

dr hab. inż. Łukasz Drobiec¹⁾
dr inż. Radosław Jasiński^{1)*}

Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z betonu komórkowego poddanych ścinaniu

Influence of the kind of mortar on mechanical parameters of AAC masonry subjected to shear – the basic strength parameters

DOI: 10.15199/33.2015.05.44

Streszczenie. Artykuł jest kontynuacją cyklu publikacji dotyczących badań właściwości murów z betonu komórkowego. Przedstawiono wyniki badań różnych typów zapraw na początkową i charakterystyczną wytrzymałość na ścinanie oraz kąt tarcia wewnętrznego. Zbadano próbki muru z dwoma typami zapraw i trzema typami spoin oraz mury suche. Łącznie przebadano 36 elementów zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 1052-3:2004. Wykazano istotny wpływ nie tylko rodzaju zaprawy, ale także konstrukcji spoin wspornych.

Słowa kluczowe: konstrukcje murowe, projektowanie konstrukcji murowych, wpływ rodzaju zaprawy, wytrzymałość muru na ścinanie, Eurokod 6.

Abstract. This article is a continuation of a series of publications concerning research properties of AAC walls. Presents the results of research of different types of mortars and characteristic initial shear strength and angle of internal friction. Were tested specimens of 2 types of masonry mortar and 3 types of bed joints and „dry walls”. A total of 36 elements were tested in accordance with the guidelines of PN-EN 1052-3:2004 code. Researches have shown a significant effect not only the type of mortar, but also the structure of bed joints.

Keywords: masonry structures, design of masonry structures, influence of the kind of mortar, masonry shear strength, Eurocode 6.

Ścinanie w konstrukcjach murowych jest równie powszechne jak ściskanie i zginanie. W praktyce występują bowiem ściany wypełniające konstrukcję szkieletową, które nie są nadmiernie obciążone pionowo i prostopadle do płaszczyzny, ale przejmują w płaszczyźnie obciążenia poziome od wiatru, wpływy geologiczne czy też różnego rodzaju wstrząsy. Z całą pewnością rolę ścian usztywniających pełnią wszystkie ściany nośne (obciążone głównie pionowo), natomiast pozostałe ściany mogą być ścianami usztywniającymi pod warunkiem, że konstrukcja budynku umożliwia przekazanie zewnętrznych obciążeń poziomych. Optymalnie dobrany układ ścian usztywniających powinien wyeliminować poziome przemieszczenia, dzięki czemu wymiarowanie ścian nośnych, filarów międzyotworowych lub słupów ustrojów szkieletowych może odbywać się z pominięciem wpływów mimośrodków wywołanych obciążeniami poziomymi. Co więcej, niewielka wytrzymałość muru na ścinanie powoduje, że uszkodzenia tych konstrukcji należą do najczęstszych, natomiast naprawy zdecydowanie do najtrudniejszych przedsięwzięć inżynierskich. Podstawowymi wymaganiami stawianymi

ścianom ścinanym są więc sztywność definiowana przez moduł odkształcenia postaciowego (moduł Kirchhoffa, moduł ścinania) G , rysoodporność i wytrzymałość na ścinanie f_{tk} .

W artykule opublikowanym w „Materiałach Budowlanych” nr 4/2015 [1] przedstawiono wyniki badań ścian ściskanych, natomiast ten artykuł zawiera wyniki badań murów poddanych ścinaniu. Celem badań było przede wszystkim poznanie wpływu zmiany rodzaju zaprawy i konstrukcji spoin na podstawowe właściwości muru wykonanego z bloczków z betonu komórkowego SOLBET OPTIMAL z zamkami do murowania na pióro i wpust. W kolejnym artykule zaprezentowane zostaną wyniki badania ścian poddanych próbie ukośnego ściskania.

Badania parametrów ścinania wykonano dwiema znormalizowanymi metodami. Początkową i charakterystyczną wytrzymałość muru na ścinanie (f_{vo} i f_{vok}) oraz tangens kąta tarcia wewnętrznego zaprawy w spoinie wspornej $0,8\text{tg}\alpha$ określono na podstawie zharmonizowanej z Eurokodem 6 [2] europejskiej normy PN-EN 1052-3:2004 [3]. Moduł odkształcenia postaciowego G , wartość naprężeń rysujących τ_{cr} oraz sposób zniszczenia muru wykonano natomiast wg amerykańskiej normy ASTM E519-81 [4]. Wyniki tych ostatnich badań zostaną przedstawione w kolejnej części publikacji.

Badania parametrów ścinania wg normy PN-EN 1052-3:2004

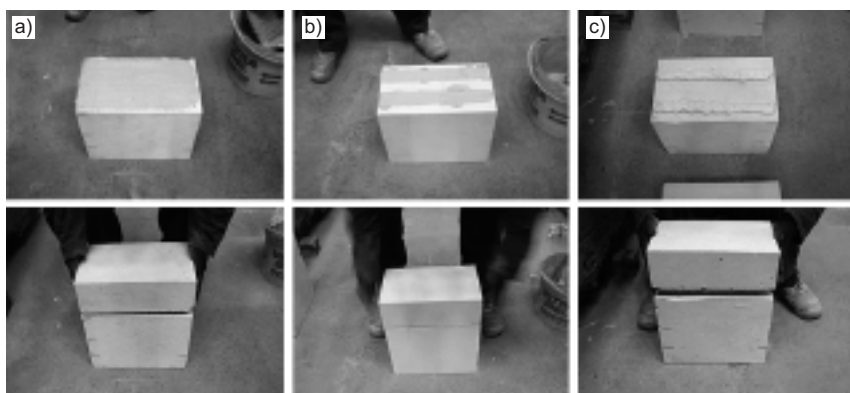
Modele badawcze i program badań. Do badań zastosowano zaprawę SOLBET 0.1 przeznaczoną do cienkich spoin oraz klej poliuretanowy SOLBET SMART. Stosując zaprawę mineralną, wykonano modele o szerokości równej grubości muru lub dwie spoiny pasmowe o szerokości 50 mm każda. Grubość warstwy zaprawy po ułożeniu w spoinach była identyczna i wynosiła 4 mm, a po scaleniu 3 mm. W przypadku łączenia elementów przy użyciu kleju poliuretanowego na powierzchniach wspornych umieszczano dwa pasma kleju. Widok modeli w trakcie murowania pokazano na fotografii.

Modele po wykonaniu przechowywano w warunkach laboratoryjnych w temperaturze $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza 70 – 85%. Zgodnie z wymaganiami PN-EN 1052-3:2004 [3] w ramach każdego rodzaju zaprawy wykonano 9 elementów. Elementy badawcze oznaczano wielką literą S oraz dodatkowymi wielkimi literami M, MP i P oznaczającymi rodzaj zastosowanej zaprawy. Oprócz modeli połączonych różnymi typami zaprawy wykonano dodatkowo serię S, w której nie stosowano żadnej zaprawy (suchy mur). Program badań początkowej wytrzymałości muru na ścinanie pokazano w tabeli 1.

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*)} Autor do korespondencji;

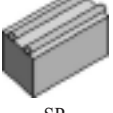
e-mail: radoslaw.jasinski@polsl.pl



Wykonywanie elementów próbných: a) modele z cieką spoiną wsporną; b) modele ze spoiną pasmową; c) modele ze spoiną z kleju poliuretanowego [Fot. R. Jasiński]
The workmanship of test specimens: a) thin joint; b) shell bedded joint; c) polyurethane glue

Tabela 1. Program badań początkowej wytrzymałości muru na ścinanie

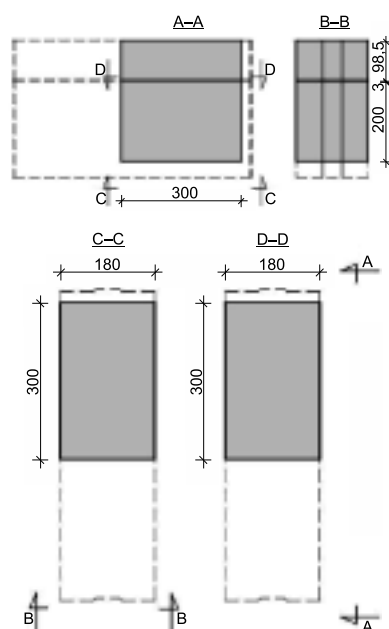
Table 1. The research program of the masonry initial shear strength

Nazwa serii	Liczba elementów	Rodzaj spoiny
 SM	9	zaprawa Solbet 0.1 do spoin cienkowarstwowych; spoina cienka o szerokości równej szerokości muru ($t = 180$ mm)
 SMP	9	zaprawa Solbet 0.1 do spoin cienkowarstwowych; dwa pasma o szerokości 50 mm każdy.
 SP	9	systemowy klej poliuretanowy
 S	9	bez zaprawy
Razem:	36	

Ze względu na wymiary elementów murew, zgodnie z PN-EN 1052-3:2004 [3] w badaniach początkowej wytrzymałości na ścinanie posługiwano się elementami próbnymi typu B. Próbkę tę składają się z dwóch elementów murew odpowiednio dociętych. Wymiary i kształt elementów próbných pokazano na rysunku 1.

Stanowisko badawcze i technika badań

Badania prowadzono w specjalnie do tego celu skonstruowanym stanowisku (rysunek 2) pozwalającym na realizację obciążenia



Rys. 1. Geometria i wymiary modeli badawczych

Fig. 1. The geometry and dimensions of the test specimens

nia pionowego (ścinającego) oraz towarzyszącego mu prostokątnego do spoin wspornych obciążenia ściskającego. Stanowisko składało się ze stalowej ramy (4), w której umieszczano element badawczy (1). Stalowa rama stanowiska służyła do wywołania poziomych naprężeń ściskających prostokątnych do spoin wspornych. Obciążenie ściskające wywoływano za pomocą siłownika hydraulicznego (3), a pomiaru siły ściskającej dokonywano przy użyciu siłomierza elektrooporowego (2) o zakresie 100 kN. Siłę ściskającą przekazywano na element badawczy (w środku ciężkości przekroju) przez stalowe blachy i przekładkę teflonową (7). Ramę z elementem badawczym umieszczano w maszynie wy-

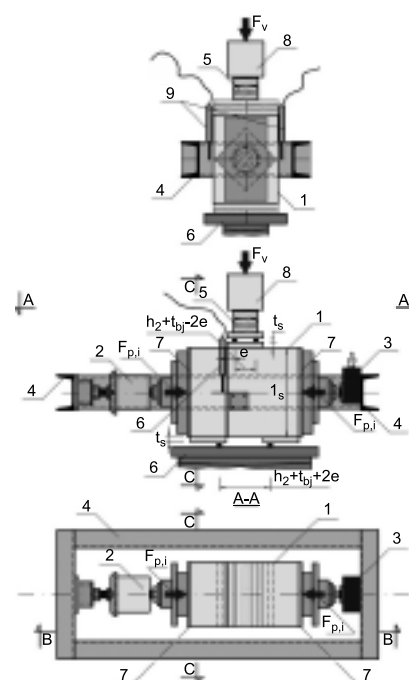
trzymałościowej o zakresie 3000 kN, która służyła do wywołania obciążenia ścinającego (5) z prędkością 0,3 MPa/s. Pomiaru pionowej siły ścinającej dokonywano za pomocą siłomierza elektrooporowego (8) o zakresie 100 kN. Elementy ustawiano na dolnej płycie maszyny wytrzymałościowej (6) każdorazowo na wałkach stalowych średnicy 12 mm i blachach stalowych. Obciążenie ścinające przykładane było na element murew z głowicy prasy przez dwie blachy rozdzielone wałkami stalowymi. W związku z tym, że wytrzymałość elementów murew na ściskanie $f_b < 10$ N/mm² [1], badania początkowej wytrzymałości muru na ścinanie przeprowadzono przy trzech różnych wartościach naprężeń normalnych prostokątnych do płaszczyzny spoin wspornych wynoszących: $f_{pi} = 0,1; 0,3; 0,5$ N/mm², obliczonych z zależności:

$$f_{pi} = \frac{F_{pi}}{A_{hi}} \quad (1)$$

gdzie:

F_{pi} – wartość wstępnego obciążenia ściskającego;
 A_{hi} – pole poprzeczne przekroju i-tego elementu próbnego (powierzchni wspornej elementu).

Oprócz automatycznego pomiaru sił pionowych i poziomych dokonywano również pomiaru wzajemnych przemieszczeń elementów murew połączonych zaprawą za pomocą obustronnie przymocowanych czujników przemieszczeń (9). Pomiar wyko-



Rys. 2. Stanowisko badawcze do badań początkowej wytrzymałości muru na ścinanie (opis w tekście)

Fig. 2. The test stand for testing the masonry initial shear strength (description in text)

nywany był w połowie długości spoiny wspornej. Mierzone wartości sił oraz przemieszczeń zapisywano automatycznie przez Automatyczne Stanowisko Pomiarowe.

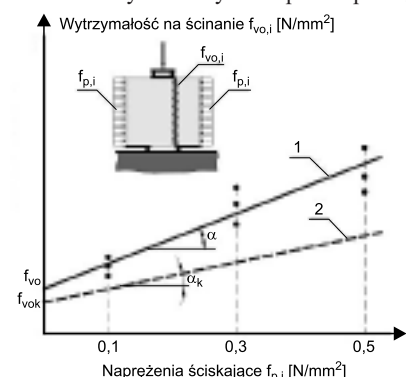
Największe zarejestrowane przez maszynę wytrzymałościową obciążenie, przy którym gwałtownie zwiększyły się przemieszczenia tłoka maszyny, traktowano jako siłę niszczącą $F_{i,max}$, przy której obliczano wytrzymałość na ścinanie f_{voi} danego elementu próbnego jako iloraz obciążenia $F_{i,max}$ i pola powierzchni wspornej $A_{h,i}$ z zależności:

$$f_{voi} = \frac{F_{i,max}}{2A_{h,i}} \quad (2)$$

gdzie:

$F_{i,max}$ – wartość maksymalnej siły ścinającej uzyskana dla i-tego elementu próbnego.

Wytrzymałość na ścinanie f_{voi} każdego elementu próbnego naniesiono na wykresie w funkcji wstępnych naprężeń ściskających f_{pi} (rysunek 3). Metodą najmniejszych kwadratów w uzyskane wyniki wpisano prostą.



Rys. 3. Zasada określania podstawowych parametrów ścinania wg normy PN-EN 1052-3:2004: 1 – prosta regresji; 2 – skorygowana prosta regresji

Fig. 3. The rule of determining the basic parameters of the shear according to PN-EN 1052-3:2004: 1 – regression function; 2 – adjusted regression function

Z równania prostej odczytano wartość początkowej wytrzymałości na ścinanie f_{vo} z dokładnością do 0,01 N/mm² w miejscu jej przecięcia z pionową osią układu oraz kąt tarcia wewnętrznego α z dokładnością do stopnia. Następnie zgodnie z PN-EN 1052-3:2004 obliczono wartość charakterystyczną początkowej wytrzymałości na ścinanie f_{vok} oraz charakterystyczną wartość tangensa i kąta tarcia wewnętrznego wg zależności:

$$f_{vko} = 0,8f_{vo} \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_k = 0,8 \operatorname{tg} \alpha \quad (4)$$

$$\alpha_k = \operatorname{atan}(0,8 \operatorname{tg} \alpha) \quad (5)$$

gdzie:

f_{vo} – początkowa wytrzymałość muru na ścinanie;
 f_{vko} – charakterystyczna wartość początkowej wytrzymałości na ścinanie muru;
 α – kąt tarcia wewnętrznego;
 α_k – charakterystyczna wartość kąta tarcia wewnętrznego.

Należy podkreślić, że do analiz brano pod uwagę wyłącznie wyniki uzyskane z modeli, których zniszczenie wystąpiło wyłącznie w płaszczyźnie spoin wspornych (rysunek 4).



Rys. 4. Zniszczenie na skutek ścinania na styku elementu murowego/zaprawa na jednej powierzchni lub z rozdziałem na dwie części – typ A wg [3]

Fig. 4. The failure due to shear at the interface masonry unit / bed joint mortar on one side or divided into two parts – type A by [3]

Wyniki badań

W tabeli 2 zestawiono parametry wytrzymałościowe wszystkich zbadanych serii elementów.

W podstawowym przypadku, kiedy stosowano cienkowarstwową spoinę szerokości równej grubości muru (modele serii SM), uzyskano wartość początkowej wytrzymałości muru na ścinanie $f_{vo} = 0,31$ N/mm², a wyznaczona na tej podstawie wytrzymałość charakterystyczna wynosiła $f_{vok} = 0,24$ N/mm². Wartość kąta tarcia wewnętrznego wynosiła $\alpha = 32^\circ$, a wartość charakterystyczny tangens kąta tarcia wewnętrznego $0,8 \operatorname{tg} \alpha = 0,50$.

W przypadku zastosowania cienkowarstwową spoiny pasmowej szerokości 2 x 50 mm (modele serii SMP), wartość po-

czątkowej wytrzymałości muru na ścinanie była równa $f_{vo} = 0,13$ N/mm², a wyznaczona na tej podstawie wytrzymałość charakterystyczna wynosiła $f_{vok} = 0,11$ N/mm². Wartość kąta tarcia wewnętrznego była równa $\alpha = 34^\circ$, wartość charakterystyczny tangens kąta tarcia wewnętrznego $0,8 \operatorname{tg} \alpha = 0,54$.

W przypadku, gdy do połączenia elementów murowych użyto kleju poliuretanowego (modele serii SP), uzyskano wartość początkowej wytrzymałości muru na ścinanie równą $f_{vo} = 0,28$ N/mm², a wyznaczona na tej podstawie wytrzymałość charakterystyczna wynosiła $f_{vok} = 0,22$ N/mm². Wartość kąta tarcia wewnętrznego była równa $\alpha = 28^\circ$, wartość charakterystyczny tangens kąta tarcia wewnętrznego $0,8 \operatorname{tg} \alpha = 0,43$.

W modelach serii S, w której nie zastosowano żadnego trwałego połączenia między elementami murowymi, uzyskano wartość kąta tarcia wewnętrznego $\alpha = 43^\circ$, wartość charakterystyczny tangens kąta tarcia wewnętrznego $0,8 \operatorname{tg} \alpha = 0,74$.

Zgodnie z PN-EN 1996-1-1 charakterystyczna wytrzymałość na ścinanie $f_{vk,EC6}$ muru wykonanego na zaprawie ogólnego przeznaczenia lub na zaprawie do cienkich spoin grubości od 0,5 mm do 3 mm lub też na lekkiej zaprawie, mającego niewypełnione spoiny pionowe, ale z przyległymi do siebie czołami elementów murowych, można przyjmować z równania:

$$f_{vk,EC6} = 0,5f_{vko,EC6} + 0,4\sigma_d = 0,5f_{vko,EC6} + 0,8 \operatorname{tg} \alpha_{EC6} \sigma_d \quad (6)$$

Nie może ona wynosić więcej niż $f_{vk,EC6} = 0,045f_b$ lub $f_{vk,EC6} = 0,7$ wartości granicznej podanej w tabeli 3.

W przypadku muru ze spoinami pasmowymi, w którym elementy murowe są ukła-

Tabela 2. Zbiorcze zestawienie wyników badań

Table 2. Summary of the test results

Seria	f_{vo} [N/mm ²]	f_{vok} [N/mm ²]	α [°]	$0,8 \operatorname{tg} \alpha$	α_k [°]
SM	0,31	0,24	32	0,50	27
SMP	0,13	0,11	34	0,54	28
SP	0,28	0,22	28	0,43	23
S	0	0	43	0,74	36

Tabela 3. Wartości $f_{vk,EC6}$ i ograniczenie wartości $f_{vk,EC6}$ na podstawie [2]

Table 3. Values of $f_{vk,EC6}$ and reduce the $f_{vk,EC6}$ based on [2]

Materiał elementu murowego	f _{vk,EC6} [N/mm ²]			Ogranicze- nie f _{vk,EC6} [N/mm ²] grupa ele- mentu murowego	
	zaprawa zwykła	zaprawa do cien- kich spoin	zaprawa lekką		
	f _m	f _{vk,EC6}		123 i4	
Autokla- wizowany beton ko- mórkowy	2,5; 5; 10	0,15	0,25	0,10	ograniczenia normowe jak pod wzorem (6)

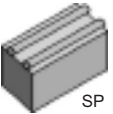
dane na dwóch lub więcej równoległych pasmach zaprawy zwykłej o szerokości g co najmniej 30 mm każdy, f_{vk} może być wyznaczona z zależności:

$$f_{vk,EC6} = \frac{\sum g}{t} f_{vk,EC6} + 0,4\sigma_d = \frac{\sum g}{t} f_{vk,EC6} + 0,8tg\alpha_{EC6}\sigma_d \quad (7)$$

ale nie więcej niż $f_{vk,EC6} = 0,045f_b$ lub $f_{vk,EC6} = 0,7$ wartości granicznej podanej w tabeli 3.

Uzyskane wyniki badań oraz wyznaczone wartości charakterystyczne porównano w tabeli 4 z parametrami zalecanymi przez normę. Na rysunku 5 pokazano porównanie wyników badań oraz prostą wyznaczoną z zależności (6) określającą wytrzymałość na ścinanie wg EC6.

Tabela 4. Porównanie wyników badań
Table 4. Comparison of the test results

Seria	f_{vk} [N/mm ²]	$f_{vk,EC6}$ [N/mm ²]	$f_{vk}/f_{vk,EC6}$	$0,8tg\alpha$	$0,8tg\alpha_{EC6}$	$0,8tg\alpha/0,8tg\alpha_{EC6}$
 SM	0,24	0,25	0,96	0,50	0,4	1,25
 SMP	0,11		0,44	0,54		1,35
 SP	0,22		0,88	0,43		1,08
 S	–		–	0,74		1,85

Początkowa wytrzymałość na ścinanie uzyskane w badaniach była we wszystkich seriach elementów mniejsza od wartości normowej. W przypadku spoiny o szerokości równej grubości muru różnica wynosiła zaledwie 4%, natomiast w przypadku spoiny na kleju poliuretanowym ponad 12%. Największa różnica (ok. 66%) dotyczyła elementów połączonych na spoinę pasmową. Odwrotną tendencję stwierdzono w przypadku kąta tarcia wewnętrznego zaprawy w spoinie $0,8tg\alpha$. Wartości uzyskane w badaniach były każdorazowo większe niż zalecane w normie $0,8tg\alpha = 0,4$. Maksymalny wzrost kąta tarcia wewnętrznego, wynoszący 85%, uzyskano w przypadku elementów, w których nie stosowano żadnej zaprawy. Natomiast wzrost 25% w przypadku spoiny wykonanej z zaprawy o szerokości równej

grubości muru. W przypadku modeli ze spoiną wykonaną z kleju poliuretanowego otrzymano najmniejszą wartość współczynnika tarcia, która jednak była o 8% większa od wartości normowej.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- początkowa wytrzymałość na ścinanie murów wykonanych na zaprawie mineralnej wynosiła $f_{vk} = 0,13 \div 0,31$ N/mm², a określona na tej podstawie wytrzymałość charakterystyczna $f_{vk} = 0,11 \div 0,24$ N/mm²;
- w przypadku zastosowania kleju poliuretanowego początkowa wytrzymałość na ścinanie wynosiła $f_{vk} = 0,28$ N/mm², a odpowiadająca jej wytrzymałość charakterystyczna $f_{vk} = 0,22$ N/mm²;
- w elementach połączonych przy użyciu zaprawy mineralnej uzyskano wartość tangensa kąta tarcia wewnętrznego $0,8tg\alpha = 0,50 \div 0,54$, a kiedy użyto kleju poliuretanowego $0,8tg\alpha = 0,43$;
- mur bez zaprawy charakteryzował się współczynnikiem tarcia $0,8tg\alpha = 0,74$;
- wartość kąta tarcia wewnętrznego murów ze spoiną mineralną wynosiła $\alpha = 32^\circ \div 34^\circ$, a wartość charakterystyczna odpowiednio $\alpha_k = 27^\circ \div 28^\circ$;
- sposób zniszczenia wszystkich elementów połączonych zaprawą mineralną lub klejem poliuretanowym

wym następował na skutek ścinania na styku zaprawy z elementem murem (typ A).

Porównując uzyskane wyniki badań z zapisami Eurokodu, stwierdzono, że:

■ charakterystyczna początkowa wytrzymałość na ścinanie murów, w których użyto zaprawy o szerokości równej grubości muru, była nieznacznie mniejsza od wartości normowej wynoszącej 0,25 N/mm²;

■ kiedy użyto spoin pasmowych, uzyskano charakterystyczną początkową wytrzymałość na ścinanie równą 0,11 N/mm², która była o przeszło 54% mniejsza od wartości normowej;

■ w modelach, w których elementy połączono klejem poliuretanowym, charakterystyczna początkowa wytrzymałość na ścinanie była o 12% mniejsza od wartości normowej stosowanej do murów na zaprawie mineralnej;

■ wartość kąta tarcia wewnętrznego zaprawy w spoinie $0,8tg\alpha$ uzyskana w badaniach była większa niż zalecana w normie $0,8tg\alpha = 0,4$. Maksymalny wzrost kąta tarcia wewnętrznego uzyskano w przypadku elementów bez zaprawy, a najmniejszy, w elementach ze spoinami pasmowymi;

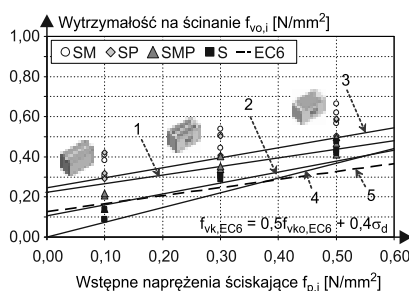
■ uwzględniając normową 50% redukcję początkowej wytrzymałości na ścinanie, uzyskane w badaniach wartości wytrzymałości na ścinanie były większe od wartości normowych wyliczonych ze wzorów (6) i (7).

Autorzy badań wyrażają szczególne podziękowania firmie Solbet Sp. z o.o. za podjęcie współpracy z Katedrą Konstrukcji Budowlanych na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej oraz merytoryczną i materialną pomoc przy realizacji badań konstrukcji murem.

Literatura

- [1] Drobiec L., Jasiński R.: Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z ABK poddanych ścisaniu. Materiały Budowlane, nr 4/2015, str. 3-7.
- [2] PN-EN 1996-1-1+A1: 2013-05/NA:2014-03: Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murem. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murem.
- [3] PN-EN 1052-3:2004/A1:2009 Metody badań murów. Część 3: Określanie początkowej wytrzymałości muru na ścinanie.
- [4] ASTM E519-81 Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) of Masonry Assemblages.

Otrzymano 17.03.2015 r.



Rys. 5. Porównanie wyników badań z zależnością proponowaną w EC-6 (wg wzoru (6)); 1 – klej poliuretanowy – szerokość spoiny $t = 180$ mm; 2 – zaprawa mineralna klasy M5, szerokość spoiny pasmowej $\Sigma_s = 2 \times 50$ mm; 3 – zaprawa mineralna klasy M5, szerokość spoiny $t = 180$ mm; 4 – suchy mur; 5 – EC6

Fig. 5. Comparison of test results to the equation proposed in the EC-6 (according to the formula (6))