

Określenie wytrzymałości zaprawy w istniejących budynkach murowych

Prof. dr hab. inż. Romuald Orłowicz, mgr inż. Piotr Tkacz, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

1. Wprowadzenie

Rozpoznanie cech mechanicznych muru jako materiału dwuskładnikowego (elementy murowe i zaprawa) jest zagadnieniem najważniejszym i najtrudniejszym przy określeniu jego rzeczywistej nośności i trwałości. Problem polega na zróżnicowaniu wytrzymałości i odkształcalności zapraw i różnorodności elementów murowych stosowanych w różnych okresach wznoszenia budynków. Stare budynki wykonywano głównie z cegły ceramicznej na zaprawach wapiennych, a nawet glinianych. Jak na razie brak jest uniwersalnych i precyzyjnych metod, w celu określenia ich cech fizycznych i mechanicznych. Kluczową sprawą jest reprezentatywność badań materiałowych, zwłaszcza zaprawy. Szacowanie wytrzymałości zaprawy ze starych murów jest dotychczas trudnym i nie w pełni rozwiązaniem zagadnieniem. Przy opracowaniu ekspertyz i projektów obiektów planowanych do przebudowy, modernizacji lub rewitalizacji, wytrzymałość można szacować wg zaleceń normowych. Można również stosować inne metody, np. określenie wytrzymałości na próbkach pobranych bezpośrednio z budynku. Potrzebne jest jednak przeprowadzenie odpowiedniej liczby testów dla określenia współczynników korelacji między wytrzymałością zaprawy określoną różnymi metodami a badaniami normowymi. Poza tym, należy brać pod uwagę inne czynniki wpływające na wytrzymałość zaprawy, np. jej zwietrzenie, de-

gradację, czyli własności „nabyte” w okresie wieloletniej eksploatacji. Oznacza to, że ekspert lub projektant, poza znajomością metod badań cegły, powinien posiadać właściwą wiedzę i doświadczenie w zakresie zachowania się starych konstrukcji murowych.

2. Ustalenia normowe

Wytrzymałość muru można określić w sposób pośredni na podstawie badań jego poszczególnych składników (elementów murowych i zaprawy). W normie PN-B-03002:2007 podstawowe znaczenie nadaje się wzorowi potęgownemu w postaci:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3} \quad (1)$$

gdzie:

f_k – charakterystyczna wytrzymałość muru na ściskanie,
 f_b, f_m – średnie wytrzymałości elementów murowych i zaprawy,
 K – współczynnik wyznaczony empirycznie (dla murów z elementów ceramicznych grupy 1 $K=0,45$).

Wzór (1) został zmodyfikowany na podstawie wyników obszernych badań doświadczalnych. Podstawowe zastrzeżenia do wzoru wynikają z wymiaru stałej K oraz z faktu, że wytrzymałość charakterystyczna określana jest na podstawie wartości średnich cegły i zaprawy. Przydatnym do określenia wytrzymałości muru na ściskanie może być również wzór L. Oniszczyka [6]:

$$f_{\text{mean}} = A f_b [1 - a / (b + f_m / 2 f_b)] \eta \quad (2)$$

gdzie:

η – empiryczny współczynnik korekcyjny uwzględniający relację między wytrzymałością zaprawy i cegły

$$\eta = (0,03 + 2,25 f_m / f_b) / (0,04 + 2 f_m / f_b)$$

przy $f_m < 0,04 f_b$

$$\eta = 1 \quad \text{przy } f_m \geq 0,04 f_b \quad (3)$$

Współczynnik A w (2) określa się ze wzoru:

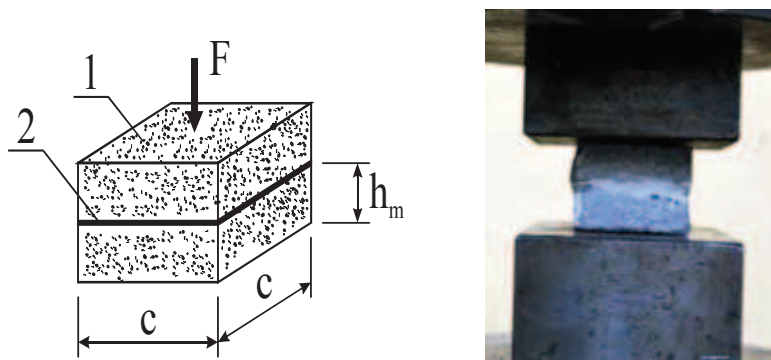
$$A = (10 + f_b) / (10m + n f_b) \quad (4)$$

Dla muru z ceramicznych elementów murowych o wysokości 50–100 mm wartości współczynników we wzorach (2) i (4) wg [6] wynoszą: $a = 0,2$, $b = 0,3$, $m = 1,25$, $n = 3$.

W wymienionych wzorach wytrzymałość zaprawy f_m określa się na podstawie badań połówek beleczek normowych o wymiarach 40 x 40 x 160 mm. Natomiast do określenia wytrzymałości zaprawy w istniejących murach po ich wieloletniej eksploatacji stosuje się inne metody.

3. Metody określania wytrzymałości zaprawy

Pobranie próbek zaprawy z muru, które mogłyby być poddane badaniu wytrzymałości na ściskanie, jest uciążliwe. Ewentualną metodą może być wbijanie w spoinę stalowego grotu z określoną energią. Urządzenie służące do wbijania jest podobne do młotka Schmidta z odpowiednio dobraną końców-



Rys. 1. Badanie zaprawy pobranej ze spoin wspornych o grubości h_m wg [7]: 1 – zaprawa, 2 – spoiwo łączące

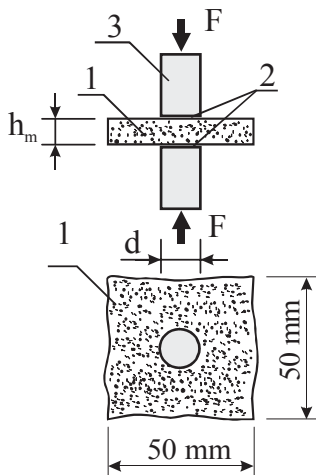
Tabela 1. Współczynnik korelacji k_m do określenia wytrzymałości zaprawy badanej według schematu rys. 1 [7]

Okres murowania	Wymiary próbek c (cm)		
	2	3	4
Letni	0,56	0,68	0,80
Zimowy	0,46	0,65	0,75

ką. Miarą wytrzymałości zaprawy na ściskanie jest wielkość zagłębienia grota w zaprawie, z poprawką uwzględniającą naprężenia ścisające występujące w spoinie. Są propozycje stosowania metod ultradźwiękowych lub opartych na pomiarze energii przy nawiercaniu spoiny [3]. W starych budynkach podstawowymi zaprawami były wapno, niekiedy gips i glina, a od drugiej połowy XIX wieku – cement. Analiza składu chemicznego zaprawy w zasadzie pozwala określić ich składniki, na podstawie których można wykonać beleczki normowe i określić wytrzymałość zaprawy. Trzeba jednak brać pod uwagę, że uzyskane wyniki będą obarczone błędami wynikającymi z następujących przyczyn [1, 2, 4, 5]:

- odtwarzanie starych zapraw na podstawie ich składu chemicznego nie uwzględnia technologii ich wykonania, stosowanych dodatków, ilości zaborowej wody, warunków atmosferycznych podczas wykonania muru, zjawisk reologicznych;
- na wytrzymałość zaprawy po wieloletniej eksploatacji muru mo-

że mieć wpływ ich degradacja związana z wietrzeniem, korozją chemiczną, zasoleniem itp. W literaturze technicznej przytaczano różne sposoby badań laboratoryjnych zaprawy na próbkach pobranych z muru (o grubości równej grubości spoiny wspornej). Zgodnie z [7], próbki wykonuje się w postaci dwóch połączonych między sobą placków zaprawy o powierzchni kwadratowej (rys. 1).



Rys. 2. Badanie zaprawy pobranej ze spoin wspornych o grubości h_m wg normy DIN 18555-9:1999-09: 1 – zaprawa, 2 – filc lub gips, 3 – stalowe elementy dociskowe o średnicy 20–25 mm

Cechy mechaniczne spoiwa łączącego placki powinny być zbliżone do cech badanej zaprawy. Według tego sposobu, wytrzymałość zaprawy zaleca się określać wg wzoru:

$$f_m = k_m F/A \quad (5)$$

gdzie:

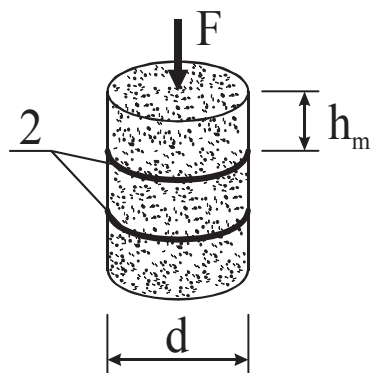
F – siła niszcząca,

A = c x c – pole przekroju

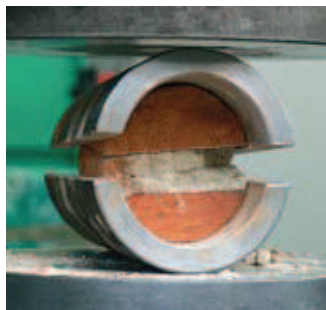
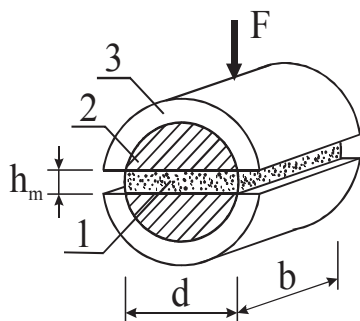
k_m – współczynnik korelacji pomiędzy uzyskaną wytrzymałością, a wytrzymałością na połówkach beleczek 40 x 40 x 160 mm (tabela 1). Na rysunku 2 podano schemat badań zaprawy wg zaleceń normy niemieckiej DIN 18555-9: 1999-09. Wytrzymałość określa się wg wzoru (6), w którym A jest polem przekroju elementu dociskowego. Oprócz efektu skali, na wytrzymałość w tym przypadku ma wpływ efekt Bauschingera, ponieważ zaprawa pomiędzy elementami dociskowymi współpracuje z pozostałym nieobciążonym obszarem próbki. Współczynnik korelacji dla tego testu szacuje się na około $k_m=0,5$ [8].

Próbki mogą mieć również kształt walców wykonanych z wyciętych z zaprawy 3–4 krążków o średnicy 50–60 mm i połączonych między sobą właściwym spoiwem (rys. 3). Warto nadmienić, że objętościowa skala tak przygotowanych próbek





Rys. 3. Badania próbek walcowych wykonanych z połączonych między sobą krążków zaprawy o grubości h_m : 1 – zaprawa, 2 – spoiwo łączące



Rys. 4. Badanie zaprawy na wyciętych z muru próbkach walcowych: 1 – zaprawa o grubości h_m , 2 – cegła, 3 – obejmę stalową

jest zbliżona do skali normowych próbek zaprawy (połówek beleczek 40 x 40 x 160 mm).

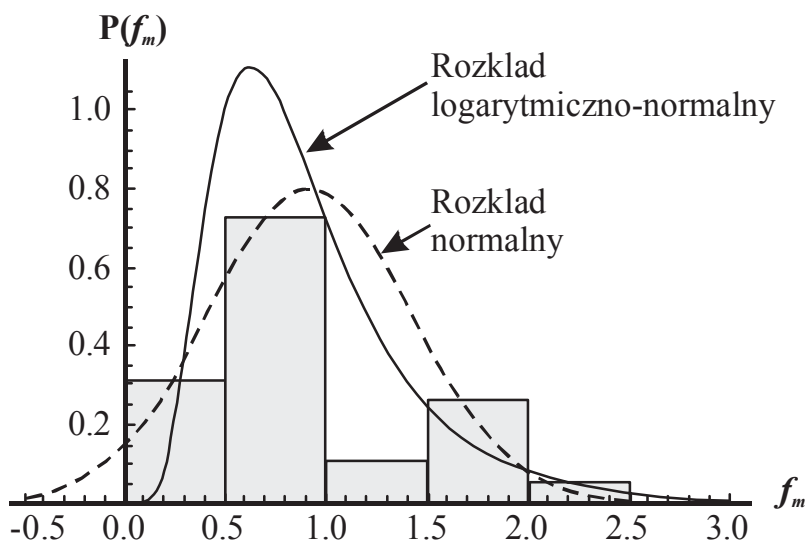
Mankamentem wymienionych sposobów jest uciążliwość pobrania próbek zaprawy z muru oraz ich przygotowanie do badań niszczących. Dotyczy to zwłaszcza słabych wapiennych zapraw o wytrzymałości poniżej 1,0 MPa lub zapraw posiadających dużą przyczepność do elementów murowych. W przypadkach tych może być przydatna stosowana przez autorów niniejszego artykułu metoda badań na próbkach walcowych. Próbkę wycina się prostopadle do lica muru tak, aby jej przekrój zawierał dwa segmenty cegły ze spoiną wsporną między nimi. Badanie wykonuje się w sztywnych obejmach stalowych o wewnętrznej średnicy d równej średnicy próbki walcowej (rys. 4).

4. Badania własne

Autorzy przeprowadzili badania wytrzymałości zaprawy pobieranej z nowo wykonanego muru ceglanego oraz ze ścian kamienic w Szczecinie, które po około 100 latach eksploatacji podlegały rozbiórce. W próbkach ze ścian kamienic określono zawartość spoiwa i kruszywa, gęstość objętościową i nasiąkliwość masową. Była to zaprawa na bazie wapna hydraulicznego o gęstości objętościowej około 1600 kg/m³. Z uwagi na małą przyczepność zaprawy do cegły, możliwe było wyizolowanie jej dość dużych fragmentów. Następnie z fragmentów wycięto krążki o średnicy 50 mm. Część z nich badano na ściskanie wg metody przedstawionej na rysunku 2. Z pozostałej części krążków wykonano elementy próbne w postaci walca o wy-

sokości około 40–50 mm (rys. 3). Poza tym, ze spoin wspornych wycinano płytki kwadratowe o wymiarze $c = 40$ mm, z których wykonano próbki jak na rysunku 1. Pobierano również odwiertny walcowe o średnicy 50 mm w kierunku prostopadłym do lica ścian murowych. W próbkach tych spoina pozioma usytuowana była między segmentami cegły bez naruszania struktury zaprawy i przyczepności do cegły (rys. 4). Takie same próbki przygotowano z fragmentów zaprawy wyizolowanych z nowo wykonanego muru, w którym stosowano zaprawę murarską cementową wg PN-EN 988-2 (proporcje składników – cement 25%, kruszywa 75%, dodatki 0,02%). Otrzymane wytrzymałości średnie zapraw wraz ze współczynnikami zmienności podano w tabeli 2. W wartościach wytrzymałości uzyskanych wg metod (jak na rysunkach 1 i 2), współczynników korelacji k_m nie uwzględniano. Duża liczba elementów próbnych pozwoliła na dobranie odpowiedniej funkcji rozkładu prawdopodobieństw. Rysunek 5 przedstawia histogram oraz dwa rozkłady dwuparametrowe badań zaprawy na ściskanie: normalny i log-normalny. Przyjęto rozkład logarytmiczno-normalny, dokonując estymacji parametrów metodą momentów. Z analizy danych w tabeli 2 wynika, że wartości wytrzymałości zaprawy otrzymane na różnych próbkach znacząco różnią się między sobą. Największą wytrzymałość uzyskano podczas badań odwiertów pobranych z muru (rys. 4).

W odwiertach tych, podobnie jak i w murze, spoina pracuje w trójosiowym stanie ściskania z uwagi na jej przyczepność i tarcie między segmentami cegły. Uzyskane tą metodą wartości wytrzymałości dla obu zapraw są średnio o 4,3 razy większe od wytrzymałości otrzymanej z badań próbek wg rysunku 3 (wiersz 1 tabela 2). Natomiast wytrzymałość zaprawy uzyskana na próbkach wg rysunku 1, była średnio o 1,4 razy większa niż na próbkach wg rysunku 3.



Rys. 5. Histogram badań wytrzymałości zaprawy na ściskanie oraz wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństw

Warto zaznaczyć, że relacje te dla starej wapiennej i nowej cementowej zaprawy mało różnią się między sobą. Znacznie większe zróżnicowanie zaobserwowano między wytrzymałościami obu zapraw (w odniesieniu do próbek na rysunku 3), badanych wg schematu na rysunku 2). W przypadku tym, wytrzymałość cementowej zaprawy była o 1,8 razy, a wapiennej o 4,3 razy większa w porównaniu z wytrzymałością próbek wg rysunku 3. Współczyn-

nik zmienności wytrzymałości wapiennej zaprawy w tym teście był również największy (103%). Mogło to być skutkiem zróżnicowania grubości wyizolowanych z muru płytek zaprawy: grubość spoin z zaprawy cementowej wynosiła $h_m = 10 \pm 1 \text{ mm}$, natomiast z zaprawy wapiennej 12–20 mm. Poza tym, mechanizm niszczenia próbek z cementowej zaprawy był bardzo kruchy, natomiast z zaprawy wapiennej – lepko-plastyczny. Uzyskane dane należy trakto-

wać jako wstępne. W celu ustalenia miarodajnych współczynników korelacji, autorzy zamierzają przeprowadzić szereg bardziej obszer-nych badań, zarówno dla wymienionych, jak i innych metod.

BIBLIOGRAFIA

[1] Janowski Z., Współczesne narzędzia i metodyka pracy przy opracowaniu ekspertyz z zakresu budownictwa zabytkowego. XI Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy rzeczoznawstwa budowlanego” Warszawa – Miedzeszyn 2010
 [2] Janowski Z., Cechy sprężyste i wytrzymałość murów w obiektach zabytkowych poddanych obciążeniu statycznym. V Konferencja Naukowo-Techniczna. „REW-INŻ.-2000 Inżynierskie problemy odnowy Staromiejskich Zespołów Zabytkowych”. Kraków 2000
 [3] Jasieńko J., Engel L., Kondolewicz A., Problemy konstrukcyjno-konserwatorskie w stabilizacji i ekspozycji ruin obiektów kamiennych na przykładzie Zamku „Lenno” we Włeniu. „Wiadomości Konserwatorskie” Wrocław Nr 26/2009
 [4] Lewicki B., Ocena bezpieczeństwa istniejących konstrukcji murowych. ITB. Warszawa 1998
 [5] Lewicki B., Diagnostyczna wytrzymałość obliczeniowa betonu i muru. ITB. Warszawa 2002
 [6] Oniszczuk L., Kamienne konstrukcje. Moskwa 1939
 [7] Rekomendacji po obsledowaniu i ocenie tiechniczieskiego sostojanija krupnopanielných i kamienných zdani. CHIIISK, Moskwa 1988
 [8] Matysek P., Uwagi o szacowaniu wytrzymałości murów zabytkowych na podstawie wytrzymałości cegieł i zaprawy. Materiały budowlane nr 9/2010

Tabela 2. Podstawowe wyniki badań na ściskanie próbek zaprawy pobranych z nowo wykonanego muru oraz z wyburzonej kamienicy (w nawiasach)

Nr	Metoda badań	Liczba próbek	Wytrzymałość średnia [MPa]	Współczynnik zmienności [%]
1		9 (12)	17,8 (0,6)	30 (28)
2		25 (28)	23,5 (0,9)	28 (55)
3		30 (33)	32,6 (2,6)	28 (103)
4		10 (10)	72 (2,8)	18 (21)