

MACIEJ GRUSZCZYŃSKI, PIOTR MATYSEK*

OCENA WYTRZYMAŁOŚCI MURÓW CEGLANYCH NA PODSTAWIE BADAŃ ODWIERTÓW RDZENIOWYCH

ESTIMATION OF MASONRY WALLS STRENGTH BASED ON DRILLED CORES TESTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie określania wytrzymałości murów ceglanych na podstawie badań odwiertów rdzeniowych wyciętych z istniejących konstrukcji murowych. Badania prowadzone przez autorów obejmowały określenie wytrzymałości cegieł oraz wytrzymałości muru na próbkach rdzeniowych o różnych średnicach, wyciętych z konstrukcji pochodzących z XIX w. i I poł. XX w.. W badaniach analizowano wpływ różnych czynników: efekt skali, anizotropię materiałową, niejednorodność struktury, sposób pobierania i badania próbek. W efekcie przeprowadzonych badań wskazano na ograniczenia metody i konieczność prowadzenia równoległe z badaniami wytrzymałości rdzeni wyciętych z konstrukcji badań dodatkowych przy wykorzystaniu technik nie-niszczących lub częściowo niszczących.

Słowa kluczowe: odwierty rdzeniowe, wytrzymałość muru, badania doświadczalne

Abstract

In the paper there is presented the question of estimation of masonry walls strength on the base of cores drilled from the existing masonry structures. Tests carried out by authors included determination of bricks strength and masonry walls strength on core samples with different diameters drilled from structures dating back to 19th century and the first part of the 20th century. There was analyzed the influence of various factors onto tests results: scale effect, material anisotropy, structure heterogeneity, way of taking and testing the samples. There was pointed out the limitations of method and necessity to conduct parallel with strength tests on drilled cores supplementary and comparative in-situ tests for walls with the application of non-destructive or half-destructive methods.

Keywords: drilled cores, wall strength, experimental tests

* Dr inż. – Politechnika Krakowska, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych

1. Wprowadzenie

W analizach stanu technicznego istniejących konstrukcji ceglanych, w wielu przypadkach istotne znaczenie ma określenie wytrzymałości i odkształcalności muru. Dotyczy to przede wszystkim konstrukcji, które mają zostać dostosowane do nowych funkcji, co związane jest zwykle ze zmianą sposobu obciążenia. W tej grupie należy wymienić zarówno obiekty przebudowywane z uwagi na nowe funkcje użytkowe jak również obiekty, których sposób użytkowania nie ulega zmianie, ale zmieniają się warunki w jakich konstrukcja pracuje (np. wzrost efektów oddziaływań spowodowanych środkami transportu samochodowego lub kolejowego). Badania doświadczalne wskazują, że metody nieniszczące (NDT) są przydatne do identyfikacji parametrów wytrzymałościowych murów jedynie w ograniczonym zakresie – głównie jako badania pomocnicze i porównawcze przy ocenie jednorodności struktury muru. Podstawowe znaczenie dla wiarygodnego ustalenia wytrzymałości i odkształcalności muru mają badania małoszczące (MDT) np. metodą *flat-jacks* oraz badania na próbkach muru pobranych z konstrukcji. Współczesne technologie prowadzenia odwiertów umożliwiają wycinanie próbek o różnych średnicach i długościach. Jednak w odróżnieniu od konstrukcji betonowych, ustalanie wytrzymałości murów na podstawie badań odwiertów rdzeniowych nie jest w Polsce szerzej praktykowane. Testy tego typu są natomiast od co najmniej 20 lat prowadzone między innymi w Niemczech [1, 2, 3], Austrii [4], Włoszech [5, 6]. W zaleceniach UIC 778-3R [7] badania na odwiertach rdzeniowych uwzględniono jako jedną z metod oceny wytrzymałości na ściskanie cegieł i muru.

Przykładów realizacji badań na oryginalnym materiale historycznym, jest jednak bardzo niewiele. W niniejszym artykule, na tle badań innych autorów, przedstawione zostaną wyniki badań własnych na materiale pobranym z konstrukcji pochodzących z końca XIX i początku XX wieku.

2. Badania wytrzymałości cegieł

Określanie wytrzymałości na ściskanie muru na podstawie wytrzymałości cegieł oraz zaprawy jest jedną z najczęściej stosowanych metod w praktyce inżynierskiej. Już na początku XX w. H. Kreuger i O. Graf podali zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie muru a wytrzymałością jego komponentów. Od tego czasu opracowano kilkadziesiąt wzorów tego typu próbując uwzględnić wpływ również innych czynników takich jak: grubość spoin, wysokość cegieł, jakość wykonania muru, odkształcalność cegieł i zaprawy w spoinach. Z analizy wzorów, które były szerzej stosowane w praktyce inżynierskiej (w tym wzorów podanych w aktualnej normie PN-EN 1996-1-1 [8]), wynika, że wytrzymałość na ściskanie cegieł jest podstawowym parametrem dla oceny wytrzymałości muru i ma zdecydowanie większy wpływ niż wytrzymałość zaprawy. Analizy tego typu znaleźć można między innymi w [9, 10].

W przeszłości stosowane były różne metody badania wytrzymałości na ściskanie cegieł ceramicznych pełnych. W Polsce i krajach sąsiednich badania prowadzono na próbkach złożonych z dwóch połówek cegieł spojonych i wyrównanych zaprawą cementową, choć same procedury przygotowania próbek i badania nieco się różniły (grubości warstw spajających i wyrównujących, przekładki, prędkości obciążenia). Wprowadzenie

Eurokodów ujednoliciło metody badań wytrzymałości elementów murowych. Norma PN-EN 772-1 [11], która zastąpiła PN-70/B-12016 [12], zaleca określać wytrzymałość na ściskanie cegieł na całych elementach murowych wyszlifowanych lub wyprawionych cienką warstwą zaprawy o odpowiedniej wytrzymałości, a następnie przeliczać na wytrzymałość znormalizowaną, według wzoru:

$$f_b = \eta_w \times \delta \times f_B \quad (1)$$

w którym:

- f_B – średnia wytrzymałość na ściskanie badanych cegieł,
- η_w – współcz. uwzględniający stan zawilgocenia badanych elementów ($\eta_w = 1,0$ dla elementów sezonowanych do stanu powietrzno-suchego),
- δ – współczynnik przeliczeniowy uwzględniający wpływ „efektu skali” elementów murowych – patrz tabela 1

Tabela 1

Wartości współczynnika – na podstawie PN-EN 772-1

Wysokość cegły [mm]	Mniejszy wymiar elementu murowego [mm]				
	50	100	150	200	
40	0,80	0,70	-	-	-
50	0,85	0,80	0,75	-	-
65	0,95	0,85	0,75	0,70	0,65
100	1,15	1,00	0,90	0,80	0,75
150	1,30	1,20	1,10	1,00	0,95
200	1,45	1,35	1,25	1,15	1,1
≥250	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

Uwaga: kolorem szarym oznaczono zakres wymiarów istotny z uwagi na spotykane proporcje cegieł

Warto zauważyć, że wartość współczynnika przeliczeniowego dla elementu o szerokości i wysokości 50 mm wynosi 0,85 i jest zbliżona do podawanego dla cegły 120/65 (odpowiednio 0,81) – różnica 5%.

Z punktu widzenia analizy konstrukcji istniejących powstaje pytanie o możliwości odniesienia wyników badań na stosunkowo małych elementach próbnym do wytrzymałości cegieł badanych według procedur normowych.

W tabeli 2 zestawiono wyniki badań własnych na próbkach walcowych o średnicy 30 mm (f_{BH}^{30}) i 50 mm (f_{BH}^{50} , $f_{B\perp}^{50}$) pobranych z cegieł współczesnych oraz cegieł rozbiórkowych z konstrukcji pochodzącej z końca XIX wieku. Wszystkie próbki walcowe przycinano do takich wymiarów, aby stosunek wysokości próbki do jej średnicy był równy 1,0.

Wytrzymałości na ściskanie cegieł [MPa] określone na odwiertach rdzeniowych – porównawczo badania zgodnie z PN-EN 772-1 [11]

Rodzaj cegły	Wymiary [mm]	Ciężar [kg]	f_B	f_b	f_{BII}^{50}	$f_{B.L}^{50}$	f_{BII}^{30}	f_B/f_{BII}^{50}	f_b/f_{BII}^{50}	$f_{BII}^{30}/f_{BII}^{50}$
Współcz.	247×118×65	2,75	30,7	24,7	30,7	17,4	31,0	1,00	0,81	1,01
XIX-wieczna	290×141×65	4,74	29,9	22,5	17,5	17,3	24,6	1,71	1,29	1,41

$f_{BII}^{30}, f_{BII}^{50}$ – wytrzymałości na ściskanie cegieł określone na odwiertach wykonanych równolegle do kierunku działania obciążenia w murze, prostopadle do płaszczyzn wspornych
 $f_{B.L}^{50}$ – wytrzymałości na ściskanie cegieł określone na odwiertach wykonanych prostopadle do kierunku działania obciążenia w murze, prostopadle do płaszczyzn wozówkowych
Uwaga: wszystkie wytrzymałości na ściskanie podane w tablicy są wartościami średnimi z badań co najmniej 6 próbek

Z zestawienia w tabeli 2 wynika, że wpływ wielkości próbki ceglanej na badaną cechę (wytrzymałość na ściskanie) jest zdecydowanie większy dla materiału XIX-wiecznego, charakteryzującego się większą niejednorodnością. Na rysunku 1 przedstawiono próbki walcowe cegieł przygotowane do badań wytrzymałościowych – próbki wycięte z cegieł XIX-wiecznych, w odróżnieniu od jednorodnej materiałowo ceramiki współczesnej, zawierają liczne wtrącenia (często o wymiarach przekraczających 20 mm) a także rysy i pęknięcia, które w sposób znaczący zdeterminowały wyniki badań.

Zbliżone rezultaty do przedstawionych powyżej uzyskano w badaniach niemieckich prezentowanych w [2]. Wytrzymałość na ściskanie oznaczona na próbkach walcowych 30/30 mm wynosiła od 0,8 do 1,65 (średnio 1,07) wytrzymałości z badań próbek walcowych 50/50 mm. Należy podkreślić, że zdecydowanie mniejszy wpływ efektu wielkości próbki na wytrzymałość rejestrowano w badaniach cegieł współczesnych, niż w badaniach materiału pozyskanego z konstrukcji XVIII i XIX-wiecznych.

Dodatkowym czynnikiem, który należy brać pod uwagę w ocenie wyników badań próbek rdzeniowych jest kierunek wykonania odwiertów i związany z tym kierunek badania wytrzymałości na ściskanie. Jak wynika z tablicy 2 oraz danych opublikowanych w literaturze przedmiotu [2, 13] cegły ceramiczne, w zależności od sposobu formowania i wypalania mogą charakteryzować się wyraźną anizotropią. Badania próbek pobranych z płaszczyzn wozówkowych lub główkowych – najczęściej taki sposób odwiertu jest możliwy w konstrukcji istniejącej – bez analizy stopnia anizotropii materiału ceramicznego może powodować błąd w ocenie wytrzymałości cegieł zdecydowanie większy niż nieuwzględnienie efektu skali.

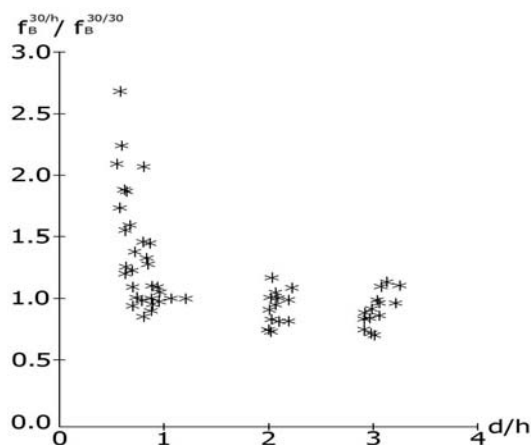


Rys. 1. Wycięte z cegieł próbki walcowe o średnicy 50 mm przygotowane do badań wytrzymałościowych (c.w. – cegły współczesne, c. XIX w. – cegły rozbiórkowe z końca XIX w.

Fig. 1. Cylinder core samples with diameter equal to 50 mm drilled from the masonry elements before testing (notations: c.w. – contemporary masonry elements; c. XIX w. – historical masonry elements from 19th century)

Wpływ na wyniki badań wytrzymałościowych próbek walcowych cegieł ma również sposób ich pobrania i przygotowania do badań. Formatyzowanie próbek powinno być przeprowadzone w taki sposób, aby zachować kryterium reprezentatywności struktury ceramiki – z reguły warstwy przypowierzchniowe cegieł charakteryzują się większą wytrzymałością (o ile nie zostały zdegradowane na skutek działania czynników środowiska zewnętrznego). W badaniach własnych podstawowym sposobem przygotowania powierzchni próbek walcowych było szlifowanie. Przeprowadzono również badania porównawcze próbek wyprawionych obustronnie zaprawą szybkotwardniejącą o wysokiej wytrzymałości (grubość jednej warstwy zaprawy ok. 3 mm). Różnice w wynikach testów na próbkach szlifowanych i wyprawianych zaprawą nie przekraczały kilku procent.

Ze względu na proporcje badanych próbek walcowych – stosunek średnicy do wysokości $d/h = 1$ – nie można identyfikować uzyskiwanych rezultatów z wytrzymałością w stanie jednoosiowego ściskania. Wymiary cegieł nie pozwalają na wycięcie próbek o średnicy 50 mm i odpowiedniej wysokości w kierunku prostopadłym do płaszczyzn wspornych (kierunek przenoszenia obciążeń ściskających w murze). Jak pokazują wyniki badań na próbkach o średnicy 30 mm wpływ wysokości próbki na uzyskiwane rezultaty wytrzymałości na ściskanie jest dla próbek o $1,0 \leq d/h \leq 2$ stosunkowo niewielki – rys. 2.



Rys. 2. Wpływ smukłości próbki walcowej wycinanej z cegieł na wytrzymałość na ściskanie (d – średnica próbki, h – wysokość próbki walcowej) [2]

Fig. 2. Influence of sample slenderness onto compressive strength (d – sample diameter, h – height of cylinder sample) [2]

3. Badania wytrzymałości muru

W badaniach wytrzymałościowych murów w obiektach istniejących stosowano odwierty rdzeniowe o różnych średnicach. Średnicę odwiertu powinna być tak dobrana, aby z jednej strony była reprezentatywna dla struktury muru a jednocześnie uszkodzenia powstałe w trakcie wycinania próbki były jak najmniejsze. Z reguły możliwe jest wykonanie odwiertów prostopadle do lica muru. W takich przypadkach kierunek obciążenia powinien być zgodny z występującym w rzeczywistej konstrukcji a więc powinien być prostopadły do pobocznic próbki walcowej. Realizacja tego warunku w praktyce może odbywać się w różny sposób.

W pracy [3] podano wyniki badań rdzeni o średnicy $d = 100$ mm z centralnie zlokalizowaną spoiną. Badano wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu rdzeni murowych ($f_{SZ,FK}$), prowadząc jednocześnie badania porównawcze i uzupełniające: wytrzymałości na ściskanie muru (f_k), wytrzymałość cegieł na rozciąganie przy rozłupywaniu ($f_{SZ,b}$); wytrzymałości na ściskanie cegieł (f_b^*). Na podstawie analizy wyników badań uzyskano zależność:

$$f_k / f_{SZ,FK} = f_b^* / f_{SZ,b} \quad (2)$$

na podstawie której wyznaczyć można (przy określonych w badaniach wielkościach $f_{SZ,FK}$, $f_{SZ,b}$, f_b^*) wytrzymałość muru na ściskanie. Metoda ta nie była dotychczas szerzej stosowana, ponieważ opracowana została dla murów, w których stosunek wytrzymałości na ściskanie cegieł do wytrzymałości zaprawy jest nie większy od 5 – w praktyce, w murach na słabych zaprawach wapiennych warunek ten jest spełniony incydentalnie.

Podstawowy sposób obciążenia próbek walcowych muru pobranych z konstrukcji polega na realizacji obciążenia ściskającego za pośrednictwem odpowiednio wyprofilowanych przekładek stalowych. Jedne z pierwszych prób w tym kierunku podejmował H. G. Sixdorf [1]. Problematykę tych badań przedstawiono w pracach [9, 14].

Aktualnie opis stanowiska i metodę badań znaleźć można w zaleceniach UIC [7]. Obciążenie ściskające przykładane jest na pobocznicę próbki walcowej o średnicy 150 mm na powierzchni wyznaczonej kątem 60 stopni (rys. 3).



Rys. 3. Stanowisko do badań odwiertów rdzeniowych muru - według zaleceń UIC [7]

Fig. 3. Laboratory stand for testing drilled cores from masonry elements – according to UIC [7] recommendations

Wytrzymałość na ściskanie muru wyznaczyć można ze wzoru:

$$f = \eta \times \frac{F}{\phi \times l} \quad (3)$$

w którym:

- F – siła niszcząca,
- ϕ – średnica próbki,
- l – długość próbki,
- η – współczynnik korelacji.

Na podstawie badań prezentowanych w [6] zaproponowano wartości współczynnika korelacji z przedziału od 1,8 do 2,2. Jako wartość porównawczą przyjęto wytrzymałość na ściskanie określoną na filarkach o przekroju poprz. 250×250 mm i wysokości 5 warstw cegieł i zapraw. Bardzo mała smukłość filarków zdeterminowała pośrednio prezentowane w [6] wysokie wartości współcz. korelacji. Odniesienie wyników badań na odwiertach rdzeniowych do filarków o większych smukłościach np. 5 skutkuje zmniejszeniem współczynników korelacji $\rightarrow \eta = [1,6 \div 2,0]$. Zakres badań (na elementach wykonanych ze współczesnych materiałów, mury na zaprawach o wytrzymałościach co najmniej 5 MPa) powoduje, że do proponowanych powyżej wartości współczynnika korelacji podchodzić należy z dużą rezerwą.

W pracy [5] przedstawiono porównanie wyników badań rdzeni pobranych z przyczółków mostowych z zależnościami do wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie muru na podstawie wytrzymałości cegieł i zaprawy oraz z badaniami z wykorzystaniem *flat-jacks*. Przy zastosowaniu współczynnika korekcyjnego 1,7 różnice w wytrzymałościach na ściskanie muru uzyskane różnymi metodami nie przekraczały 20%.

H. G. Sixdorf [1] na podstawie badań 130 odwiertów rdzeniowych o średnicy 150 mm podał jako bezpieczne oszacowanie:

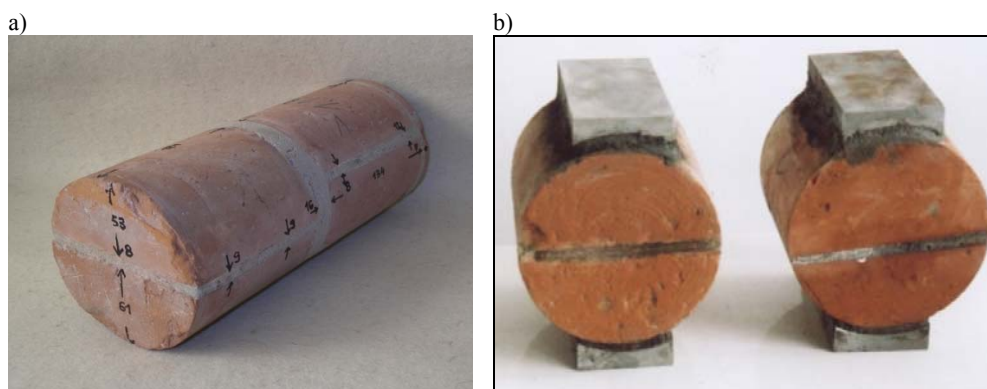
$$f = 0,83 \times f_{\phi 150} \quad (4)$$

$$f_{\phi 150} = 1,3 \times \frac{F}{\phi \times l} \quad (5)$$

Z analizy wzorów (4) i (5) wynika wartość współcz. korelacji $\eta = 1,08$ (w przybliżeniu przyjęć można $\eta = 1,1$).

Należy podkreślić, że realizacja badań w sposób przedstawiony na rys. 3 powoduje powstanie w próbce złożonego stanu naprężeń, który jest różny od występującego przy badaniu na ściskanie prostopadłościennych fragmentów muru (filarów, ścian). Analizy MES wykazują, że na sposób niszczenia próbek walcowych istotny wpływ ma koncentracja naprężeń w narożach nakładek oraz nierównomierny rozkład naprężeń wynikający z imperfekcji pobocznic odwiertu.

W badaniach własnych zastosowano odwierty rdzeniowe o średnicy 125 mm. Odwierty pochodziły z konstrukcji murowanego zbiornika na wodę czystą zrealizowanego w latach trzydziestych XX wieku. Widok jednego z odwiertów oraz sposób przyłożenia obciążenia przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Próbkę walcowe muru do badań wytrzymałościowych - badania własne
a) odwiert przed przycięciem – inwentaryzacja geometrii struktury muru
b) widok próbek przygotowanych do badań wytrzymałościowych

Fig. 4. Cylinder samples of masonry for strength determination – authors tests:
a) drilled core before cutting – inventory of geometry of wall structure,
b) view of prepared samples ready for tests

Obciążenie ściskające realizowano przez wyprofilowane nakładki oparte na poboczniczy próbek walcowych za pośrednictwem warstwy zaprawy – zbadano sześć elementów próbnym muru. Przy zastosowaniu współcz. korelacji wynoszącego 1,1 wytrzymałości określone na podstawie badań wyniosły od 8,3 do 12,7 MPa (wartość średnia 10,5 MPa). Ze względu na zastosowaną średnicę odwiertu – brak spoin pionowych, większy udział materiału ceramicznego, zastosowano dodatkowo redukcję o 10% i wówczas wytrzymałości muru odpowiednio 7,5 – 11,4 MPa (wartość średnia 9,5 MPa). Podkreślić należy, że są to dolne, bezpieczne oszacowania (dla minimalnej wartości współczynnika korelacji) a nie rzeczywiste wartości wytrzymałości na ściskanie muru, bowiem nie wykonano badań porównawczych na elementach prostopadłościennych w kierunku prostopadłym do spoin poziomych ewentualną metodą flat-jacks, co umożliwiłoby ocenę współczynnika przeliczeniowego.

Porównawczo przeprowadzono natomiast badania wytrzymałości na ściskanie cegieł na próbkach sześciennych $40 \times 40 \times 40$ mm uzyskując wartości od 25,2 do 35,3 MPa (wartość średnia 27,0 MPa – po przeliczeniu na wytrzymałość znormalizowaną 22,0 MPa). Sprawność analizowanego muru, rozumianą jako stosunek wytrzymałości na ściskanie muru do znormalizowanej wytrzymałości na ściskanie cegieł, oszacować więc można na poziomie 45%. Ze względu na bardzo dobrą jakość wykonania analizowanej konstrukcji, oraz jakość materiałów odpowiadające współczesnym wymaganiom, podjęto próbę określenia wytrzymałości na ściskanie muru na podstawie wzoru zalecanego w PN-EN 1996-1-1 [8]:

$$f_k = 0,8 \times K \times f_b^{0,7} \times f_m^{0,3} \quad (6)$$

w którym:

K = 0,45 jak dla murów z cegieł ceramicznych pełnych,

f_m – wytrzymałość na ściskanie zaprawy.

Współczynnik 0,8 we wzorze (6) zastosowano jak dla murów ze spoiną podłużną. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy określono na próbkach sześciennych $20 \times 20 \times 20$ mm wycinanych ze spoin muru i przeliczano na wytrz. normową f_m zgodnie z zaleceniami podanymi przez P. Schuberta w [15] – po przeliczeniu wytrzymałość zaprawy 24,5 MPa.

Biorąc powyższe pod uwagę charakterystyczna wytrzymałość na ściskanie muru ze wzoru (6) wynosi 8,2 MPa – zgodność z wynikami badań ocenić można jako zadowalającą.

W pracy [16] zamieszczono wyniki badań odwiertów rdzeniowych pobranych w kierunku prostopadłym do powierzchni wspornej cegieł. Próbki o $\varnothing 125$ mm pobierano ze ścian podokiennych a następnie przycinano na taką wysokość, aby stosunek średnicy do wysokości wynosił około 1. Wytrzymałości na ściskanie określona tym sposobem była dwukrotnie większa niż wyznaczona ze wzoru L. J. Oniszczyka.

Biorąc pod uwagę efekt skali można uznać, że wyniki prezentowane w [16] dobrze korespondują z zależnością tradycyjnie wykorzystywaną w polskiej praktyce budowlanej do określenia wytrzymałości na ściskanie muru.

4. Analiza wyników badań doświadczalnych

Dotychczas nie opracowano norm w zakresie pobierania próbek i badania odwiertów rdzeniowych cegieł i muru. W pracy [3] proponuje się pobranie co najmniej 5 odwiertów rdzeniowych muru i co najmniej 3 cegieł dla ustalenia wytrzymałości na ściskanie zgodnie z zależnością (2). W zaleceniach UIC [7] liczbę 3 próbek określa się jako minimalną dla oceny wytrzymałości muru na ściskanie, natomiast jako zalecana podawana jest w [7] liczba 6 próbek. Wybór miejsc pobrania odwiertów powinien być poprzedzony analizą dokumentacji obiektu (w tym dokumentacji archiwalnej) oraz badaniami wstępnym z wykorzystaniem metod nieniszczących celem ustalenia stopnia jednorodności fragm. konstrukcji ceglanej. Badania wstępne, o których mowa powyżej, są niezbędne przede wszystkim w budynkach historycznych, pełniących swoje funkcje od dziesiątek (setek) lat – podlegających w swojej historii przebudowom i długotrwanie narażonych na wpływ niekorzystnych oddziaływań środowiska zewnętrznego.

Z reguły nawet po właściwej selekcji materiału do badań, wyniki poszczególnych testów na odwiertach rdzeniowych muru mogą się zdecydowanie różnić. Wynika to nie tylko z niejednorodności muru w poszczególnych próbkach. Wpływ na ostateczny wynik mają uszkodzenia powstałe w trakcie odwiertu, transportu i docinania próbek na odpowiednią długość oraz imperfekcje w trakcie badań wytrzymałościowych. Trudny do jednoznacznej oceny jest również wpływ efektu odciąż. odwiertu pobranego z konstrukcji.

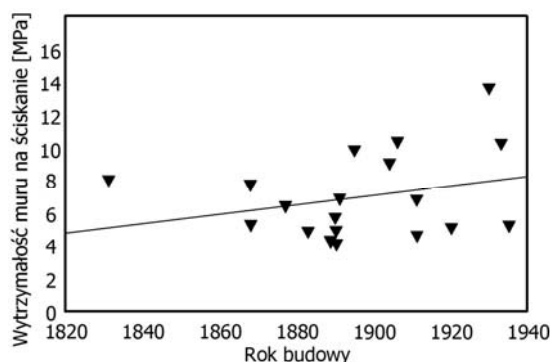
Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że szczególnie „wrażliwe” w tym zakresie są odwierty z murów ceglanych na zaprawach wapiennych o bardzo niskich wytrzymałościach.

Odniesienie wyników badań na odwiertach rdzeniowych do wytrzymałości muru w konstrukcji wymaga również uwzględnienia wpływu długotrwałego działania obciążenia (badania próbek walcowych prowadzone są w laboratorium przy obciążeniu działającym krótkotrwanie) oraz efektu skali. Wymaga to zastosowania obok współczynnika korelacji k , dodatkowego współczynnika redukcyjnego (W. Witig w [17] proponuje współczynnik redukcyjny na poziomie 0,75) lub przyjęcia odpowiednio wysokich współczynników materiałowych muru.

Szerokie badania wytrzymałości na ściskanie murów ceglanych w obiektach hydrotechnicznych z wykorzystaniem odwiertów rdzeniowych wykonano w Niemczech – rys. 5.

Stwierdzono znaczne różnice w wytrzymałościach murów pomiędzy poszczególnymi obiektami – najniższa wytrzymałość wynosiła około 4,0 MPa, natomiast najwyższa 14,0 MPa. Jakkolwiek z wykres na rys. 5 wskazuje na zależność pomiędzy wytrzymałością murów ceglanych a rokiem budowy obiektu, to należy zauważyć, że nawet dla obiektów wzniesionych w tym samym okresie, według precyzyjnych niemieckich przepisów wykonawczych, wytrzymałości murów mogą różnić się ponad dwukrotnie.

Biorąc pod uwagę liczbę czynników wpływu, do oceny wytrzymałości na ściskanie na podstawie badań odwiertów rdzeniowych muru podchodzić należy z dużą ostrożnością. Aktualnie liczba badań doświadczalnych jest niewystarczająca dla podania ogólnych zależności dla oszacowania wartości współczynników korelacji.



Rys. 5. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie murów ceglanych w obiektach hydrotechnicznych w Niemczech – ocena na podstawie badań odwiertów rdzeniowych [18].

Fig. 5. Compressive strength tests results for masonry walls in hydro-technical objects in Germany – estimation based on drilled core samples [18]

Podkreślić należy, że dotychczasowe badania dotyczyły przede wszystkim obiektów o dobrze zachowanych strukturach ceglanych, charakteryzujących się dobrą jakością wykonania, w których zaprawy miały wytrzymałość umożliwiającą wycięcie rdzeni murowych. W. Wittich podaje, że z muru można odwiercić rdzenie, gdy wytrzymałość zaprawy jest nie mniejsza niż 0,5 MPa. Doświadczenia własne autorów wskazują, że przy wytrzymałości zapraw wapiennych ok. 1,0 MPa część próbek w trakcie odwiertu ulega uszkodzeniom i nie nadaje się do bezpośrednich badań wytrzymałościowych.

Wartości współczynników korelacji należy weryfikować indywidualnie dla analizowanej konstrukcji ceglanej z uwzględnieniem oceny makroskopowej rdzeni (inventaryzacja geometrii struktury muru) oraz badań materiałów murowych – cegieł i zaprawy (np. pochodzących z odciętych fragmentów rdzeni lub z rdzeni, które zostały uszkodzone w trakcie transportu lub przygotowania do badań).

5. Podsumowanie

W konstrukcjach murowych, w odróżnieniu konstrukcji betonowych, metoda oceny wytrzymałości na ściskanie materiału na podstawie badań próbek walcowych pobranych z istniejących obiektów nie była dotychczas szerzej stosowana. Przyczyny ograniczonego stosowania tej metody wynikają ze specyfiki cech materiałowych muru (anizotropia, niejednorodność struktury, podatność na uszkodzenia w trakcie wykonywania odwiertów i transportu próbek) oraz niedostatecznej liczby badań umożliwiających określenie relacji pomiędzy wielkościami uzyskanymi z testów realizowanych na odwiertach rdzeniowych a wytrzymałością muru w konstrukcji.

Brak jest norm dotyczących oceny wytrzymałości muru na podstawie badań odwiertów rdzeniowych. Wymagania w tym zakresie podano jedynie w zaleceniach UIC [7]. Podkreślić należy, że współczynniki korelacji proponowane w [7] określone zostały na podstawie badań murów wykonanych na zaprawach o wytrzymałościach powyżej 5 MPa.

Z reguły badania dotyczyły istniejących konstrukcji inżynierskich lub elementów przygotowanych w laboratoriach – jakość wykonania i jakość użytych materiałów były w tych przypadkach bardzo dobre. Dla struktur ceglanych nie spełniających powyższych wymagań konieczne jest prowadzenie badań porównawczych (metoda *flat-jacks*, badania materiałów murowych, uzupełniające badania metodami nieniszczącymi). Jak zaznaczono już w rozdziale 4, biorąc pod uwagę liczbę czynników wpływu, do oceny wytrzymałości na ściskanie na podstawie badań odwiertów rdzeniowych muru podchodzić należy z dużą ostrożnością.

Metoda oceny wytrzymałości muru na podstawie badań odwiertów rdzeniowych nie może być brana pod uwagę w obiektach zabytkowych o dużej wartości historycznej, w których ingerencja w zabytkową konstrukcję nie jest możliwa ze względów konserwatorskich.

Istnieje jednak cała grupa obiektów, w których dopuszcza się ingerencję w konstrukcję a pobranie elementów próbnych do badań nie nastęcza problemów, pod warunkiem skoordynowania prac projektowych, wykonawczych i badawczych.

Pomimo bowiem licznych ograniczeń, o których była mowa powyżej, pobranie próbek muru z istniejącej konstrukcji ma podstawową zaletę – pozyskuje się do badań oryginalną strukturę w zakresie geometrii, zastosowanych materiałów, zawierającą historię oddziaływań i ich skutki. Pobranie odwiertów rdzeniowych muru umożliwia zbadanie także innych własności materiału, poza wytrzymałością na ściskanie, mających istotne znaczenie w ocenie stanu technicznego konstrukcji. Do własności tych zaliczyć można: gęstość objętościową muru, stopień zasolenia i degradacji warstw powierzchniowych, niejednorodność struktury, obecność ewentualnych zarysowań lub rozwarstwień. Jeżeli wykonanie odwiertów rdzeniowych muru nie jest możliwe (np. ze względu na niską wytrzymałość zaprawy) wiele dodatkowych informacji uzyskać można stosując odwierty małych średnic – w przypadku cegieł określić można np.: wytrzymałość i charakterystyki odkształceniowe, skład fazowy, co ma znaczenie zarówno w fazie obliczeń statycznych wytrzymałościowych jak również przy opracowywaniu szczegółowych wytycznych w zakresie prac naprawczych.

L i t e r a t u r a

- [1] S i x d o r f H. G., *Beitrag zum Tragverhalten vorhandener Mauerwerk-konstruktionen*, Dissertation, Leipzig 1986.
- [2] E g e r m a n n R., M a y e r K., *Die Entwicklung der Ziegelherstellung und ihr Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Mauerziegeln. Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke - Bauefüge, Konstr., Werkstoffe, Sonderforschungsbereich 315*, Universität Karlsruhe 1988.
- [3] B e r g e r F., *Zur nachträglichen Bestimmung der Tragfähigkeit von zentrisch gedrücktem Ziegelmauerwerk, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke – Bauefüge, Konstruktionen, Werkstoffe, Sonderforschungsbereich 315*, Universität Karlsruhe 1988.
- [4] P e c h A., Z a c h F., *Mauerwerkdruckfestigkeit – Bestimmung bei Bestandobjekten*, Mauerwerk, 3/2009.

- [5] Brencich A., Corradi Ch., Sterpi E., *Experimental approaches to the compressive response of solid clay brick masonry*, 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam 2004.
- [6] 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.
- [7] UIC – International Union of Railways: UIC code 778-3R – final draft 2008, Recommendations for the inspection, assessment and maintenance of masonry arch bridges.
- [8] PN-EN 1996-1-1:2009 Projektowanie konstrukcji murowych - Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.
- [9] Janowski Z., *Remonty i wzmocnienia murów oraz sklepień w obiektach zabytkowych*, Materiały XIV Ogólnopolskiej Konferencji Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń 1999.
- [10] Matyssek P., *Ocena wytrzymałości murów ceglanych w obiektach zabytkowych*, Czasopismo Techniczne, 09-12/2003.
- [11] Matyssek P., *Uwagi o szacowaniu wytrzymałości na ściskanie murów zabytkowych na podstawie wytrzymałości cegieł i zaprawy*, Materiały Budowlane 9/2010.
- [12] PN-EN 772-1:2001. Metody badań elementów murowych. Część 1: Określanie wytrzymałości na ściskanie.
- [13] PN-70-B-12016. Wyroby ceramiki budowlanej - Badania techniczne.
- [14] Egermann R., Mayer K., *Die Entwicklung der Ziegelherstellung und ihr Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Mauerziegeln. Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke - Bauefü, Konstr., Werkstoffe, Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe 1988.*
- [15] Schubert P., *Beurteilung der Druckfestigkeit von ausgeführtem Mauerwerk aus künstlichen Steinen und Natursteinen*, Mauerwerk-Kalender 1995.
- [16] Karczmarczyk S., Mierzwa J., *Ocena wytrzymałości muru na podstawie badań próbek rdzeniowych*, Materiały V Konf. REW.-INŻ., Kraków 1998.
- [17] Wittig W., Ullman P., Heidel R., Tschötschel M., *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von Mauerwerkskonstruktionen*, Bauplanung-Bautechnik, Heft 8, 1988.
- [18] Fleischer H., *Zur Begutachtung der Standsicherheit alter, massiver Verkehrswasserbauten*, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 81, 2000.