

Ocena wczesnej wytrzymałości muru na ściskanie

Dr inż. Roman Jarmontowicz, mgr inż. Jan Sieczkowski, Instytut Techniki Budowlanej

1. Wprowadzenie

W praktyce budowlanej niekiedy zachodzi potrzeba oceny wytrzymałości muru na ściskanie, zanim osiągnie ona wytrzymałość docelową, określaną na podstawie norm projektowania konstrukcji murowych PN-EN 1996 [1] lub PN-B-03002 [2]. Potrzeba takiej oceny ma obecnie większe znaczenie, co wynika ze zmniejszenia pracochłonności wykonania 1 m² muru. Współczesne elementy murowe oraz techniki murowania pozwalają na wykonanie muru jednej kondygnacji nawet w czasie jednego do trzech dni. Powstaje więc pytanie, kiedy na takim murze można przystąpić do wykonania stropów lub obciążać je w inny sposób. W takich sytuacjach konieczna jest znajomość wytrzymałości muru przed osiągnięciem przez niego wytrzymałości docelowej. Wymienione wyżej normy projektowania konstrukcji murowych tych spraw nie rozstrzygają.

Należy mieć przy tym na uwadze, że normy PN-EN 1996 [1] oraz PN-B-03002 z 2007 r. i z 1999 r. (tzw. normy pomostowe, wdrażające zasady Eurokod 6) operują wytrzymałością charakterystyczną muru, a wcześniejsze normy PN-B bazowały na średniej wytrzymałości muru na ściskanie.

2. Średnia wytrzymałość muru na ściskanie, zależność $\bar{f} = f(f_B; f_m)$

W literaturze przedmiotu występują różne zależności między średnią wytrzymałością muru na ściskanie \bar{f} i średnią wytrzymałością na ściskanie elementów murowych f_B oraz zaprawy f_m . Zależność ta najlepiej opisana jest przez Oniszczyka [3] wzorem o następującej postaci:

$$\bar{f} = \frac{A + f_B}{A + \alpha f_B} \beta \left(1 - \frac{a_o}{b_o + \frac{f_m}{2f_B}}\right) f_B \quad (1)$$

gdzie:

$A, \alpha, \beta, a_o, b_o$ – parametry empiryczne, pozostałe oznaczenia jak wyżej.

Wzór (1) został przekształcony przez Zembrowskiego [4], który zastąpił parametry a_o i b_o parametrami zmodyfikowanymi $a_z = 2(b_o - a_o)$ oraz $b_z = 2b_o$. Wtedy wzór (1) przybrał następującą postać:

$$\bar{f} = \frac{A + f_B}{A + \alpha f_B} \beta \frac{\frac{f_m}{f_B} + a_z}{\frac{f_m}{f_B} + b_z} f_B \quad (2)$$

Wzory (1) i (2) są sobie równoważne, z tym że wzór (2) jest korzystniejszy w praktycznym posługiwaniu się nim. Zaletą tych wzorów jest uwzględnienie faktu, że mur świeżo wykonany, kiedy przyjmuje się wytrzymałość zaprawy na ściskanie równą zero, ma pewną niewielką wytrzymałość, która z czasem wzrasta aż do osiągnięcia wytrzymałości docelowej. Zjawiska tego nie uwzględnia wzór podany w Eurokodzie 6 [1] o następującej postaci:

$$f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta \quad (3)$$

gdzie:

f_k – wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie,

f_b – średnia wytrzymałość znormalizowana elementów murowych na ściskanie,

f_m – średnia wytrzymałość zaprawy na ściskanie,

K, α, β – współczynniki empiryczne.

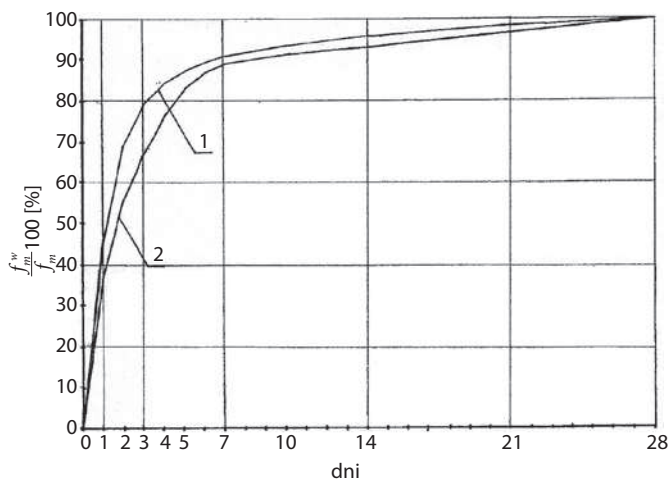
We wzorze (3) jako wytrzymałość zaprawy f_m przyjmuje się wytrzymałość zaprawy osiągniętą po 28 dniach twardnienia w warunkach laboratoryjnych.

Bezpośrednio po wykonaniu muru, tj. gdy wytrzymałość zaprawy na ściskanie przyjmuje się równą zero, wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie tego muru też będzie równa zero. Zatem także średnia wytrzymałość muru na ściskanie również będzie równa zero, czego nie potwierdza praktyka. Do oceny wytrzymałości takiego muru, do czasu osiągnięcia wytrzymałości docelowej, można stosować wzór (2), ale będzie to wytrzymałość średnia, a nie charakterystyczna, która jest niezbędna do oceny nośności muru. Określenie wytrzymałości charakterystycznej na podstawie wytrzymałości średniej jest kłopotliwe, ponieważ w Eurokodzie 6 [1] nie ma informacji na temat zmienności wytrzymałości przyjętej przy ustalaniu współczynników we wzorze (3). Pozostaje zatem korzystanie bezpośrednio ze wzoru (2), przy jednoczesnym określeniu wytrzymałości zaprawy murarskiej f_m^w w dniu, dla którego ustalana będzie wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie (między zakończeniem murowania i 28 dniem twardnienia zaprawy).

3. Wytrzymałość zaprawy murarskiej na ściskanie w początkowym okresie wiązania i twardnienia

Przy wznoszeniu murów z reguły stosowane są tylko zaprawy murarskie cementowo-wapienne lub cementowe i one będą rozpatrywane w dalszej części artykułu. Zaprawy wapienne nie są stosowane ze względu na ich małą wytrzymałość i powolny przyrost wytrzymałości w czasie.

Wzrost wartości wytrzymałości zapraw cementowych i cementowo-wapiennych w czasie do 90 dni przedstawiono w publikacji [5]. Bardziej interesujące jest jednak narastanie wytrzymałości zaprawy jako funkcji wytrzymałości 28-dniowej, wyrażonej w procentach. W oparciu o tę publikację ustalono przyrost wytrzymałości zaprawy jako procent wytrzymałości 28-dniowej – rysunek 1.



Rys. 1. Wytrzymałość względna zapraw na ściskanie 1 – zaprawa cementowa, 2 – zaprawa cementowo-wapienna

Tabela 1. Przyrost wytrzymałości zapraw na ściskanie w stosunku do wytrzymałości 28-dniowej

Zaprawa	Względna wytrzymałość zaprawy na ściskaniem w %, przy jej wieku w dniach									
	1	2	3	4	5	7	10	14	21	28
Cementowa	45,2	69,3	79,5	84,3	87,3	91,0	93,4	95,8	97,8	100,0
Cementowo-wapienna	37,2	55,9	66,0	76,6	82,8	89,0	91,0	93,1	96,9	100,0

Tabela 2. Wartości współczynników do wzoru (2)

Poz.	Rodzaj muru	Wartości parametrów				
		A	α	β	a_z	b_z
1	Z cegły pełnej ceramicznej i silikatowej	10	3,3	1,0	0,2	0,6
2	Z cegły dziurawki	16,6	1,33	0,54	0,16	0,67
3	Z cegły kratówki	16,6	4,0	0,70	0,018	0,062
4	Z pustaków ceramicznych	16,6	3,9	1,00	0,024	0,103
5	Z pustaków betonowych i kamienia sztucznego	10	2,0	0,95	0,1	0,5
6	Z bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego	2,8	1,52	0,96	0,86	1,23
7	Z kamienia naturalnego: – dzikie z kamienia łamanego sortowanego i cyklopowe – warstwowe – rzędowe i mozaikowe – z ciosów – z bloczków	10	8,0	1,0	0,1	0,5
8		10	6,0	1,4	0,1	0,5
9		10	5,0	1,4	0,1	0,5
10		10	3,4	1,4	0,1	0,5
11		10	2,5	1,5	0,1	0,5

Względna wytrzymałość na ściskanie początkowo wzrasta szybciej w zaprawie cementowej, co szczególnie obserwuje się w czasie od początku twardnienia do około 7 dni. Później przyrosty wytrzymałości obydwu zapraw są prawie takie same. Po 7 dniach obydwie rodzaje zapraw osiągają wytrzymałość równą około 90% wytrzymałości 28-dniowej. Oczywiście bezwzględne wartości wytrzymałości na ściskanie tych zapraw będą się znacznie różnić między sobą.

Przy ocenie wytrzymałości muru na ściskanie przyjmuje się klasę zaprawy lub jej wytrzymałość na podstawie badań normowych – wg normy [6]. Mając tak określoną wytrzymałość 28-dniową, można określić wcześniejszą

wytrzymałość zaprawy, korzystając z danych zawartych w tabeli 1, opracowanej na podstawie danych z publikacji [5]. Dla wieku zaprawy o wartościach pośrednich należy zastosować interpolację liniową. Obliczone w ten sposób wartości wytrzymałości zaprawy w wieku od 1 dnia do 27 dni będą podstawą do ustalenia wytrzymałości na ściskanie muru w tym samym wieku.

4. Wytrzymałość muru na ściskanie przed osiągnięciem wytrzymałości docelowej

Podane w Eurokodzie 6 [1] wzory na obliczanie wytrzymałości muru na ściskanie dotyczą wytrzymałości

Tabela 3. Współczynnik kształtu elementów murowych δ [7]

Wysokość elementu murowego ¹⁾ , mm	Mniejszy poziomy wymiar elementu murowego, mm				
	50	100	150	200	≥250
40	0,80	0,70	–	–	–
50	0,85	0,75	0,70	–	–
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	1,10
≥250	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

Uwaga: Dopuszcza się liniową interpolację między wartościami współczynnika kształtu

1) wysokość po przygotowaniu powierzchni

charakterystycznej muru po 28 dniach dojrzewania, dlatego do wyznaczania wczesnej (poniżej 28 dni dojrzewania) wytrzymałości muru na ściskanie przyjęto wzór (2) z wartościami współczynników podanymi w tabeli 2 [9] i [10].

We wzorze (2) średnia wytrzymałość na ściskanie elementów murowych nie jest wytrzymałością znormalizowaną f_b , tylko wytrzymałością otrzymaną bezpośrednio z badań f_B . Producenci elementów murowych zawsze deklarują wytrzymałość znormalizowaną, ponieważ taką wytrzymałością projektanci posługują się przy obliczaniu wytrzymałości charakterystycznej muru. Korzystanie ze wzoru (2) wymaga przeliczenia deklarowanej znormalizowanej wytrzymałości elementów murowych f_b na wytrzymałość średnią z badań f_B . Przeliczenie takie, zgodnie z normą [7], Załącznik A, należy wykonać według wzoru:

$$f_B = f_b : \delta \quad (5)$$

w którym:

f_B – średnia wytrzymałość na ściskanie elementów murowych,

f_b – średnia znormalizowana wytrzymałość na ściskanie elementów murowych,

δ – współczynnik kształtu, przyjmowany wg tabeli 3 [7]

Mając dane do wzoru (2) i wytrzymałości na ściskanie zapraw w wieku poniżej 28 dni, można wyznaczyć wytrzymałość średnią muru na ściskanie, także w tym samym wieku. Pozostaje jedynie przeliczenie ustalonej wytrzymałości średniej na wytrzymałość charakterystyczną. Do tego celu niezbędna jest znajomość rozrzutów wytrzymałości muru na ściskanie (v_m). Jak już wspomniano, w Eurokodzie 6 [1] nie ma informacji na ten temat, ale można znaleźć je w publikacji [8]. Jednakże dane zawarte w tej publikacji dotyczą bardzo dużych rozrzutów wytrzymałości muru na ściskanie, co wynikało ze stosowanej wówczas technologii produkcji elementów murowych i zapraw. Obecnie poziom produkcji elementów murowych i zapraw oraz technika wykonywania konstrukcji murowych są zdecydowanie lepsze,

Tabela 4. Wartości współczynników zmienności wytrzymałości muru v_m

Rodzaj muru	v_m
Z cegły pełnej ceramicznej i silikatowej	0,10
Z cegły dziurawki	0,15
Z cegły kratówki	0,12
Z pustaków ceramicznych	0,10
Z pustaków betonowych i kamienia sztucznego	0,15/0,10
Z bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego	0,10
Z kamienia naturalnego: – dzikie z kamienia łamanego sortowanego i cyklopowe	0,20
– warstwowe	0,18
– rzędowe i mozaikowe	0,18
– z ciosów	0,12
– z bloczków	0,12

co przyczyniło się do uzyskiwania znacznie korzystniejszych parametrów jednorodności wytrzymałości na ściskanie konstrukcji murowych. Można przyjąć, że rozrzuty wytrzymałości murów obecnie zmniejszyły się co najmniej o połowę. Wartości współczynników zmienności wytrzymałości murów można więc przyjmować jak podano w tabeli 4.

Wytrzymałość charakterystyczną muru można wyliczyć ze wzoru:

$$f_k = \bar{f} (1 - 1,64 v_m)$$

w którym:

f_k – wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie,

\bar{f} – wytrzymałość średnia muru na ściskanie,

v_m – współczynnik zmienności wytrzymałości muru na ściskanie.

5. Przykłady obliczeń

W celu przybliżenia sposobu obliczania wczesnej wytrzymałości muru na ściskanie podano poniżej dwa przykłady.

Przykład 1.

Obliczenie wytrzymałości charakterystycznej muru na ściskanie wykonanego z pustaków ceramicznych klasy 10, o wymiarach 360×238×238 mm, na zaprawie cementowo-wapiennej klasy 5, po trzech dniach od wymurowania.

Obliczenie wytrzymałości średniej elementów murowych

Biorąc pod uwagę wysokość elementu murowego (238 mm) i mniejszy wymiar podstawy (238 mm) z tabeli 3, po uwzględnieniu interpolacji liniowej, odczytano wartość współczynnika $\delta = 1,16$. Wytrzymałość średnią elementów murowych na ściskanie obliczono ze wzoru (5):

$$f_B = f_b : \delta = 10 : 1,16 = 8,62 \text{ MPa}$$

Obliczenie średniej wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowo-wapiennej po trzech dniach twardnienia. Z tabeli 1 odczytuje się wartość tej wytrzymałości jako 0,66 wytrzymałości po 28 dniach twardnienia. Następnie oblicza się wartość średniej wytrzymałości na ściskanie tej zaprawy:

$$f_m = 0,6 \times 5 = 3,3 \text{ MPa}$$

Obliczenie średniej wytrzymałości muru na ściskanie po trzech dniach dojrzewania:

$$\bar{f} = \frac{A + f_B}{A + \alpha f_B} \beta \frac{\frac{f_m + a_z}{f_B}}{\frac{f_m}{f_B} + b_z} f_B = \frac{16,6 + 8,63}{16,6 + 3,9 \times 8,63} 1,0 \frac{\frac{3,3}{8,63} + 0,1}{\frac{3,3}{8,63} + 0,5} 8,63 = 2,73 \text{ MPa}$$

Obliczenie charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie muru po trzech dniach dojrzewania:

$$f_k = \bar{f} (1 - 1,64 v_m) = 2,73 (1 - 1,64 \cdot 0,10) = 2,28 \text{ MPa}$$

Przykład 2.

Obliczenie wytrzymałości charakterystycznej muru wykonanego z cegły ceramicznej pełnej klasy 20, o wymiarach 250×120×65 mm, na zaprawie cementowej klasy 10, po siedmiu dniach po wymurowaniu.

Obliczenie wytrzymałości średniej elementów murowych

Biorąc pod uwagę wysokość elementu murowego (65 mm) i mniejszy wymiar podstawy (120 mm) z tabeli 3, po uwzględnieniu interpolacji liniowej, odczytano wartość współczynnika $\delta = 0,81$. Wytrzymałość średnią elementów murowych na ściskanie obliczono ze wzoru (5):

$$f_B = f_b : \delta = 20 : 0,81 = 24,7 \text{ MPa}$$

Obliczenie średniej wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowo-wapiennej po siedmiu dniach twardnienia.

Z tabeli 1 odczytuje się wartość tej wytrzymałości jako 0,91 wytrzymałości po 28 dniach twardnienia. Następnie oblicza się wartość średniej wytrzymałości na ściskanie tej zaprawy:

$$f_m = 0,91 \cdot 10 = 9,1 \text{ MPa}$$

Obliczenie średniej wytrzymałości muru na ściskanie po trzech dniach dojrzewania:

$$\bar{f} = \frac{A + f_B}{A + \alpha f_B} \beta \frac{\frac{f_m + a_z}{f_B}}{\frac{f_m}{f_B} + b_z} f_B = \frac{10 + 24,7}{10 + 3,3 \times 24,7} 1,0 \frac{\frac{9,1}{24,7} + 0,2}{\frac{9,1}{24,7} + 0,6} 24,7 = 5,50 \text{ MPa}$$

Obliczenie charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie muru po trzech dniach dojrzewania:

$$f_k = \bar{f} (1 - 1,64 v_m) = 5,50 (1 - 1,64 \cdot 0,10) = 4,59 \text{ MPa}$$

Podane przykłady ilustrują praktyczny sposób postępowania przy wyznaczaniu wczesnej (przed 28 dniem dojrzewania muru) wytrzymałości charakterystycznej muru na ściskanie.

BIBLIOGRAFIA

[1] PN-EN 1996 Eurokod 6. Projektowanie konstrukcji murowych
 [2] PN-B-03002:2007 Konstrukcje murowe. Projektowanie i obliczanie
 [3] Oniszczuk L.J., Osobienności raboty kamiennych konstrukcji pod nagruzkoj w stadii razruszenija. Issliedowanija po kamiennym konstrukcjam. Gosudarstwiennoje izdatielstwo litieratury po stroitelstwu i architekturie. Moskwa 1960
 [4] Zembrowski J., Konstrukcje murowe z pustaków ceramicznych drążonych pionowo. Arkady/Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1968
 [5] Rozszerzenie podstaw naukowych ustaleń Eurokodu 6 Projektowanie konstrukcji murowych. Komentarz naukowo-badawczy do PN-EN 1996-1-1:2008, PN-EN 1996-2:2008, PN-EN 1996-3:2008, tom 1 (praca zbiorowa), Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2008
 [6] PN-EN 1015-11 Metody badań zapraw do murów. Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy
 [7] PN-EN 772-1 Metody badań elementów murowych. Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie
 [8] Jarmontowicz R., Prace analityczno-badawcze w zakresie wytrzymałości charakterystycznej konstrukcji murowych, Cerprojekt, Warszawa 1987 (maszynopis)
 [9] PN-B-03002:1987 Konstrukcje murowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
 [10] Lewicki B., Jarmontowicz R., Kubica J., podstawy projektowania niezbrojonych konstrukcji murowych. ITB, Warszawa 2001