

dr inż. Piotr Matysek¹⁾

Wytrzymałość na ściskanie murów w istniejących budynkach – ocena na podstawie badań próbek rdzeniowych

Compressive strength of brick masonry in existing buildings – experimental approach using core samples

DOI: 10.15199/33.2015.10.38

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki badań wytrzymałości na ściskanie murów przeprowadzone na próbkach rdzeniowych średnicy 150 mm wyciętych z konstrukcji budynków wzniesionych w XIX i XX w. Jako porównawcze przyjęto wyniki badań na próbkach muru pobranych ze ścian ze współczesnych cegieł i zapraw wykonanych w laboratorium. Zaproponowano współczynniki umożliwiające określenie wytrzymałości na ściskanie muru na podstawie badań próbek rdzeniowych.

Słowa kluczowe: mury ceglane, wytrzymałość na ściskanie murów, próbki rdzeniowe.

Abstract. The paper presents tests results of the compressive strength of brick masonry carried out on 150 mm diameter core samples cut from structures erected in the 19th and 20th c. Comparative tests were also conducted on core samples drilled from the walls built in a laboratory with contemporary bricks and mortars. Basing on the researches results coefficients to determine the compressive strength of the masonry using tests on core samples have been proposed.

Keywords: brick masonry, compressive strength of the masonry, core samples.

W analizie stanu technicznego budynków o konstrukcji ceglanej niezbędne jest określenie wytrzymałości murów. W tym celu stosuje się wiele metod badawczych, które szczegółowo opisano w [1]. Najczęściej wytrzymałość na ściskanie murów obliczana jest ze wzorów, w których jest ona funkcją parametrów wytrzymałościowych cegieł i zaprawy określanych w badaniach doświadczalnych. Taki sposób oceny można traktować jedynie jako wstępne i mało precyzyjne oszacowanie. Wyniki najbliższe rzeczywistym parametrom wytrzymałościowym murów dają badania na próbkach znacznych rozmiarów wyciętych z istniejącej konstrukcji, ale niezwykle rzadko są one możliwe do przeprowadzenia. Pobranie próbek prostopadłościennych muru o odpowiednio dużych wymiarach powoduje znaczne uszkodzenie konstrukcji, możliwe do zaakceptowania jedynie w miejscach przewidywanych lokalnych wyburzeń. Mniej inwazyjną metodą są stosowane od lat osiemdziesiątych XX w. badania, na próbkach rdzeniowych odwiercanych z murów ceglanych, prowadzone wg procedur opisanych w [2 ÷ 6].

W zaleceniach UIC [7] opisano metodę badania na próbkach średnicy 150 mm, ściskanych prostopadłe do tworzącej za pośrednictwem odpowiednich przekładek stalowych (fotografia 1). Identyczną metodę przyjęto w badaniach własnych. W związku z tym, że metoda podana w [7] była kalibrowana głównie na murach wykonanych w laboratorium ze współczesnych materiałów [4, 8, 9], należało wyjaśnić, w jakim zakresie może być wykorzystana w badaniach oryginalnych struktur historycznych, które charakteryzują się specyficznymi właściwościami.



Fot. 1. Stanowisko do badań próbek rdzeniowych murów

Photo 1. Testing setup of core samples

Opis badań

Badania własne przeprowadzono na próbkach walcowych średnicy 150 mm pobranych z XIX- i XX-wiecznych konstrukcji wyłączonych z użytkowania i przeznaczonych docelowo do wyburzenia oraz na próbkach muru wyciętych ze ścian wzniesionych w laboratorium. Z murów pobrano również próbki prostopadłościenne o przekroju poprzecznym ok. 250 x 250 mm. Grubość spoin w murach historycznych wynosiła odpowiednio 12 – 26 mm (średnio 20 mm) i 15 – 27 mm (średnio 21 mm). Przed badaniami wytrzymałościowymi oceniono stan techniczny murów w próbkach, gdyż jakość wykonania muru ma istotny wpływ na jego wytrzymałość. W murach historycznych stwierdzono nieciągłość struktury w postaci mniejszych lub większych kawern częściowo wypełnionych zaprawą. Mury wzniesione w laboratorium charakteryzowały się bardzo dobrą jakością (grubość spoin 10 ÷ 14 mm).

Próbki walcowe obciążano prostopadłe do tworzącej przez przekładki stalowe obejmujące 1/6 obwodu próbki, natomiast próbki prostopadłościenne prostopadłe do spoin wspornych. Kierunek obciążenia ściskającego próbki był więc taki sam jak w konstrukcji. Określono znormalizowaną wytrzymałość na ściskanie cegieł (f_b) wg PN-EN 772-1 [10]

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej; e-mail: pmatysek@tlen.pl

oraz wytrzymałość na ściskanie zapraw (f_{mj}) metodą stempla wg DIN 18555-9 [11]. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1. Wielkość f_ϕ oznacza wytrzymałość średnią na ściskanie określoną w badaniach próbek walcowych muru:

$$f_\phi = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_{ult,i}}{d_i \cdot l_i}}{n} \quad (1)$$

natomiast f to wytrzymałość średnia na ściskanie uzyskana z badania próbek prostopadłościennych:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_{ult,i}}{b_i \cdot h_i}}{n} \quad (2)$$

gdzie:

$P_{ult,i}$ – siła niszcząca próbkę [kN];
 d_i, l_i – odpowiednio średnica i długość próbek walcowych [m];
 b_i, h_i – wymiary przekroju poprzecznego próbki prostopadłościennych [m];
 n – liczba próbek danego rodzaju.

Zbadano co najmniej po 3 próbki muru każdego rodzaju. Próbkę walcową niszczyły się w podobny sposób. Zarysowania powstawały zwykle w miejscach zakończenia przekładek stalowych i rozwijały się na całej wysokości próbki [4, 8, 9]. Zniszczenie próbek walcowych przedstawiono na fotografii 2.

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałościowych murów

Table 1. Results of tests

Mury	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
	cegły f_b	zaprawa f_{mj}	próbki walcowe f_ϕ	prostopadłościennie f
Mur na zaprawie wapiennej z lat 80. XIX w.	20,0	2,22	2,04 ^(1/2c) 1,78 ^(1c)	3,3
Mur na zaprawie cementowo-wapiennej z połowy XX w.	22,1	15,8	3,93 ^(1/2c)	6,9
Mur współczesny	20,6	14,5	5,2 ^(3/4c)	9,8

^(1/2c), ^(3/4c), ^(1c) – próbki walcowe o długości odpowiednio 1/2 cegły, 3/4 cegły, 1 cegły

Analiza wyników badań

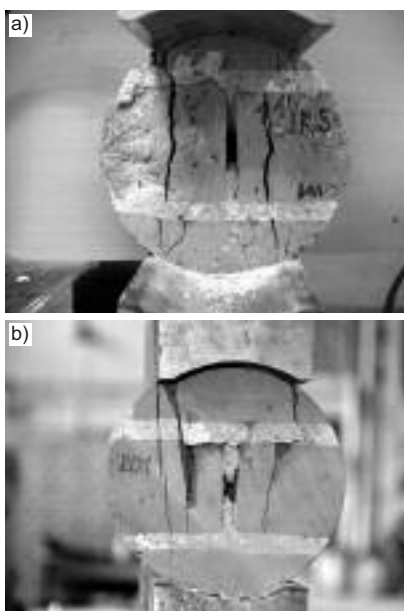
Zgodnie z zaleceniami UIC [7], wyniki uzyskane z badań na próbkach walcowych muru (f_ϕ) należy przeliczać wg zależności:

$$f = \eta \cdot f_\phi \quad (3)$$

gdzie:

η – współczynnik o wartości 1,8; w przypadku murów z cegieł wysokiej wytrzymałości (ponad 30 MPa) wynosi 2,2.

W tabeli 2 zestawiono wartości współczynników η wg badań własnych oraz przeprowadzonych we Włoszech, na podstawie których opracowano za-



Fot. 2. Zniszczenie próbek rdzeniowych muru przy ściskaniu: a) próbka wycięta z muru na zaprawie wapiennej (konstrukcja z lat 80. XIX w.); b) próbka wycięta z muru wykonanego w laboratorium

Photo 2. Failure of core samples under compression: a) sample cut from historic masonry wall made of lime mortar; b) sample cut from wall built in laboratory

lecenia UIC [7]. W badaniach włoskich wytrzymałość na ściskanie murów f określano analogicznie jak w badaniach własnych (na elementach prostopadłościennych o przekroju 1c x 1c, gdzie c – długość cegły). Zgodność wartości współczynnika η w tabeli 2 potwierdza możliwość stosowania metody badań proponowanej w [7] do oceny wytrzymałości na ściskanie murów w istniejących budynkach wzniesionych kilkadziesiąt lat temu. Próbkę długości 1/2 c nie miały spoin podłużnych i stąd nieco mniejsza wartość współczynnika przeliczeniowego. Moim zdaniem, jeżeli tylko istnieje możliwość, należy wycinać i badać próbki długości co najmniej 3/4 c, które mają spoiny podłużne

Tabela 2. Wartości współczynnika przeliczeniowego η

Table 2. The value of the coefficient η

Rodzaj muru	$\eta = f/f_\phi$	
	badania własne	badania włoskie
Mury na zaprawie wapiennej lata 80. XIX w.	1,6 ^{(1/2c)*} 1,9 ^{(1c)*}	(–)
Mury na zaprawie cementowo-wapiennej (połowa XX w.)	1,8 ^{(1/2c)*}	(–)
Mury ze współczesnych materiałów	1,9 ^{(3/4c)*}	1,6 ÷ 2,2

*c – długość próbki

i są bardziej reprezentatywne w przypadku murów większej grubości.

Biorąc pod uwagę wyniki dotychczasowych badań, proponuje się przeliczać wyniki testów wytrzymałościowych realizowanych na próbkach walcowych muru średnicy 150 mm wg następujących zależności:

• próbki mniejszej długości (np. 120 mm), bez spoin podłużnych:

$$f = 1,5 \cdot f_\phi \quad (4)$$

• próbki większej długości (np. 250 mm), ze spoinami podłużnymi:

$$f = 1,8 \cdot f_\phi \quad (5)$$

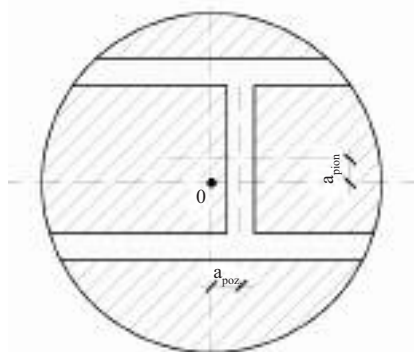
Zależności te obowiązują w przypadku murów z cegieł o wytrzymałości na ściskanie mniejszej niż 30 MPa. Przyjęte we wzorach (4) i (5) współczynniki przeliczeniowe są nieco mniejsze niż uzyskane z badań. Dodatkowy zapas bezpieczeństwa wynika z niewielkiej liczby badań, na podstawie których były kalibrowane współczynniki przeliczeniowe.

Sposób niszczenia próbek walcowych muru, przedstawiony na fotografii 2, wynika ze sposobu przyłożenia obciążenia oraz kształtu i wielkości stalowych przekładek. Analizy numeryczne wykazały, że w próbce walcowej muru, obciążanej zgodnie z fotografią 1, panuje złożony stan naprężeń. W związku z tym wielkość f_ϕ należy traktować jako umowną wytrzymałość na ściskanie. Naprężenia ściskające obejmują głównie środkową część przekroju próbki. Największa koncentracja naprężeń przy dużym obciążeniu występuje na krawędzi stalowych przekładek, przez które próbka jest ściskana, co prowadzi do inicjacji rys właśnie w tych miejscach.

Bardzo duży wpływ na wyniki badań ma precyzyjne wycięcie próbki walcowej. Zaleca się stosować urządzenia umożliwiające uzyskanie prostej próbki o gładkiej poboczniczy. Niespełnienie tego warunku powoduje koncentrację naprężeń przy ściskaniu i wpływa na wielkość obciążenia niszczącego. Mniejsze znaczenie mają niedokładności wynikające z niesymetrycznej lokalizacji spoin pionowej i spoin poziomych w próbce (rysunek).

Badania zaprezentowane w [1] wykazały, że mniejsze niż 10 mm mimośrod w kierunku pionowym a_{pion} i poziomym a_{poz} nie mają istotnego wpływu na wyniki. Należy podkreślić, że badania były prowadzone na prób-

kach wyciętych z istniejących konstrukcji, a więc obciążonych, a następnie poddanych krótkotrwałym obciążeniami.



Oznaczenia mimośrodków występujących w badaniach próbek rdzeniowych: 0 – środek geometryczny próbki; a_{poz} – mimośrodek w kierunku poziomym – przesunięcie osi spójny pionowej względem punktu 0; a_{pion} – mimośrodek w kierunku pionowym

Eccentricities in the test of core samples:
0 – geometric center of the sample;
 a_{poz} – eccentricity in the horizontal direction;
 a_{pion} – eccentricity in the vertical direction

żeniom ściskającym. Ponadto zwykle z konstrukcji można wyciąć niewielką liczbę próbek rdzeniowych. Z tych powodów właściwa interpretacja wyników badań jest niezwykle istotna i powinna skutkować przyjęciem odpowiednio dużych współczynników bezpieczeństwa.

Podsumowanie

Dotychczas badania wytrzymałości muru na próbkach walcowych wyciętych z istniejących konstrukcji były rzadko stosowane w Polsce ze względu na przekonanie, że nie jest możliwe wycięcie z murów próbek rdzeniowych bez naruszenia

ich struktury. Rozwój sprzętu i technik wykonywania odwiertów spowodował, że obecnie udaje się wyciąć próbki rdzeniowe nawet z murów wykonanych na słabych zaprawach. Podstawowym warunkiem jest odpowiedni dobór sprzętu i doświadczenie przy pobieraniu próbek. Zastosowanie standardowych technik wykonywania odwiertów z elementów betonowych lub żelbetonowych z reguły nie daje żądanych efektów – próbki muru ulegają uszkodzeniu na etapie wiercenia lub transportu do laboratorium.

Podstawowa zaleta badań na próbkach rdzeniowych wynika z tego, że pochodzi z istniejącej konstrukcji. W próbkach średnicy 150 mm spójny poziomy i pionowy występują w oryginalnym układzie. Reprezentowane są również inne charakterystyki związane z technologią wykonania muru i historią oddziaływań. Właściwie wykonane badania na próbkach rdzeniowych oraz odpowiednia interpretacja wyników dają wiarygodne wartości wytrzymałości na ściskanie murów, które mogą być wykorzystywane w analizie stanu technicznego. Potwierdziły to prowadzone przeze mnie badania na wielu obiektach o konstrukcji ceglanej wzniesionych w XIX i XX w. (kamienice, kominy murowane, zbiorniki na wodę, mury oporowe). Wadą metody jest konieczność użycia specjalistycznego i dość drogiego sprzętu. Metoda nie może być stosowana w budynkach o dużej wartości historycznej, w których ze względów konserwatorskich nie dopuszcza się uszkodzeń spowodowanych pobieraniem próbek rdzeniowych murów.

Literatura

[1] Matyszek P.: Identyfikacja wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności murów cegla-

nych w obiektach istniejących, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2014.

[2] Wittig W., Ullman P., Heidel R., Tschötschel M.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von Mauerwerkskonstruktionen. Bauplanung-Bautechnik, Heft 8, 1988.

[3] Fleischer H.: Zur Begutachtung der Stand-sicherheit alter massiver Verkehrswasserbauten, Mittelungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr 81, 2000.

[4] Brencich A., Corradi Ch., Sterpi, E. Experimental approaches to the compressive response of solid clay brick masonry. Proceedings 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam 2004, p. 1 – 10

[5] Matyszek P., Gruszczyński M.: Ocena wytrzymałości murów ceglanych na podstawie badań odwiertów rdzeniowych, Czasopismo Techniczne 3-B/2011.

[6] Sassoni E., Mazzotti C.: Experimental and numerical study on the determination of masonry compressive strength by means of cores. Proceedings of 9th International Masonry Conference, Guimarães 2014, p. 1 – 9.

[7] UIC – International Union of Railways: UIC Code. Recommendations for the inspection, assessment and maintenance of masonry arch bridges. final draft 2008.

[8] Bilello C., Brencich A., Di Paola M., Sterpi E. Compressive strength of solid clay brickwork: Calibration of experimental tests. Proceedings of 7th International Masonry Conference, Londyn, 2006.

[9] Brencich A., Sterpi E.: Compressive strength of solid clay brick masonry: calibration of experimental tests and theoretical issues. Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi 2006, 1 – 8.

[10] PN-EN 772-1:2001. Metody badań elementów murowych. Część 1: Określanie wytrzymałości na ściskanie. 2001.

[11] DIN 18555-9. Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 9; Fe-stmörtel: Bestimmung der Fugendruckfestigkeit. 1999.

Przyjęto do druku: 24.04.2015 r.

Wyłoniono laureatów szóstej edycji programu Lider

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) rozstrzygnęło szóstą edycję programu Lider, w ramach której swoje innowacyjne projekty będzie realizować trzydziestu czterech młodych naukowców. Sukces w konkursie oznacza dla nich nie tylko wsparcie finansowe, ale także możliwość stworzenia i zarządzania własnym zespołem badawczym.

Celem programu Lider jest m.in. aktywizacja środowiska młodych naukowców, wspieranie ich rozwoju oraz współpracy z przedsiębiorstwami. W szóstej edycji programu Lider o dofinansowanie starało się 358 młodych naukowców. Warunkiem udziału w konkursie było przygotowanie projektu do samodzielnego realizacji, który ma szansę na zastosowanie w praktyce. Kolejnym etapem były rozmowy kwalifikacyjne. 149 najwyższej oce-

nionych autorów projektów musiało udowodnić przed ekspertami znaczenie swojego pomysłu dla polskiej gospodarki i nauki. Zespół ekspertów wyłonił 34 najlepsze projekty, na których wsparcie NCBR przeznaczyło prawie 40 mln zł. Najwięcej zwycięskich projektów dotyczy inżynierii materiałowej (5) oraz nauk inżynierskich i technicznych (4).

Dotychczas odbyło się pięć edycji programu Lider, w których wyłoniono 179 młodych naukowców. Otrzymali oni wsparcie z NCBR wysokości ponad 184 mln zł. Najwięcej laureatów pochodzi z Politechniki Warszawskiej (16 osób), a następnie z Gdańskiej, Poznańskiej i Łódzkiej oraz uniwersytetów – Gdańskiego i Warszawskiego.

Szczegółowe informacje o wynikach VI edycji programu Lider znajdują się na stronie **www.NCBR.gov.pl**.