

Piotr Bilko*, Leszek Małyszko*
Romuald Orłowicz**

Ocena wytrzymałości muru podczas modernizacji kamienic komunalnych

Evaluation of the compressive strength of masonry during modernization of municipal houses

1. Wprowadzenie

Znajdujące się w zasobach komunalnych wiekowe kamienice murowe są sukcesywnie remontowane i modernizowane. Zagadnienia projektowe i realizacyjne z tym związane są dość złożone z uwagi na zmianę rozkładu części obciążeń z ciągłego na skupiony. Są też przypisane nowe wymogi cieplno-wilgotnościowe i akustyczne. Zasadniczym problemem staje się jednak ocena jakości materiałów konstrukcyjnych oraz ocena wytrzymałości na ściskanie murowanych ścian nośnych. Znajomość wytrzymałości charakterystycznej muru na ściskanie pozwala również na uściślenie obliczeń przy sprawdzaniu stanu granicznego nośności w strefie lokalnego docisku. Możliwe są sposoby oceny o różnym stopniu wiarygodności, od niszczącego ściskania *in situ* względnie dużych fragmentów muru po badania nieniszczące.

W pracy omawia się sposób określenia wytrzymałości muru na ściskanie na podstawie potęgowego wzoru normowego oraz laboratoryjnych badań cegły i zaprawy pobranych ze ścian murowanej kamienicy przedwojennej, typowej dla ziem odzyskanych. W porównaniu do badania całych fragmentów muru jest to sposób tańszy i szybszy oraz możliwy do przeprowadzenia w dużej liczbie prób, co umożliwia szerszą analizę statystyczną. Jego wadą jest jednak trudna do oceny niepewność oszacowania wynikająca ze stosowania wzoru normowego.

1. Introduction

The one-century-old brick tenement houses which make municipal housing resources are successively repaired and modernized. Designing and realization questions connected with this fact are quite complex due to the change of the distribution of a part of load from continuous to concentrated. There have also been assigned new requirements concerning thermal, moisture and acoustic characteristics. However, it is the quality of constructional materials and the assessment of compressive strength of the load-bearing brick walls that have become the main problem. Knowledge of characteristic compressive strength of the wall enables to specify the calculations when checking the boundary state of carrying capacity in the zone of local pressure. There are different ways of assessment possible, of various extent of reliability, from destructive pressure *in situ* for studying relatively large fragments of wall to non-destructive testing.

In this study the way of determination of the compressive strength of wall on the basis of the exponential normative formula and laboratory investigations of samples of brick and mortar taken from the walls of the pre-war brick tenement house, typical for the areas brought back to Poland after the war, have been presented. In comparison with testing of the whole fragments of wall this is a cheaper and quicker way, possible to be realized in a large number of tests, which enables broader statistical analysis. However, uncertainty of estimation of the results obtained by applying the normative formula, which is difficult to assess, makes a disadvantage thereof.

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

2. Wytrzymałość muru na ściskanie

Wytrzymałość muru na ściskanie określa się w praktyce na podstawie wzorów w funkcji wytrzymałości elementów murowych f_b oraz zaprawy f_m . Proponowane są różne wzory, z których część omówiono w monografii [1]. W europejskiej normie EC6 [2] podstawowe znaczenie nadaje się wzorowi potęgowemu w postaci:

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (1)$$

gdzie: f_k – charakterystyczna wytrzymałość muru na ściskanie,
 f_b, f_m – średnie wytrzymałości określone według norm,
 K, α, β – współczynniki doświadczalne.

Wzór ten został określony na podstawie wyników obszernych badań doświadczalnych. Podstawowe zastrzeżenia do wzoru wynikają z wymiaru stałej K (w MPa do odpowiedniej potęgi, tak aby uzyskać zgodność wymiarów z obu stron wzoru) oraz z faktu, że wytrzymałość charakterystyczna określana jest na podstawie wartości średnich cegły i zaprawy. Kraje członkowskie mogą w zgodzie z EC6 określać własne wartości współczynników doświadczalnych. W poprzedniej normie polskiej PN99 [3] przyjęto współczynniki doświadczalne równe: $\alpha = 0,65$, $\beta = 0,25$ oraz K w zależności grupy elementów murowych ($K = 0,5$ dla grupy 1). W aktualnej normie PN07 [4] przyjęto wzór w postaci:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,35} \quad (2)$$

gdzie analogiczny współczynnik $K = 0,45$.

Występujące we wzorze wytrzymałości składowe są tzw. wytrzymałościami znormalizowanymi, tzn. sposób ich wyznaczania jest ściśle określony w odpowiednich normach. Oznacza to, że występujące w normach PN99 i PN07 wytrzymałości na ściskanie elementów murowych f_b i zaprawy f_m wyznaczone na podstawie takich samych materiałów będą inne, bo różny jest sposób ich określania. Tym niemniej do wyznaczenia charakterystycznej wytrzymałości muru na ściskanie konieczne są średnie wytrzymałości cegły i zaprawy, a przeliczanie wytrzymałości z odmiennych elementów próbnych na znormalizowane wykonuje się na ogół za pomocą odpowiednich współczynników korekcyjnych.

2.1. Wytrzymałość cegły na ściskanie

Badania wytrzymałości cegły i zaprawy na ściskanie przeprowadzono pod koniec 2008 roku. Na rysunku 2 pokazano sposób badania, elementy próbne

2. Compressive strength of wall

Compressive strength of the wall is determined in practice on the basis of formulas of functions of the compressive strength of masonry units f_b and mortar f_m . Various formulas have been proposed, a part of which has been discussed in the monograph [1]. In the European standard EC6 [2] basic meaning has the exponential formula in the form:

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (1)$$

wherein: f_k – characteristic compressive strength of the wall,
 f_b, f_m – average strengths defined according to standards,
 K, α, β – experimental coefficients.

This formula was determined on the basis of the results of extensive experimental investigations. Basic objections to the formula result from the units of the constant K (in MPa raised to suitable power so to get consistence of units on both sides of the formula), and from the fact, that characteristic strength is defined on the basis of average values for brick and mortar. EU member countries may in accordance with EC6 define their own values of experimental coefficients. In the previous Polish standard PN99 [3] experimental coefficients were accepted as: $\alpha = 0.65$, $\beta = 0.25$ and K in dependence on the group of masonry elements ($K = 0.5$ for group 1). In the current standard PN07 [4] the formula has been accepted in the form:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,35} \quad (2)$$

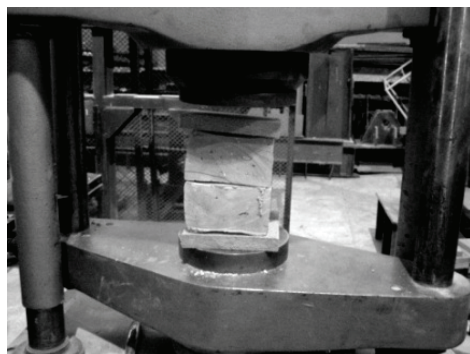
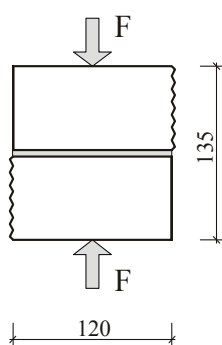
where analogical coefficient $K = 0.45$.

The component strengths which appear in the formula are so-called standardized strengths, i.e. their way of determination is strictly defined in relevant standards. This means that compressive strengths f_b for masonry elements and f_m for mortar, which appear in the standards PN99 and PN07, determined on the basis of the same materials will be different from one another, because the way of their defining is different. Nevertheless in order to determine the characteristic compressive strength of the wall it is necessary to have average strengths of brick and mortar, and recalculating of compressive strength from different testing elements to standardized one is generally done with the use of relevant corrective coefficients.

2.1. Compressive strength of brick

Investigation of the compressive strength of brick and mortar was conducted at the end of 2008. The way of investigation, testing elements according to

na podstawie norm [5, 6] oraz zamieszczono wyniki badania. Współczynnik kształtu, umożliwiający przeliczenie według normy otrzymanej wytrzymałości na znormalizowaną wytrzymałość kostki sześcienniej o boku 0,10 m, wynosi $\delta_b = 1,14$. Cegły, o nominalnych wymiarach wynoszących 250×120×65 mm, pobrano losowo ze ścian wewnętrznych grubości 0,12 m różnych kondygnacji, wymurowanych na zaprawie wapienno-piaskowej.



Parametr <i>Parameter</i>	Wartość <i>Value</i>
średnia <i>average</i>	12,54 MPa
odchylenie standardowe <i>standard deviation</i>	3,19 MPa
współczynnik zmienności <i>coefficient of variation</i>	0,254
liczba elementów próbnych <i>number of specimens</i>	50

Rys. 2. Badanie wytrzymałości cegły na ściskanie [mm]
Fig. 2. Compression test of a brick [mm]

Otrzymana średnia dokładnie odpowiada wartości wytrzymałości cegły na ściskanie zalecanej w podręczniku [7], w którym na podstawie badań 843 cegieł ceramicznych 55 rodzajów podano wartość średnią wynoszącą 12,2 MPa (124 kG/cm²).

Dość duża liczba elementów próbnych pozwoliła na dobranie odpowiedniej funkcji rozkładu prawdopodobieństwa. Rysunek 3 przedstawia histogram oraz dwa rozkłady dwuparametrowe: normalny i log-normalny. Przyjęto rozkład logarytmiczno-normalny, dokonując estymacji parametrów metodą momentów według wzorów zamieszczonych w monografii [8]. Na podstawie oszacowanych parametrów rozkładu zmiennej losowej f_b – wytrzymałości cegły na ściskanie – otrzymano następujące wartości wytrzymałości średniej μ_{f_b} i odchylenia standardowego σ_{f_b} oraz wytrzymałości charakterystycznej $f_{b,k}$ określonej z 95% prawdopodobieństwem:

$$\mu_{f_b} = 12,15 \text{ MPa}, \quad \sigma_{f_b} = 3,12 \text{ MPa}, \quad \ln f_{b,k} = \mu_{\ln f_b} - 1,645 \sigma_{\ln f_b}, \quad f_{b,k} = 8,17 \text{ MPa} \quad (3)$$

Należy podkreślić, że dobranie odpowiedniej funkcji rozkładu prawdopodobieństwa jest oddzielnym zadaniem badawczym, które wymaga odpowiednich testów zgodności przeprowadzanych na ogół w dwóch etapach: stawiania hipotezy na podstawie zebranego materiału, a następnie jej weryfikacji w oddzielnym teście wykorzystującym nowy, niezależny materiał statystyczny.

Statystyczną ocenę wytrzymałości cegły zamieszczono w pracy [9] na podstawie wyników badań

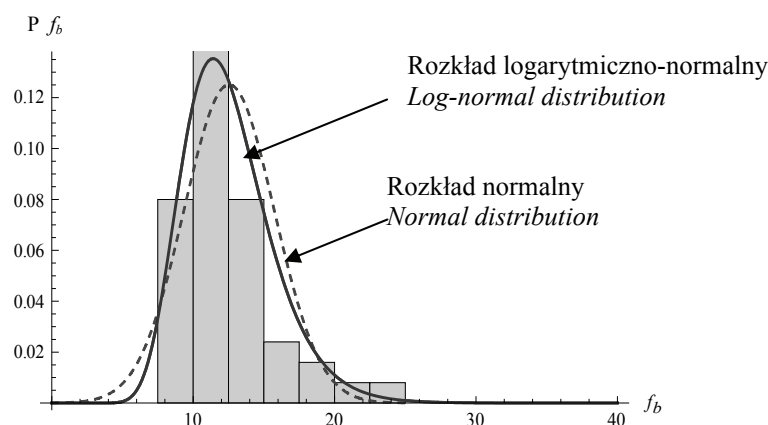
standards [5, 6] and the results of investigation have been shown in drawing 2. The shape coefficient, enabling recalculation of obtained compressive strength according to the standard to the standardized compressive strength of the cubic brick of the side length 0.10 m, is $\delta_b = 1.14$. The bricks, of nominal dimensions, which are 250×120×65 mm, have been taken at random from the internal walls of thickness 0.12 m on various storeys, built from bricks on lime-sand mortar.

The obtained average exactly corresponds to the value of compressive strength of the brick recommended in the textbook [7], wherein on the basis of testing 843 ceramic bricks of 55 kinds the average value was given as 12.2 MPa (124 kG/cm²).

Quite large number of test elements allowed to choose a suitable function of probability distribution. Drawing 3 presents a histogram and two two-parameter distributions: normal and log-normal. The logarithmic-normal distribution was accepted and the estimation of parameters was made by the method of moments, according to formulas put in the monograph [8]. On the basis of the estimated parameters of distribution of the random variable f_b – the compressive strength of the brick, the following values were obtained for the average compressive strength μ_{f_b} and standard deviation σ_{f_b} and characteristic compressive strength $f_{b,k}$ determined with 95% probability:

It should be pointed out that choosing a suitable function of probability distribution makes up a separate research task which requires suitable tests of compatibility, generally carried out in two stages: of putting a hypothesis on the basis of the gathered material, and then verification thereof in separate test using new independent statistical material.

The statistical assessment of the compressive strength of brick was put in the work [9] on the basis



Rys. 3. Histogram wytrzymałości cegły oraz funkcja gęstości prawdopodobieństwa
 Fig. 3. Histogram of brick compression test and the probability density function

zebranych z laboratoriów budowlanych Moskwy i obwodu moskiewskiego w latach 1980-85. Na podstawie testów zgodności weryfikowano rozkłady prawdopodobieństwa wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie różnych rodzajów cegieł. Dla obu wytrzymałości otrzymano rozkłady o wyraźnej lewostronnej asymetrii, przy czym liczba elementów próbnych w przypadku zwykłej cegły ceramicznej marki M100 wynosiła ponad 1900. Cechą charakterystyczną analizowanych wyników badań był współczynnik zmienności w granicach 30-40 %. Z analizy otrzymano wniosek, że wraz ze zmniejszaniem marki cegły lewostronna asymetria wyraźnie się zwiększa.

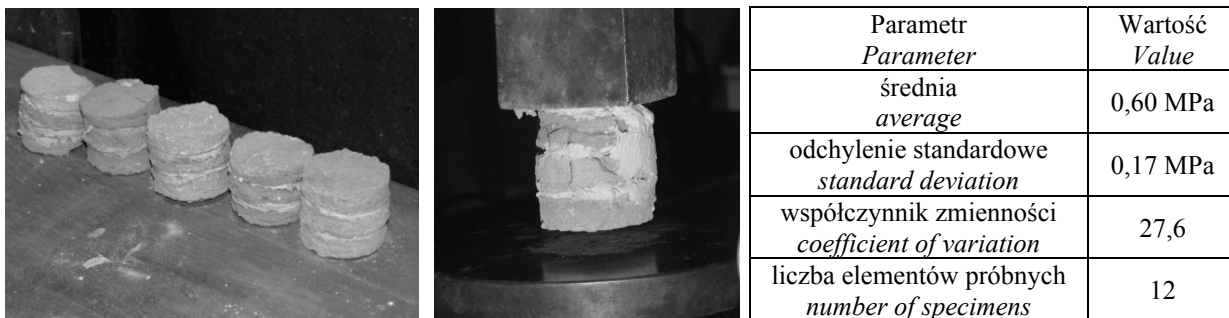
2.2. Wytrzymałość zaprawy na ściskanie

Na ogół pobieranie próbek z istniejących murów stanowi duży problem techniczny. W przypadku zaprawy często wykonuje się jej replikę na podstawie szczegółowej analizy chemicznej ustalającej skład i proporcje poszczególnych składników. Możliwe jest wtedy wykonanie badań wytrzymałościowych repliki lub określenie wytrzymałości na podstawie podstawowych składników. Norma EC6 podaje standardowe wartości średniej wytrzymałości zaprawy na ściskanie w zależności od jej składu. W badaniach własnych autorzy zdecydowali jednak się na pobranie stwardniałej zaprawy z istniejącego muru i wykonanie z niej elementów próbnych. Fragmenty zaprawy pobierano losowo ze ścian wewnętrznych całego budynku. Z uwagi na małą przyczepność zaprawy do cegły możliwe było wyizolowanie dość dużych fragmentów. Następnie z fragmentów wycięto krążki o średnicy 50 mm, a z nich wykonano za pomocą szybkowiążącej zaprawy elementy próbne w postaci walca składającego się z trzech krążków. Na rysunku 4 pokazano przykładowe walce przed i w trakcie badania na ściskanie oraz zamieszczono wyniki badania. Współczynnik zmienności wynosi 27,6%,

of the results of investigations gathered from the building laboratories of Moscow and Moscow district in years 1980-85. On the basis of tests of compatibility the probability distributions of compressive strength and tensile strength were verified for various kinds of bricks. For both types of strength the obtained distribution was with distinct left-sided asymmetry, wherein the number of test units was over 1900 in the case of usual ceramic brick of brand M100. The characteristic feature of the analyzed results of investigations was coefficient of variation which was in the range 30-40 %. The conclusion was received from the analysis that the left-sided asymmetry distinctly increases with the brand of brick going worse.

2.2. Compressive strength of mortar

Generally taking samples from the existing walls makes up a great technical problem. In the case of mortar it is often executed by making a replica of the mortar on the basis of detailed chemical analysis establishing the composition and proportions of individual components. Then it is possible to carry out strength investigations of the replica or determination of compressive strength on the basis of basic components thereof. The standard EC6 gives the standard values of the average compressive strength of mortar depending on the composition. However, authors in their own investigations decided to take out set mortar from the existing wall and making test elements from it. The fragments of mortar were taken from the internal walls of the whole building at random. Due to low adhesiveness of mortar to brick it was possible to isolate quite large fragments. Then test discs of 50 mm in diameter were cut out from these fragments, and test elements in the form of cylinders consisting of three discs were made from them with the help of quick-setting mortar. Drawing 4 shows examples of cylinders before and during the compression tests together with the results of investigation. The coefficient of variation was 27.6%,



Rys. 4. Badanie wytrzymałości zaprawy na ściskanie
Fig.4. Compression test of a mortar

co jak na tego typu badania jest wartością w pełni akceptowalną. Wartość średnia z próby wynosi 0,60 MPa i nie spełnia wymagań obecnych norm projektowych. Należy podkreślić, że sposób badania również nie jest zgodny z obecną normą PN-EN01 [10], według której odpowiednio przechowywane elementy próbne mają kształt prostopadłościanu o wymiarach 40×40×160 mm. Zatem skorzystanie z wyznaczonej w ten sposób wytrzymałości zaprawy na ściskanie wymaga przeliczenia do wartości normowej.

Traktując wytrzymałość zaprawy na ściskanie f_m jako zmienną losową o rozkładzie log-normalnym, analogicznie jak w przypadku cegły, otrzymujemy następujące wartości wytrzymałości średniej, odchylenia standardowego i wytrzymałości charakterystycznej:

$$\mu_{f_m} = 0,58 \text{ MPa}, \quad \sigma_{f_m} = 0,17 \text{ MPa}, \quad f_{m,k} = 0,35 \text{ MPa} \quad (4)$$

W pracy [9] zamieszczono również statystyczną ocenę wytrzymałości zapraw na podstawie wyników badań z tego samego okresu i obszaru. Otrzymano wniosek, że rozkłady wytrzymałości zaprawy na ściskanie nie są normalne. Jednak z uwagi na to, że wpływ wytrzymałości zaprawy na wytrzymałość muru jest mniejszy niż cegły, a także z uwagi na fakt, że kontrola jej produkcji jest łatwiejsza na podstawie analizy statystycznej w zakresie dwóch pierwszych momentów niż czterech, zalecono przyjmowanie rozkładów normalnych.

2.3. Wytrzymałość muru jako zmienna losowa

Zgodnie z metodą częściowych współczynników bezpieczeństwa do obliczeń konstrukcji miarodajna jest wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie f_k , tj. określona z 95% prawdopodobieństwem, że wytrzymałość przewyższy wartość f_k . Jednak według wzorów normowych wytrzymałość f_k jest wyznaczana jako funkcja średnich wytrzymałości elementów składowych, czyli jako funkcja

which for this type of investigation is a completely acceptable value. The average value from the test was 0.60 MPa and does not fulfill the requirements of the present designing standards. One should point out that the way of investigation is also not in accordance with the present standard PN-EN01 [10], according to which suitably kept test elements have the shape of cuboid of dimensions 40×40×160 mm. Therefore using of so determined compressive strength of mortar requires the recalculation to the normative value.

Treating compressive strength of mortar f_m as a random variable of log-normal distribution, similarly as in the case of the brick, we obtain the following values of average compressive strength, standard deviation and characteristic strength:

The statistical assessment of the compressive strength of mortars on the basis of the results of investigations from the same period and area has also been included in the work [9]. The conclusion was drawn that the distributions of compressive strength of mortar were not normal. However, due to the fact that the influence of compressive strength of mortar on compressive strength of the wall is lower than that of the brick, and also keeping in mind the fact that on the basis of statistical analysis the control of mortar production is easier in the range of two first moments than of four, it is recommended to accept normal distributions.

2.3. Compressive strength of the wall as a random variable

According to the method of using partial coefficients of safety, the characteristic compressive strength of the wall f_k , i.e. the value determined with 95% probability that compressive strength will exceed the value f_k is reliable for the calculations of the construction. However, according to the normative formulas, compressive strength f_k is determined as a function of average strengths of component elements, that is as

wielkości deterministycznych. Wynika to z faktu, że dotychczas nie ustalono w jakiej mierze rozrzuty wytrzymałości składowych wpływają na rozrzuty wytrzymałości muru. Zatem zgodnie z normowym wzorem (2) wytrzymałość charakterystyczna badanych murów wynosi:

$$f_k = 0,45 \cdot (1,14 \cdot 12,15)^{0,7} \cdot (1,35 \cdot 0,58)^{0,35} = 2,60 \text{ MPa} \quad (5)$$

W powyższym wzorze, poza współczynnikiem kształtu $\delta_b=1,14$, wykorzystano współczynnik $\delta_m=1,35$ według którego przeliczono wytrzymałość zaprawy z próbek walcowych na próbki normowe.

Normowy wzór potęgowy można potraktować jako postać funkcji określającej sposób przyporządkowania zmiennej losowej f_M – wytrzymałości muru na ściskanie – dwóch zmiennych losowych: f_b i f_m – wytrzymałości na ściskanie cegieł i zaprawy. Takie ujęcie wykorzystano w pracy [11]. Wtedy rozpatrywane jest zadanie określenia parametrów rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej, która jest funkcją dwóch zmiennych losowych o znanych rozkładach. W przypadku funkcji określonej wzorem potęgowym i logarymiczno-normalnych rozkładach każdej ze zmiennych składowych oraz przy założeniu, że obie zmienne składowe są niezależne, poszukiwany rozkład jest również logarymiczno-normalny o parametrach wyznaczanych następująco. Logarytmując obie strony równania (2), przekształcamy je do postaci:

$$\ln(f_M) = \ln(f_k) = \ln(K) + 0,7 \cdot \ln(\delta_b) + 0,7 \cdot \ln(f_b) + 0,35 \cdot \ln(\delta_m) + 0,35 \cdot \ln(f_m) \quad (6)$$

w której zmienna losowa $\ln(f_M)$ jest kombinacją liniową zmiennych losowych $\ln(f_b)$ i $\ln(f_m)$. Wartość średnia i odchylenie standardowe zmiennej $\ln(f_M)$ można zapisać za pomocą wartości średnich i odchyłeń standardowych zmiennych $\ln(f_b)$ i $\ln(f_m)$ w postaci:

$$\begin{aligned} \mu_{\ln f_M} &= \ln(K) + 0,7 \cdot \ln(\delta_b) + 0,7 \cdot \ln \theta_{f_b} + 0,35 \cdot \ln(\delta_m) + 0,35 \cdot \ln \theta_{f_m} \\ \sigma_{\ln f_M}^2 &= (0,7 \sigma_{\ln f_b})^2 + (0,35 \sigma_{\ln f_m})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Na ich podstawie można wyznaczyć wartość średnią, odchylenie standardowe oraz wartość charakterystyczną zmiennej losowej f_M . Otrzymano następujące wartości:

$$\mu_{f_M} = 3,14 \text{ MPa} \quad \sigma_{f_M} = 2,22 \text{ MPa} \quad f_{M,k} = 1,80 \text{ MPa} \quad (8)$$

Otrzymana charakterystyczna wartość wytrzymałości muru $f_{M,k}$ jest mniejsza niż to wynika ze wzoru normowego (5) o 30%. Oczywiście miarodajną do obliczeń jest wytrzymałość charakterystyczna f_k , której wartość obliczeniową uzyskuje

a function of deterministic magnitudes. This results from the fact that so far it has not been established in what measure the distribution of component strengths influences on the distribution of the compressive strength of the wall. Therefore according to the normative formula (2) the characteristic strength of studied walls is:

In the above mentioned formula, in addition to the shape coefficient $\delta_b = 1.14$, the coefficient $\delta_m = 1.35$ was used, according to which the compressive strength of mortar was recalculated from cylindrical samples onto normative samples.

One can treat the normative exponential formula as the form of function defining the way of attributing two random variables: f_b and f_m – compressive strength of the bricks and the mortar to random variable f_M – compressive strength of the wall. Such formulation was used in the work [11]. Then the task is being considered to determine the parameters of probability distribution of random variable, which is a function of two random variables of well-known distributions. In the case of a function defined by an exponential formula and logarithmic-normal distribution of each component variable and taking assumption that both component variables are independent, the demanded distribution is also logarithmic-normal, with parameters determined as follows. By finding the logarithms of both sides of equation (2), we transform them to the form:

wherein the random variable $\ln(f_M)$ is a linear combination of random variables $\ln(f_b)$ and $\ln(f_m)$. The average value and standard deviation of the variable $\ln(f_M)$ can be put down with the help of the average values and standard deviations of the variables $\ln(f_b)$ and $\ln(f_m)$ in the form:

On the basis of these one can determine the average value, the standard deviation and the characteristic value of the random variable f_M . The following values were obtained:

Thus obtained characteristic value of the compressive strength of the wall $f_{M,k}$ is smaller than it results from the normative formula (5), by about 30%. Of course, the characteristic strength f_k , whose calculated value is obtained after dividing it by the

się po jej podzieleniu przez współczynnik materiałowy γ_m . Funkcja gęstości prawdopodobieństwa wyznaczona na podstawie wzorów (6) i (7) może być wykorzystywana w teoretycznej analizie niezawodności konstrukcji, por. [12].

Otrzymana charakterystyczna wartość wytrzymałości muru $f_{M,k}$ jest mniejsza niż to wynika ze wzoru normowego (5) o 30%. Oczywiście miarodajną do obliczeń jest wytrzymałość charakterystyczna f_k , której wartość obliczeniową uzyskuje się po jej podzieleniu przez współczynnik materiałowy γ_m . Funkcja gęstości prawdopodobieństwa wyznaczona na podstawie wzorów (6) i (7) może być wykorzystywana w teoretycznej analizie niezawodności konstrukcji, por. [12].

3. Podsumowanie

W pracy omówiono sposób określenia wytrzymałości muru na ściskanie na podstawie potęgowego wzoru normowego oraz laboratoryjnych badań cegły i zaprawy. Cegły i zaprawę pobrano ze ścian nośnych kamienic secesyjnych w centrum Szczecina. W analizie statystycznej wykorzystano logarytmiczno-normalne rozkłady prawdopodobieństwa. Pokazano, że na podstawie rozkładów dla cegły i zaprawy możliwe jest określenie rozkładu dla muru.

Podziękowania

Niniejsza publikacja w zakresie udziału autorów z Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego jest finansowana ze środków na naukę MNiSzW w latach 2008-2011 jako projekt badawczy własny nr N N506 396435.

material coefficient γ_m , is obviously reliable for the calculations. The function of probability density as determined on the basis of formulas (6) and (7) may be used in the theoretical analysis of reliability of the construction, cf. [12].

Thus obtained characteristic value of the compressive strength of the wall $f_{M,k}$ is smaller than it results from the normative formula (5), by about 30%. Of course, the characteristic strength f_k , whose calculated value is obtained after dividing it by the material coefficient γ_m , is obviously reliable for the calculations. The function of probability density as determined on the basis of formulas (6) and (7) may be used in the theoretical analysis of reliability of the construction, cf. [12].

3. Summary

In the study the way of determination of the compressive strength of wall on the basis of the exponential – normative formula and the laboratory investigations of brick and mortar has been discussed. Bricks and mortar were taken from the walls of load-bearing walls of the arts-nouveau tenement houses in the centre of Stettin. The statistical analysis was carried out with the use of logarithmic-normal distributions of probability. It was shown that on the basis of such distributions for brick and for mortar it is possible to determine the distribution for the wall.

Acknowledgements

Present publication in the scope of participation of the authors from The University of Warmia and Mazury has been financed from the means of MNiSzW designated for scientific research in years 2008-2011 as the own research – investigative project No. N N506 396435.

Literatura • References

- [1] Lewicki B., Jarmontowicz R., Kubica J., *Podstawy projektowania niezbrojonych konstrukcji murowych*, Wydawnictwa ITB, Warszawa 2001.
- [2] ENV 1996-1-1:1994 Eurokod 6, *Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne. Reguły dla murów niezbrojonych, zbrojonych i sprężonych*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1995.
- [3] PN-B 03002:1999, *Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie*.
- [4] PN-B 03002:2007, *Konstrukcje murowe. Projektowanie i obliczanie*.
- [5] PN-70/B-12016, *Wyroby ceramiki budowlanej. Badania techniczne*.
- [6] PN-EN 772-1:2001, *Metody badań elementów murowych. Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie*.
- [7] Klasen L., *Wohn- und Geschäftshausern*, Leipzig 1884. Dolnośląska Biblioteka Cyfrowa.
- [8] Murzewski J., *Niezawodność konstrukcji inżynierskich*, Arkady, Warszawa 1989.
- [9] Rajzer V.D., *Raszchet i normirovanije nadežnosti stroitelych konstrukcji*, Stroizdat 1995.

- [10] PN-EN 1015-11:2001, *Metody badań zapraw do murów. Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy.*
- [11] Schueremans L., Van Gemert D., *Probability density functions for masonry material parameters – a way to go?*, Proc. 5th Int.Conf. SAHC, New Delhi, 2006, s. 921-928.
- [12] Małyszko L., Bilko P., *Ocena wytrzymałości muru z uwzględnieniem teorii niezawodności konstrukcji*, Inżynieria i Budownictwo, Zeszyt 12, Warszawa 2009.

* Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn, Polska
University of Warmia and Mazury, Olsztyn, Poland

** Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland

Streszczenie

W artykule przedstawiono właściwy sposób szacowania wytrzymałości na ściskanie niezbrojonego muru ceglanego w oparciu o zmierzoną wytrzymałość na ściskanie cegły i zaprawy murarskiej. Specjalną uwagę zwrócono na numeryczne zależności wykładnicze przedstawione w Polskiej Normie PN07, które są podobne do wzoru EC6. Ponadto, wyliczenie wytrzymałości charakterystycznej jest również przeprowadzone, przy założeniu że siła ściskająca mur jest losową zmienną funkcjonalnie zależną od dwu zmiennych losowych – wytrzymałości na ściskanie cegły i zaprawy murarskiej – ze znanym logarytmiczno normalnym rozkładem prawdopodobieństwa. Metodologia jest zilustrowana na przykładzie wytrzymałości na ściskanie muru historycznego budynku.

Abstract

Based on the measured compressive strengths of brick and mortar, proper estimating of the compressive strength of non-reinforced brick wall has been reported in this paper. Special attention is paid to the numerical exponential relation provided by the Polish Standard PN07 which is similar to the EC6 formula. In addition, the characteristic strength is also calculated assuming that compressive strength of masonry is functionally dependent in a random variably way on two random variables – brick and mortar compressive strengths – with known log-normal probability distributions. The methodology is illustrated on a case covering the compressive strength of a historical masonry building.