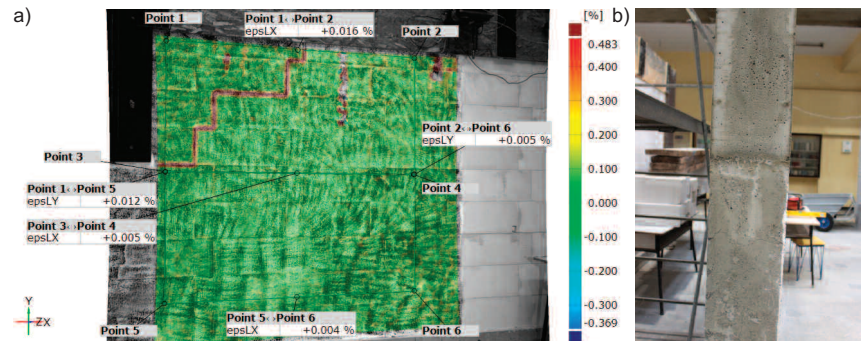


Rys. 4. Odkształcenia baz pomiarowych modelu MSL-Z1-1

Fig. 4. Displacement of measurement of model MSL-Z1-1

nastu godzinach po ułożeniu mieszanki betonowej. Odkształcenia po 20 h przedstawiono na fotografii 3a. Wyniki odkształceń baz pomiarowych były zbliżone z wynikami czujników zegarowych. Analiza map odkształceń powierzchni muru wykazała występowanie zarysowania muru spowodowanego wydłużeniem elementów żelbetowych. Rysy przebiegały w okolicach naroży między elementami krępującymi, biegnąc przez spoiny wsporne oraz czołowe, nie uszkadzając elementów murowych. Po usunięciu formy stwierdzono zarysowanie rdzenia żelbetowego w okolicach poziomego zarysowania muru dochodzącego do rdzenia (fotografia 3b).

Ukośny charakter zarysowania muru MSL-Z1-1 wskazywał na ukośne rozciąganie narożnika powodujące utratę



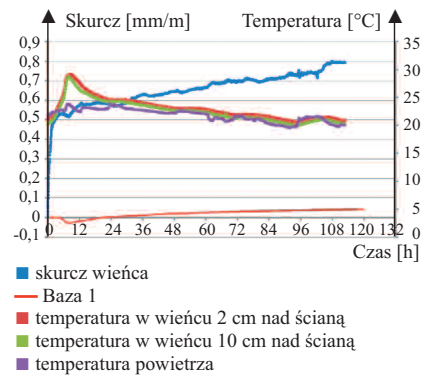
Fot. 3. Model MSL-Z1-1: a) zarysowanie muru; b) zarysowanie betonu

Photo 3. Model MSL-Z1-1: a) cracks of masonry; b) cracks of concrete

przyczepności pomiędzy elementami murowymi i zaprawą w spoinach wspornych. 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 samo zjawisko mogło wystąpić po ułożeniu mieszanki betonowej do połowy wysokości rdzeni, ale nie prowadzono żadnych obserwacji.

Badanie modelu MS-Z1-1, skrepowanego betonem zwykłym, wykonano we wrześniu 2019 r. (rysunek 5). Temperatura wewnątrz laboratorium wynosiła w ciągu doby $20 \div 24^\circ\text{C}$. Temperatura wieńca zmieniła się od 20 do 30°C , osiągając najwyższą wartość po upływie ok. 7 h od ułożenia mieszanki betonowej.

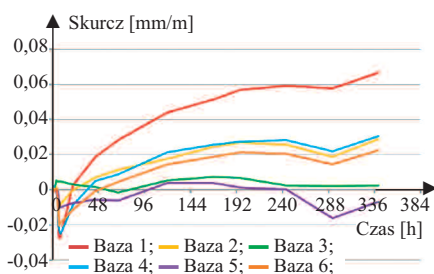
Beton wieńca wykazywał odkształcenia skurczowe od chwili ułożenia mieszanki betonowej. Z pomiarów laserowych na górnej powierzchni wieńca



Rys. 5. Wyniki modelu MS-Z1-1 (opis w tekście)

Fig. 5. Results of model MS-Z1-1 (description in text)

ca wynika, że maksymalne jego skrócenie 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 zmniejszanie. Największy przyrost odnotowano po upływie ok. 8 h, gdy zarejestrowano wydłużenie bazy pomiarowej nr 1 wynoszące 0,027 mm/m. Po upływie ok. 16 h odkształcenia wróciły do wartości początkowej, a po upływie 340 h baza pomiarowa nr 1 uległa skróceniu o 0,067 mm/m. Przebieg odkształceń wszystkich baz pomiarowych muru przedstawiono na rysunku 6.



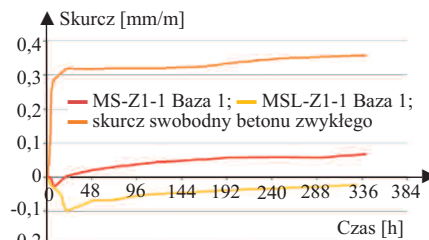
Rys. 6. Odształcenia baz pomiarowych modelu MS-Z1-1

Fig. 6. Displacement of measurement of model MS-Z1-1

W badaniach skurczu swobodnego betonu zwykłego maksymalne skrócenie modelu „świadka” wyniosło 0,18 mm (0,36 mm/m) po upływie 340 h. Przebieg zależności skurczu swobodnego betonu zwykłego w czasie wraz z odkształceniami baz pomiarowych nr 1 muru skrepowanego betonem lekkim (MSL-Z1-1) oraz betonem zwykłym (MS-Z1-1) przedstawiono na rysunku 7.

Podsumowanie

Niezależnie od typu betonu zastosowanego do skrepowania murów największe odkształcenia ścian zarejestrowano w czujnikach rozmieszczonych wzdłuż skrajnych pionowych i poziomych krawędzi modeli. Zaobserwowana zmiana temperatury wewnątrz wieńca związana jest z proce-



Rys. 7. Wyniki pomiarów skurczu swobodnego (opis w tekście)

Fig. 7. Free shrinkage results (description in text)

sem hydratacji cementu. W przypadku maksymalnej temperatury wieńca wystąpiły najmniejsze odkształcenia baz pomiarowych (największe rozciągania muru), które w przypadku skrepowania są zjawiskiem niepożądanym. Na występujące zjawiska istotnie wpłynęło wysychanie betonu i pochłanianie wody przez elementy murowe, które mogły zwiększyć swoją objętość – pęcznienie. Można przypuszczać, 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 skrepowanej betonem lekkim w pierwszej kolejności wystąpiło rozszerzenie i wydłużenie baz pomiarowych modelu badawczego. Podczas obserwacji modelu badawczego przez prawie 340 h nie zaobserwowano odkształceń muru większych od początkowego stanu, co oznacza, że nie został on skrepowany. W wyniku pęcznienia betonu doszło do uniesienia (ukośnego rozciągania), a w konsekwencji zarysowania fragmentu muru, co doprowadziło do efektu odwrotnego do zamierzzonego.

W przypadku muru z betonem zwykłym również doszło do początkowego rozszerzenia muru, ale po upływie ok. 8 h nastąpiło odwrócenie procesu i ściany uległy skróceniu.

Odształcenia skurczowe wyniosły 0,067 mm/m, co potwierdziło skrepowanie elementu.

Literatura

- [1] ASTM C1581/C1581M – 18a. Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage.
- [2] Drobiec Łukasz, Radosław Jasiński, Adam Piekarczyk. 2013. *Konstrukcje murowe według Eurokodu 6 i norm związanych. Tom 2.* Warszawa. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [3] Drobiec Łukasz, Tomasz Rybarczyk. 2019. „Badania ścian z ABK skrepowanych obwodowo”. *Materiały Budowlane* 560 (4): 4 ÷ 6. DOI: 10.15199/33.2019.04.01.
- [4] Gołaszewski Jacek, Grzegorz Cygan, Michał Drewniak. 2014. „Laserowy system do badania skurczu wczesnego elementów betonowych w powiązaniu z oznaczaniem czasu wiązania”. *Przegląd Budowlany* (5): 34 ÷ 36.
- [5] Jäger Wolfram, Peter Schöps. 2009. *Confined masonry – a chance to improve the load bearing capacity.* 11th Canadian Masonry Symposium, Toronto, Ontario.
- [6] Jäger Wolfram, Peter Schöps. 2011. *Confined masonry – a chance to improve the load bearing capacity.* Proceedings of the 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete, Bydgoszcz: 225 ÷ 236.
- [7] Jasiński Radosław, Tomasz Gąsiorowski. 2019. „Morfologia zarysowań ścian skrepowanych ścinanych poziomo”. *Materiały Budowlane* 560 (4): 23 ÷ 25. DOI: 10.15199/33.2019.04.03.
- [8] Jasiński Radosław, Tomasz Gąsiorowski. 2019. „Zarysowanie i zniszczenie ścian skrepowanych ścinanych poziomo”. *Materiały Budowlane* 561 (5): 38 ÷ 39. DOI: 10.15199/33.2019.05.06.
- [9] Neville Adam M. 2000. *Właściwości betonu.* Kraków. Polski Cement.
- [10] PN-EN 206+A1:2016-12. *Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.*
- [11] PN-EN 1992-1-1:2008/NA:2018-11. *Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.*
- [12] PN-EN 1996-1-1+A1:2013-05/NA:2014-03. *Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.*

Autorzy badań wyrażają szczególne podziękowania firmie Solbet Sp. z o.o. za podjęcie współpracy z Katedrą Konstrukcji Budowlanych oraz merytoryczną i materialną pomoc przy realizacji badań konstrukcji murowych.

Przyjęto do druku: 23.10.2019 r.

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

