

Stosowanie metod uproszczonych przy wymiarowaniu wg EC6 a bezpieczeństwo konstrukcji murowych

Wojciech Chrusciel¹, Paweł Sulik²

¹ Zakład Konstrukcji i Elementów Budowlanych, Instytut Techniki Budowlanej,
e-mail: w.chrusciel@itb.pl

² Zakład Konstrukcji i Elementów Budowlanych, Instytut Techniki Budowlanej,
e-mail: p.sulik@itb.pl

Streszczenie: Opracowanie opisuje metodę obliczeń ścian murowanych obciążonych głównie pionowo według norm PN-EN 1996-1-1 oraz PN-EN 1996-3. Podana została metodyka obliczeń oraz wskazano różnice pomiędzy EC 6 oraz dotychczasową polską normą. Omówiono rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń wg metod opisanych w EC 6. Wskazano miejsca, które powodują rozbieżności w metodach obliczeń.

Słowa kluczowe: konstrukcje murowe, Eurokod 6, nośność, wyężenie, ściskanie.

1. Wprowadzenie

Stosowanie Eurokodów do projektowania jest nieuniknione. Oznacza to, że w miejsce dotychczas stosowanej normy PN-B 03002:2007 [5] wprowadzono zestaw Eurokodów z serii PN-EN 1996, w którego skład wchodzi m.in. PN-EN 1996-1-1 [1]; PN-EN 1996-1-2 [2]; PN-EN 1996-2 [3] i PN-EN 1996-3 [4].

Norma [5], jest normą pomostową, czyli dokumentem opartym na normie PN-EN pozwalającym projektantowi w sposób przyjazny na przejście z projektowania według dotychczasowych norm na nowe. Pomimo wielu podobieństw występują również różnice w tych dokumentach np. model przegubowy i ciągły dla ścian murowanych zastąpiono modelem ramowym, który z drobnymi różnicami odpowiada modelowi ciągłemu z normy PN-B.

Norma PN-EN 1996 składa się z czterech części:

Część 1-1: Reguły ogólne – Reguły dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.

Część 1-2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.

Część 2: Wymagania projektowe, dobór materiałów i wykonanie konstrukcji murowych.

Część 3: Uproszczone metody obliczania murowych konstrukcji niezbrojonych.

W referacie przedstawiono podstawowe różnice przy obliczaniu ścian obciążonych głównie pionowo według normy [1] oraz [4] i wynikające z nich konsekwencje.

2. Wymiarowanie ścian obciążonych głównie pionowo wg PN-EN 1996-1-1

Warunkiem zapewnienia bezpiecznego użytkowania konstrukcji oraz jej nośności jest spełnienie normowego warunku:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (1)$$

gdzie: N_{Ed} – siły pionowe działające na ścianę; N_{Rd} – nośność obliczeniowa ściany

Norma [1] definiuje powyższe parametry w następujący sposób:

$$N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_d \quad (2)$$

gdzie: Φ – współczynnik redukcyjny nośności, odpowiednio, Φ_1 u góry i u dołu ściany lub Φ_m w środku ściany, uwzględniający wpływ smukłości i mimośród obciążenia, określony wg pkt. 6.1.2.2 normy [1];

$$\Phi_i = 1 - 2 \frac{e_i}{t} \quad (3)$$

gdzie: e_i – mimośród u dołu lub u góry ściany (w zależności od sprawdzanego przekroju) uwzględniający moment zginający od obciążeń ze stropu oraz mimośrod y niezamierzone i wywołane działaniem wiatru; t – grubość ściany; f_d – wytrzymałość obliczeniowa muru na ściskanie.

Gdy pole przekroju poprzecznego ściany jest mniejsze niż $0,3 \text{ m}^2$, wytrzymałość obliczeniową muru na ściskanie f_d należy podzielić przez współczynnik γ_{Rd} , który podany jest w Załączniku krajowym do normy (tabela 1).

Tabela 1. Wartość współczynnika γ_{Rd}

Pole przekroju poprzecznego muru [m ²]	≤ 0,04	0,10	0,20	≥ 0,30
γ_{Rd}	2,00	1,37	1,25	1,00

Uwaga: Dla wartości pośrednich pola przekroju muru, wartości γ_{Rd} można interpolować liniowo.

Dodatkowo należy pamiętać, że zastosowanie współczynnika γ_{Rd} zastępuje wymaganie opisane poniższym wzorem podane w EC6 w rozdziale 6.1.2.1:

$$(0,7 + 0,3A) \quad (4)$$

gdzie: A – obciążone pole przekroju poprzecznego ściany wyrażone w m².

W przypadku określania współczynnika redukcyjnego dla przekroju środkowego norma PN-EN 1996-1-1 zezwala na dwie metody obliczeń. Według pierwszej metody zamiast mimośrodu e_i do wzoru na Φ_m stosuje się mimośród e_m . Druga metoda opisuje obliczanie współczynnika redukcyjnego z uwzględnieniem smukłości ściany oraz modułu sprężystości.

Zgodnie z drugą metodą otrzymuje się:

$$\Phi_m = A_1 e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (5)$$

gdzie:

$$A_1 = 1 - 2 \frac{e_{mk}}{t} \quad (6)$$

$$u = \frac{\lambda - 0,063}{0,73 - 1,17 \frac{e_{mk}}{t}} \quad (7)$$

gdzie:

$$\lambda = \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \sqrt{\frac{f_k}{E}} \quad (8)$$

e_{mk} – mimośród w połowie wysokości ściany określony wzorem:

$$e_{mk} = e_m + e_k \geq 0,05 \cdot t \quad (9)$$

gdzie: e_m – mimośród działania obciążenia wg poniższego wzoru uwzględniający moment zginający od obciążeń ze stropu oraz mimośrod y niezamierzone i wywołane działaniem wiatru; e_k – mimośród wywołany pełzaniem określany wzorem:

$$e_k = 0,002 \phi_\infty \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \sqrt{t e_m} \quad (10)$$

gdzie: ϕ_∞ – końcowy współczynnik pełzania, który można dobrać z tablicy w pkt. 3.7.4. normy [1], h_{ef} – wysokość efektywna przekroju obliczana wg pkt. 5.5.1.2 normy [1]:

$$h_{ef} = \rho_n h \quad (11)$$

gdzie: h – wysokość kondygnacji w świetle; ρ_n – współczynnik redukcji; gdzie $n = 2, 3$ lub 4 , w zależności od utwierdzenia krawędzi lub usztywnienia ściany; t_{ef} – grubość efektywna przekroju obliczana wg pkt. 5.5.1.3. normy [1].

$$t_{ef} = \rho_t t \quad (12)$$

gdzie: ρ_t – współczynnik sztywności dla ścian usztywnionych pilastrami przyjmowany wg tablicy 5.1. normy [1]; t – grubość ściany.

2.1. Określenie wartości momentów zginających

Określenie wartości momentów M_{1d} i M_{2d} , odpowiednio na górnej i dolnej krawędzi ściany wymaga od projektanta rozwiązania całego układu ramowego, w którym połączenie ściana - strop jest sprężyste. Największą trudnością w tej procedurze jest właściwe określenie podatności takiego połączenia (ściana - strop).

Norma [1] pozwala na określenie momentów zginających w sposób uproszczony, korzystając z Załącznika C.

Metoda podana w Załączniku C polega na wydzieleniu z całego układu ramowego płyt stropowych i założeniu, że są to pojedyncze pręty o schemacie belki jednostronnie lub obustronnie zamocowanej. Ze względu na złożoność metody obliczania momentów nie będzie ona zamieszczana. Tok postępowania przedstawiony w normie [1] lub literaturze np. [6] jest podobny do metodologii stosowanej w dotychczasowej normie [5]. Należy zwrócić szczególną uwagę na współczynniki n_i , których wartość zależy od sztywności prętów i jest równa 4 dla prętów utwierdzonych na obydwu końcach oraz 3 w przypadku utwierdzenia tylko na jednym końcu. W normie [5] tych współczynników nie było, natomiast momenty zginające od działania obciążeń równomiernych na stropy mnożone było przez 0,85.

3. Wymiarowanie ścian obciążonych głównie pionowo wg PN-EN 1996-3

W normie PN-EN 1996-3 [4] podane są dwie metody obliczania ścian obciążonych pionowo. Pierwsza z nich wg pkt. 4.2. oraz druga wg Załącznika A.

Przy sprawdzaniu ściany na obciążenie pionowe wg normy [4] rozpatruje się tylko jeden przekrój. Nie rozróżnia się współczynników redukcyjnych pod stropem, nad stropem i w środku ściany. Rozróżnia się natomiast współczynniki redukcyjne zależne od typów ścian (końcowa, czy pośrednia podpora dla stropu) oraz w zależności, na której kondygnacji sprawdzany jest warunek nośności ściany. Uwzględnia się również współczynnik γ_{Rd} opisany powyżej.

3.1. Warunki stosowania metody uproszczonej wg pkt. 4.2.1.1. normy PN-EN 1996-3

Metodę uproszczoną opisaną w pkt. 4.2.1.1. normy PN-EN 1996-3 można stosować przy projektowaniu jeśli spełnione są warunki podane poniżej:

- Wysokość budynku powyżej poziomu terenu nie jest większa niż h_m
- Rozpiętość stropów opartych na ścianach nie jest większa niż 7,0m
- Rozpiętość dachów opartych na ścianach nie jest większa niż 7,0m
- Wysokość kondygnacji w świetle nie jest większa niż 3,2m
- Obciążenie charakterystyczne zmienne na stropie i dachu nie jest większe niż $5,0\text{kN/m}^2$
- Ściany usztywnione w kierunku poziomym za pomocą stropów i konstrukcji dachu usytuowanej pod kątem prostym do jej płaszczyzny, bądź też samych stropów i dachów lub w inny sposób, np. za pomocą wieńców o odpowiedniej sztywności
- Ściany na poszczególnych kondygnacjach znajdują się w jednej płaszczyźnie
- Stropy i dach opiera się na ścianie za pomocą wieńców o szerokości równej co najmniej 0,4t grubości ściany i nie mniej niż 75mm
- Końcowa wartość współczynnika pełzania dla muru ϕ_x jest nie większa niż 2,0

- Grubość ściany i wytrzymałość muru na ściskanie należy sprawdzić na każdej kondygnacji, chyba, że są takie same na wszystkich kondygnacjach.
- Według tej metody określanie nośności odbywa się według poniższych wzorów:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (13)$$

gdzie: N_{Ed} – obliczeniowa siła pionowa działająca na ścianę murową; N_{Rd} – obliczeniowa nośność na obciążenie pionowe, którą określa wzór:

$$N_{Rd} = \Phi_s f_d A \quad (14)$$

gdzie: Φ_s – współczynnik redukcyjny nośności uwzględniający wpływ smukłości oraz mimośrodu obciążenia określany wg zależności podanych poniżej; A – przekrój poprzeczny obciążanej ściany; f_d – wytrzymałość obliczeniowa muru na ściskanie.

Współczynnik redukcyjny w normie [4], jak już wcześniej wspomniano, zależy od położenia ściany:

- dla ścian wewnętrznych,
- dla ścian stanowiących końcowe podparcie stropu,
- dla ścian najwyższej kondygnacji stanowiących skrajną podpórę stropu lub dachu,
- dla ścian szczelinowych z liczbą kotew ściennych nie mniejszą niż 4 (*Załącznik krajowy do normy*); gdzie t_1 i t_2 są rzeczywistymi grubościami warstw, a moduł sprężystości warstwy nienośnej jest, co najmniej równy 90% modułu warstwy nośnej. $l_{f,ef}$ – rozpiętość efektywna stropu stanowiącego skrajną podpórę ściany, wyznaczana jest w zależności od schematu statycznego
- dla stropu swobodnie podpartego,
- dla stropu ciągłego,
- dla stropu swobodnie podpartego, rozpiętego w 2 kierunkach, gdzie długość podparcia rozpatrywanej ściany jest nie większa niż $2 l_f$,
- dla stropu ciągłego, rozpiętego w 2 kierunkach, gdzie długość podparcia rozpatrywanej ściany jest nie większa niż $2 l_f$.

3.2. Warunki stosowania metody uproszczonej wg Załącznika A normy PN-EN 1996-3

Metodę uproszczoną opisaną w Załączniku A normy PN-EN 1996-3 można stosować przy projektowaniu jeśli spełnione są warunki podane poniżej:

- Wysokość budynku nie przekracza 3 kondygnacji nadziemnych;
- ściany są usztywnione w kierunku poziomym na działanie obciążeń prostopadłych do swojej płaszczyzny za pomocą stropów i dachu, albo samych stropów i dachu lub w inny odpowiedni sposób, na przykład wieńców o odpowiedniej sztywności;
- stropy i dach opierają się na ścianie, na co najmniej 2/3 grubości ściany i nie mniej niż 85 mm
- wysokość kondygnacji w świetle nie przekracza 3,0 m
- minimalny wymiar ściany w rzucie wynosi, co najmniej 1/3 wysokości ściany
- obciążenie charakterystyczne zmienne na stropie i dachu nie przekracza 5,0 kN/m²
- maksymalna rozpiętość stropu w świetle wynosi 6,0 m
- maksymalna rozpiętość dachu w świetle wynosi 6,0 m, z wyjątkiem lekkich konstrukcji dachowych o rozpiętości nie przekraczającej 12,0 m
- współczynnik smukłości, h_{ef}/t_{ef} dla ścian wewnętrznych i zewnętrznych nie przekracza 21

Według tej metody określanie nośności odbywa się według poniższych wzorów:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (15)$$

gdzie: N_{Ed} – obliczeniowa siła pionowa działająca na ścianę murowaną; N_{Rd} – obliczeniowa nośność na obciążenie pionowe, którą określa wzór:

$$N_{Rd} = c_A f_d A \quad (16)$$

gdzie: c_A – wynosi 0,50 jeżeli $h_{ef}/t_{ef} \leq 18$ lub 0,36 jeżeli $18 < h_{ef}/t_{ef} \leq 21$; f_d – wytrzymałość obliczeniowa muru na ściskanie; A – przekrój poprzeczny obciążanej ściany z pominięciem wszystkich otworów.

Analizując powyższe założenia oraz wymagania łatwo można dostrzec, iż metoda opisana w Załączniku A jest bardziej restrykcyjna od podanej w punkcie 4.2.1.1, ale i łatwiejsza w użyciu w przypadku prostych, nieskomplikowanych konstrukcji.

4. Dodatkowe informacje

Sam algorytm postępowania, wg normy [1] lub [3] jest bardzo przyjazny i nieskomplikowany.

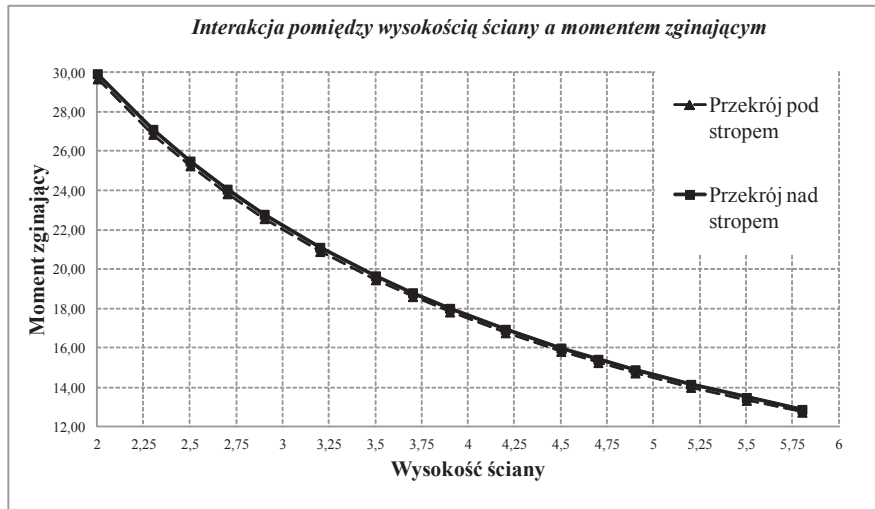
Jednakże, dodatkowym rozważaniem należy poddać kilka elementów algorytmu, na które należy zwrócić szczególną uwagę. Takimi elementami są: obliczenia momentów uproszczoną metodą wg Załącznika C do normy [1] oraz porównanie dokładnych i uproszczonych metod obliczeń.

Obliczenia momentów metodą uproszczoną wg Załącznika C normy [1] wykonuje się na podstawie wzorów w niej podanych lub literaturze np. [6]. Z powyższych zależności wynika, iż moment zginający jest zależny od sztywności, wysokości ściany i elementów do niej dochodzących.

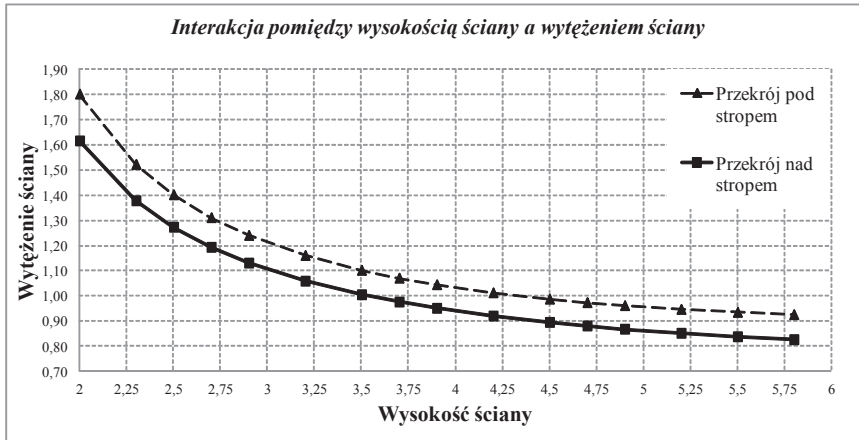
Załóżmy, że obliczamy filarek międzyokienny czterokondygnacyjnego budynku w poziomie parteru o szerokości 108cm oraz grubości 24cm wykonany z silikatowych elementów murowych wykonanych na zwykłej zaprawie. Wysokość ściany w świetle jest równa 2,70m, a stropy wykonane są jako monolityczne wylewane.

Po określeniu odpowiednich obciążeń oraz sprawdzeniu nośności okaże się, iż taki filarek nie spełnia warunków nośności. W tym momencie staramy się tak modyfikować parametry wytrzymałościowe, lub geometryczne, aby warunek nośności spełnić. W tym miejscu nasuwa się pytanie: *co by było gdyby ta ściana miała wysokość nie 2,70m, ale np. 4,5m lub więcej?*

Wówczas okaże się, że stan graniczny nośności dla takiego przekroju jest spełniony. Aby zobrazować powyższą tezę na rys. 1 i 2 przedstawione zostały dwa wykresy.



Rys. 1. Zależność pomiędzy wysokością ściany, a wartością momentu zginającego

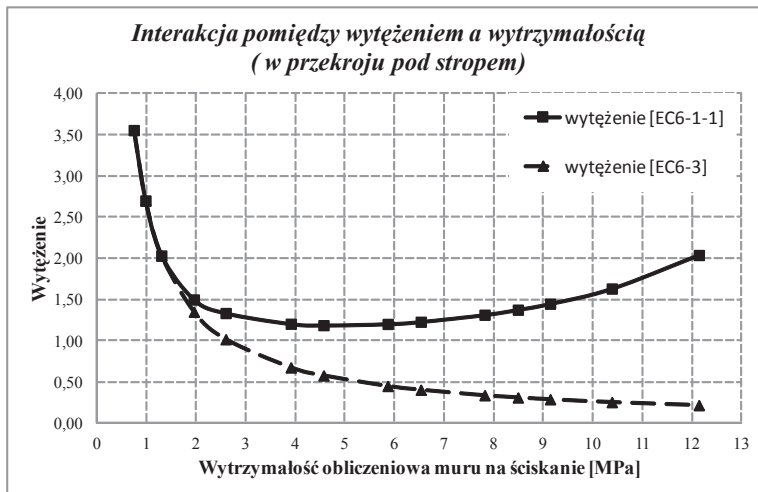


Rys. 2. Zależność pomiędzy wysokością ściany, a jej wyężeniem

Jak wynika z rys. 2 zwiększenie wysokości ściany (bez zwiększania szerokości oraz zmiany materiału) do 4,25m spowoduje wg normy spełnienie warunku nośności. Związane jest to z faktem, iż wraz ze wzrostem wysokości ściany momenty na połączeniach ściana – strop (M_{1d} i M_{2d}) są mniejsze, a co za tym idzie ściana pracuje jedynie na ściskanie. Model ramowy nie uwzględnia obciążenia poziomego do powierzchni ściany (np. wiatr), przez co moment zginający w środku rozpiętości ściany jest bardzo małej wartości. Sprawdzenie ściany na zginanie od obciążeń poziomych, (ale tylko do 250mm) może wykazać nie spełnienie warunku nośności.

Zakładając te same parametry geometryczne pokazane zostaną różnice w wymiarowaniu konstrukcji murowych wg [1] oraz [2] dla zmiennych parametrów wytrzymałościowych.

Przed wykonaniem porównania sprawdzono, którą z uproszczonych metod można zastosować. Ze względu na liczbę założonych kondygnacji ostatecznie przyjęto metodę określoną w punkcie 4.2.1.1., ponieważ Załącznik A dopuszcza maksymalnie 3 kondygnacje.



Rys. 3. Zależność pomiędzy wytrzymałością obliczeniową muru na ściskanie, a wyężeniem przekroju

Tabela 2. Dane wyjściowe oraz wyteżenia przekrojów

f_d [MPa]	E [MPa]	Sztywność [MNm ⁻¹]	Moment zginający [kNm]	Mimośród końcowy [m]	współczynnik redukcyjny [EC6-1-1]	współczynnik redukcyjny [EC6-3]	Nośność [kN] [EC6-1-1]	Siła [kN]	wyteżenie [EC6-1-1]	Nośność [kN] [EC6-3]	wyteżenie [EC6-3]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,74	1388	1,73	10,43	0,054	0,55	0,55	105,84	376	3,55	105,84	3,55
0,98	1828	2,27	12,86	0,054	0,55	0,55	139,33	376	2,70	139,33	2,70
1,30	2427	3,02	15,73	0,054	0,55	0,55	185,05	376	2,03	185,05	2,03
1,95	3655	4,55	20,40	0,061	0,50	0,55	250,88	376	1,50	278,65	1,35
2,60	4855	6,04	23,85	0,070	0,42	0,55	281,76	376	1,33	370,10	1,02
3,91	7310	9,10	28,84	0,083	0,31	0,55	312,14	376	1,20	557,30	0,67
4,57	8546	10,63	30,68	0,088	0,27	0,55	316,69	376	1,19	651,52	0,58
5,86	10965	13,64	33,46	0,095	0,21	0,55	312,68	376	1,20	835,95	0,45
6,53	12215	15,20	34,59	0,098	0,18	0,55	305,80	376	1,23	931,20	0,40
7,82	14621	18,19	36,37	0,103	0,14	0,55	286,16	376	1,31	1114,60	0,34
8,49	15877	19,75	37,13	0,105	0,12	0,55	273,33	376	1,38	1210,39	0,31
9,14	17092	21,27	37,79	0,107	0,11	0,55	259,62	376	1,45	1303,04	0,29
10,38	19419	24,16	38,87	0,110	0,09	0,55	230,48	376	1,63	1480,41	0,25
12,14	22702	28,24	40,09	0,113	0,06	0,55	184,50	376	2,04	1730,69	0,22

Można by przypuszczać, że zmiana parametrów wytrzymałościowych na wyższe powinna powodować zwiększenie nośności ściany. Nic bardziej mylnego. Na wykresie (rys. 3) przedstawiono zależność pomiędzy wyteżeniem przekroju, a wytrzymałością na ściskanie muru. Wyniki obliczeń porównano dla metod wcześniej opisanych.

Jak widać na rys. 3 zwiększanie parametrów wytrzymałościowych, zwiększa nośność tylko w przypadku metody uproszczonej. Zastosowanie tej samej zależności w normie [1] powoduje, tylko do pewnego momentu, spadek wyteżenia, po czym wyteżenie przekroju wzrasta. Niestety rozbieżności wynikające z obliczeń wg norm [4] oraz [1] są bardzo duże i dochodzą do około 90%. Dla ostatniego punktu na wykresie wyteżenie przekroju wg [1] wyniesie około 2,0 (przy dopuszczalnym poziomie równym 1,0), a dla tego samego materiału i przekroju wg [4] wyniesie 0,22 (przy dopuszczalnym poziomie równym 1,0).

Tak duże rozbieżności wynikają z metodologii obliczeń przyjętej w uproszczonym algorytmie wymiarowania. Główną przyczyną jest współczynnik redukcyjny, który bez względu na wytrzymałość materiału nie zmienia swojej wartości (kolumny 6 i 7), co przedstawia tabela 2.

Kolejnym problemem jest brak uwzględnienia oddziaływania momentów zginających, a tym samym mimośródów występujących w konstrukcji.

Należy zwrócić uwagę, iż w przypadku trzech pierwszych kombinacji elementów murowych z zaprawami wyniki w obu metodach są zgodne, co może jedynie utwierdzić, że norma [4] powinna mieć wprowadzone dodatkowe obostrzenia (obwarowania), ograniczenia w zastosowaniu.

5. Podsumowanie

Projektowanie konstrukcji murowych nie jest problematyczne, jednakże nie zawsze spójne co do otrzymanych wyników w zależności od przyjęcia algorytmu obliczeniowego. Według autorów projektowanie konstrukcji murowych powinno odbywać się jedynie w oparciu o normę PN-EN 1996-1-1. Rozbieżności wynikające z różnic w podejściu do problemu są zbyt duże, aby można było przejść obok nich bez zastanowienia.

Badania konstrukcji murowych w laboratorium Zakładu Konstrukcji i Elementów Budowlanych Instytutu Techniki Budowlanej również potwierdzają zależność wynikającą z normy PN-EN 1996-1-1 dotyczącą wzrostu wyteżenia przekroju podczas zwiększania parametrów wytrzymałościowych użytych materiałów.

Literatura

- 1 PN-EN 1996-1-1: Eurokod 6: Projektowanie konstrukcji murowych Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych
- 2 PN-EN 1996-1-2: Eurokod 6: Projektowanie konstrukcji murowych Część 1-2: Reguły ogólne Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe
- 3 PN-EN 1996-2 Eurokod 6: Projektowanie konstrukcji murowych Część 2: Uwarunkowania projektowe, dobór materiałów i wykonawstwo konstrukcji murowych
- 4 PN-EN 1996-3 Eurokod 6: Projektowanie konstrukcji murowych Część 3: Uproszczone metody obliczania niezbrojonych konstrukcji murowych
- 5 PN-B 03002:2007 Konstrukcje murowe - Projektowanie i obliczanie
- 6 Chruściel W., Sulik P., Projektowanie konstrukcji murowych niezbrojonych według Eurokodu 6. Przykłady obliczeń. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2012
- 7 Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Konstrukcje murowe według Eurokodu 6 i norm związanych, Wydawnictwo Naukowa PWN, Warszawa 2013

The use of simplified methods for designing according to EC6 and safety of masonry structures

Wojciech Chruściel¹, Paweł Sulik²

¹ *Building Structures Department, Building Research Institute, e-mail: w.chrusciel@itb.pl*

² *Building Structures Department, Building Research Institute, e-mail: p.sulik@itb.pl*

Abstract: The article describes the calculation method of masonry walls loaded vertically according to PN-EN 1996-1-1 and PN-EN 1996-3. The Calculation method is given and the differences between Eurocode 6 and "old Polish standard" are indicated. Additionally, the differences between calculations according to exact and simplified method described in Eurocode 6 that show adverse consequences of the use of simplified method. The places (formulas and assumptions), which causes the discrepancies in calculation methods are pointed out in the study.

Keywords: masonry structures, Eurocode 6, load capacity, effort, compression