

EUROKODY

praktyczne komentarze

Niniejszy skrypt to kolejne opracowanie w cyklu publikacji na temat podstaw projektowania konstrukcji budowlanych według aktualnie obowiązujących norm opartych na EUROKODACH. Każdy skrypt to teoria przedstawiona w przystępny sposób oraz przykłady, które prowadzą krok po kroku przez proces wymiarowania.

Skrypt 3

1. WPROWADZENIE	E02
2. MATERIAŁY	E02
2.1. Elementy murowe	E02
2.2. Zaprawa murarska	E03
3. CECHY WYTRZYMAŁOŚCIOWE I MECHANICZNE MURU	E03
3.1. Wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie	E03
3.2. Wytrzymałość charakterystyczna muru na ścinanie	E04
3.3. Wytrzymałość charakterystyczna muru na zginanie	E04
3.4. Moduł sprężystości muru	E05
3.5. Wytrzymałość obliczeniowa muru	E05
4. NOŚNOŚCI MURU W POSZCZEGÓLNYCH PRZYPADKACH WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH	E06
4.1. Nośność muru obciążonego głównie pionowo	E06
4.2. Nośność muru pod siłą skupioną	E08
4.3. Nośność muru na ścinanie	E09
4.4. Nośność ścian obciążonych prostopadle do swojej powierzchni	E09
4.5. Przesklepienie łukowe pomiędzy podporami	E10
5. UPROSZCZONE METODY OBLICZEŃ	E11
5.1. Ściana obciążona pionowo	E12
5.2. Ściana obciążona siłą skupioną	E13
5.3. Ściana ścinana	E13
5.4. Ściana piwnic obciążona parciem gruntu	E14
6. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY	E14

Część 4. Eurokod 6

Projektowanie konstrukcji murowych wg norm europejskich

1. Wprowadzenie

Pakiet norm europejskich PN-EN 1996 Eurokod 6 obejmuje zagadnienia związane z projektowaniem konstrukcji murowych. Tworzą go następujące normy wraz z poprawkami:

- [1] PN-EN 1996-1-1:2010. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych; poprawki: PN-EN 1996-1-1:2010/NA:2010, PN-EN 1996-1-1:2010/Ap1:2010;
- [2] PN-EN 1996-1-2:2010. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe; poprawka PN-EN 1996-1-2:2010/NA:2010;
- [3] PN-EN 1996-2:2010. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 2: Wymagania projektowe, dobór materiałów i wykonanie murów; poprawki: PN-EN 1996-2:2010/NA:2010, PN-EN 1996-2:2010/Ap1:2010;
- [4] PN-EN 1996-3:2010. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 3: Uproszczone metody obliczania konstrukcji niezbrojonych; poprawka PN-EN 1996-3:2010/NA:2010.

Aktualnie projektanci mogą korzystać z ww. pakietu norm europejskich lub z wychodzącej z użycia, lecz jeszcze ważnej normy polskiej:

- [5] PN-B-03002: 2007. Konstrukcje murowe. Projektowanie i obliczanie.

W opracowaniu przedstawiono przypadki wytrzymałościowe najczęściej spotykane w praktyce inżynierskiej, ze szczególnym uwzględnieniem podstawowego przypadku muru obciążonego pionowo z drugorzędnymi oddziaływaniami poziomymi. Przybliżono ponadto przypadek obciążenia skupionego oraz metody sprawdzenia nośności muru ścinanego i zginanego, jak również metodę sprawdzenia nośności muru obciążonego prostopadłe do swojej powierzchni z uwzględnieniem efektu przesklepienia łukowego.

Rozdziały 2-5 opracowano na podstawie normy [1], rozdział 6 na podstawie normy [4].

2. Materiały

2.1. Elementy murowe

Elementy murowe z uwagi na rodzaj materiału dzieli się na:

- ceramiczne,
- silikatowe,
- z betonu kruszywowego,
- z autoklawizowanego betonu komórkowego,
- z kamienia sztucznego,
- z kamienia naturalnego.

Wyróżnia się ponadto elementy murowe kategorii I lub II. Ogólnie I kategoria obejmuje elementy murowe o dobrej jakości, produkowane seryjnie przez wytwórnie gwarantujące odpowiedni poziom i powtarzalność cech wytrzymałościowych i mechanicznych, zachowanie tolerancji wymiarowych oraz poddane odpowiedniej kontroli jakości. Do II kategorii zalicza się elementy murowe, niespełniające wymagań grupy I.

Z uwagi na sferforowanie przekroju drażnieniami pionowymi i poziomymi elementy murowe podzielono na 4 grupy. Przynależność do danej grupy elementów murowych ustala się na podstawie tablicy 2.1. Podaje ją również zwykle producent elementów murowych. Podstawową cechą mechaniczną, przyjmowaną do obliczeń, jest znormalizowana wytrzymałość na ściskanie f_b . Z reguły jest nią deklarowana przez producenta średnia wytrzymałość na ściskanie. Gdy wartość f_b ustala się podstawie badań próbek w stanie wilgotnościowym innym niż powietrzno-suchy, otrzymany z badań wynik średniej wytrzymałości na ściskanie sprowadza się do znormalizowanej średniej wytrzymałości na ściskanie f_b według procedur podanych w normie PN-EN 772-1:2001.

Tabela 2.1. Wymagania geometrii elementów murowych wg PN-EN1996-1-1:2010, tabl. 3.1

	Materiał i ograniczenia dla elementów murowych							
	Grupa 1 (wszystkie materiały)	Elementy murowe	Grupa 2		Grupa 3		Grupa 4	
			Drażnienia pionowe			Drażnienia poziome		
Objętość wszystkich otworów (udział procentowy w objętości brutto)	≤ 25	ceramika	> 25 ; ≤ 55		≥ 25 ; ≤ 70		> 25 ; ≤ 70	
		silikaty	> 25 ; ≤ 55		nie stosuje się		nie stosuje się	
		beton ^b	> 25 ; ≤ 60		> 25 ; ≤ 70		> 25 ; ≤ 50	
Objętość jednego otworu (udział procentowy w objętości brutto)	≤ 12,5	ceramika	każdy z otworów ≤ 2, otwory chwytowe łącznie do 12,5		każdy z otworów ≤ 2, otwory chwytowe łącznie do 12,5		każdy z otworów ≤ 30	
		silikaty	każdy z otworów ≤ 15, otwory chwytowe łącznie do 30		nie stosuje się		nie stosuje się	
		beton ^b	każdy z otworów ≤ 30, otwory chwytowe łącznie do 30		każdy z otworów ≤ 30, otwory chwytowe łącznie do 30		każdy z otworów ≤ 25	
Deklarowana grubość ścianki wewnętrznej i zewnętrznej (mm)	nie ma wymagań	1.1	wewnętrzna	zewnętrzna	wewnętrzna	zewnętrzna	wewnętrzna	zewnętrzna
		ceramika	≥ 5	≥ 8	≥ 3	≥ 6	≥ 5	≥ 6
		silikaty	≥ 5	≥ 10	nie stosuje się		nie stosuje się	
		beton ^b	≥ 15	≥ 18	≥ 15	≥ 15	≥ 20	≥ 20
Deklarowana grubość zastępcza ^a ścianek wewnętrznych i zewnętrznych (% szerokości brutto)	nie ma wymagań	ceramika	≥ 16		≥ 12		≥ 12	
		silikaty	≥ 20		nie stosuje się		nie stosuje się	
		beton ^b	≥ 18		≥ 15		≥ 45	

^a Grubość zastępcza jest sumą grubości ścianek wewnętrznych i zewnętrznych mierzonych poziomo w danym kierunku. Ustalana jest na podstawie badań typu i wymaga powtórnego określenia w przypadku wystąpienia istotnej zmiany wymiarów elementu murowego.

^b W przypadku otworów słojkowych lub komorowych przyjmuje się średnią grubość ścianek wewnętrznych i zewnętrznych.

^a Grubość zastępcza jest sumą grubości ścianek wewnętrznych i zewnętrznych mierzonych poziomo w danym kierunku. Ustalana jest na podstawie badań typu i wymaga powtórzonego określenia w przypadku wystąpienia istotnej zmiany wymiarów elementu murowego.

^b W przypadku otworów stożkowych lub komorowych przyjmuje się średnią grubość ścianek wewnętrznych i zewnętrznych.

2.2. Zaprawa murarska

Zaprawy murarskie dzieli się na:

- zwykłe (ogólnego przeznaczenia);
- do cienkich spoin (spełniające warunki maksymalnego uziarnienia);
- lekkie (o gęstości w stanie suchym do 1300 kg/m³).

Z uwagi na sposób ustalania składu rozróżnia się następujące rodzaje zapraw:

- zaprawy projektowane (których skład i metoda wytwarzania zostały wskazane przez producenta w celu uzyskania wymaganych właściwości);
- zaprawy przepisane (wykonane według receptury, których właściwości wynikają z proporcji składników).

Odpowiednio do sposobu przygotowania wyróżnia się zaprawy:

- przygotowane fabrycznie;
- półgotowe przygotowane fabrycznie;
- przygotowane na miejscu budowy.

Zaprawy klasyfikuje się odpowiednio do ich wytrzymałości na ściskanie i oznacza literą M oraz liczbą, oznaczającą wytrzymałość na ściskanie w MPa. Przykładowo oznaczenie M5 oznacza zaprawę murarską o wytrzymałości na ściskanie $f_m = 5$ MPa. Wytrzymałość zaprawy na ściskanie f_m wyznacza się zgodnie z PN-EN 1015-11:2001. Składy mieszanek zapraw murarskich wytwarzanych na miejscu

budowy można przyjmować z tablic NA.3 i NA.4 załącznika krajowego normy PN-EN 1996-1-1:2010.

3. Cechy wytrzymałościowe i mechaniczne muru

3.1. Wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie

Wytrzymałość charakterystyczną muru na ściskanie f_k wyznacza się następująco:

- dla murów wykonanych na zaprawie zwykłej lub lekkiej:

$$f_k = K f_b^{0,70} f_m^{0,30} \quad (3.1)$$

- dla murów ze spoinami cienkimi z elementów murowych grupy 1 i 4, elementów silikatowych, elementów z betonu kruszywowego oraz elementów z betonu komórkowego o $f_b \geq 2,4$ MPa:

$$f_k = K f_b^{0,85} \quad (3.2)$$

- dla murów ze spoinami cienkimi z betonu komórkowego o $f_b < 2,4$ MPa:

$$f_k = 0,8K f_b^{0,85} \quad (3.3)$$

- dla murów ze spoinami cienkimi z elementów murowych ceramicznych grupy 2 i 3:

$$f_k = K f_b^{0,70} \quad (3.4)$$

Współczynnik K przyjmuje się z tablicy 3.1.

Wyżej wymienione wzory stosuje się jedynie dla murów ze spoinami na całej powierzchni spoin wspornych (a więc niebędących murami ze spoinami pasmowymi).

W przypadku murów ze spoiną podłużną obliczone z powyższych wzorów wartości f_k należy zmniejszyć, mnożąc je przez współczynnik $\eta = 0,8$.

Tablica 3.1. Wartości współczynnika K wg PN-EN 1996-1-1:2010, tabl. NA.5

Element murowy		Rodzaj zaprawy murarskiej		
Material	Grupa	Zaprawa zwykła	Zaprawa do cienkich spoin	Zaprawa lekka
Ceramika	1	0,45	0,60	0,30
	2	0,40	0,50	0,25
	3	0,30	0,45	0,20
	4	0,30	0,35	0,20
Silikaty	1	0,45	0,55	*)
	2	0,40	0,45	*)
Beton kruszywowy	1	0,40	*)	*)
	2	0,35	*)	*)
	3	0,30	*)	*)
	4	0,25	*)	*)
Autoklawizowany beton komórkowy	1	0,45	0,75	0,40
Kamień sztuczny	1	0,45	*)	*)
Kamień naturalny	1	0,45	*)	*)

*) W praktyce zwykle nie jest stosowane takie połączenie elementu murowego i zaprawy.

3.2. Wytrzymałość charakterystyczna muru na ścinanie

Dla murów z wypełnionymi spoinami pionowymi, w zależności od kierunku działania siły ścinającej w stosunku do spoin wspornych (przenoszących naprężenia ściskające w murze) rozróżnia się następujące wytrzymałości charakterystyczne muru na ścinanie:

- w kierunku równoległym do spoin wspornych f_{vk} ,
- w kierunku prostopadłym do spoin wspornych f_{vbk} .

Za wytrzymałość f_{vk} przyjmuje się najmniejszą z wartości:

$$f_{vk} = f_{vko} + 0,4\sigma_d, \quad (3.5)$$

$$f_{vk} = 0,065f_b, \text{ lecz nie mniej niż } f_{vko}, \quad (3.6)$$

- wartości graniczne f_{vk} wg tablicy 3.2,

gdzie:

f_{vko} – wytrzymałość charakterystyczna muru na ścinanie w kierunku równoległym do spoin wspornych, gdy naprężenie ściskające jest równe 0,

σ_d – średnie obliczeniowe naprężenia ściskające w kierunku prostopadłym do kierunku ścinania,

f_b – znormalizowana wytrzymałość na ściskanie elementów murowych w kierunku prostopadłym do spoin wspornych,

f_k – wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie.

Tablica 3.2. Wartości f_{vko} i ograniczenie f_{vk} , MPa wg PN-EN 1996-1-1:2010, tabl. NA.6

Materiał elementu murewgo	f_{vko}			Ograniczenie f_{vk}				
	Zaprawa zwykła		Zaprawa do cienkich spoin	Zaprawa lekka	Grupa elementu murewgo			
	f_m	f_{tko}			1	2	3 i 4	
Ceramika	15; 20	0,30	0,25	0,10	1,7	1,4	ograniczenia jak pod wzorem (NA.5)	
	5; 10	0,20			1,5	1,2		
	1; 2,5	0,10			1,2	1,0		
	15; 20	0,20	0,30	nie stosuje się	1,7	1,4		
Silikaty	5; 10	0,15			1,5	1,2		
	1; 2,5	0,10			1,2	1,0		
Beton kruszywowy	15; 20	0,20	nie stosuje się		ograniczenia jak pod wzorem (NA.5)			
Autoklawizowany beton komórkowy	2,5; 5; 10	0,15	0,25	0,10				
Kamień naturalny i sztuczny	1; 2,5	0,10	nie stosuje się					

Wytrzymałość f_{vbk} przyjmuje się z tablicy 3.3.:

Grupa elementu murowego	f_b				
	< 5	5	10	15	≥ 20
1 – z wyjątkiem autoklawizowanego betonu komórkowego	nie stosuje się	0,7	0,9	1,0	1,1
2	0,1	0,2	0,3		0,4
3 i 4	0,1	0,2			
Autoklawizowany beton komórkowy	0,1 f_k				

Dla murów z niewypełnionymi spoinami pionowymi wytrzymałość f_{vbk} przyjmuje się jako najmniejszą z wartości:

$$f_{vbk} = 0,5 f_{vko} + 0,4 \sigma_d \quad (3.7)$$

$$f_{vbk} = 0,045 f_b, \text{ lecz nie mniej niż } f_{vko} \quad (3.8)$$

$$f_{vbk} = 0,7 \text{ wartości granicznej podanej w tablicy 3.3.} \quad (3.9)$$

3.3. Wytrzymałość charakterystyczna muru na zginanie

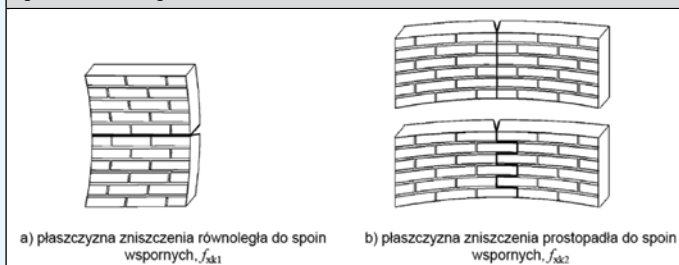
W zależności od kierunku działania momentu zginającego rozróżnia się 2 wytrzymałości muru na zginanie:

- f_{xk1} , gdy zginanie wywołuje rozciąganie spoin wspornych (rys. 3.1a);

- f_{xk2} , gdy zginanie wywołuje ścinanie spoin wspornych (rys. 3.1b).

Wartości wytrzymałości f_{xk1} i f_{xk2} odczytuje się z załącznika krajowego PN-EN 1996-1-1:2010, z tablicy 3.4. i 3.5.

Rys. 3.1. Wytrzymałości muru na zginanie f_{xk1} i f_{xk2} odpowiednie do kierunków zginania muru, wg PN-EN 1996-1-1:2010



Tablica 3.4. Wytrzymałość charakterystyczna muru na rozciąganie przy zginaniu w płaszczyźnie zniszczenia równoległej do spoin wspornych, f_{xk1} , MPa, wg PN-EN 1996-1-1:2010, tabl. NA. 8

Materiał elementu murowego	Rodzaj zaprawy			
	Zaprawa zwykła		Zaprawa do cienkich spoin	Zaprawa lekka
	$f_m < 5$ MPa	$f_m \geq 5$ MPa		
Ceramika	0,10	0,10	0,15	0,10
Silikaty	0,05	0,10	0,15	nie stosuje się
Beton kruszywowy	0,05	0,10	nie stosuje się	nie stosuje się
Autoklawizowany beton komórkowy	0,05	0,10	$0,035 f_k$	0,10
Kamień sztuczny	0,05	0,10	nie stosuje się	nie stosuje się
Kamień naturalny	0,05	0,10	0,15	nie stosuje się

Tablica 3.5. Wytrzymałość charakterystyczna muru na rozciąganie przy zginaniu w płaszczyźnie zniszczenia prostopadłej do spoin wspornych, f_{xk2} , MPa, wg PN-EN 1996-1-1:2010, tabl. NA.9

Materiał elementu murowego	Rodzaj zaprawy			
	Zaprawa zwykła		Zaprawa do cienkich spoin	Zaprawa lekka
	$f_m < 5$ MPa	$f_m \geq 5$ MPa		
Ceramika	0,20	0,40	0,15	0,10
Silikaty	0,20	0,40	0,30	nie stosuje się
Beton kruszywowy	0,20	0,40	nie stosuje się	nie stosuje się
Autoklawizowany beton komórkowy	0,20	0,40	$0,035 f_k^*)$	0,15
Kamień sztuczny	0,20	0,40	nie stosuje się	nie stosuje się
Kamień naturalny	0,20	0,40	0,15	nie stosuje się

*) W przypadku pionowych spoin niewypełnionych zaprawa, $f_{sk2} = 0,025 f_k$

3.4. Moduł sprężystości muru

Zgodnie z załącznikiem krajowym doraźny moduł sprężystości E można przyjmować następująco:

- dla murów wykonanych na zaprawie $f_m \geq 5$ MPa, z wyjątkiem murów z autoklawizowanego betonu komórkowego, $E = 1000 f_k$;
- dla murów z betonu komórkowego, niezależnie od rodzaju zaprawy, a także dla murów z innego rodzaju elementów murowych na zaprawie $f_m < 5$ MPa, $E = 600 f_k$.

Wartość długotrwałego modułu sprężystości wyznacza się ze wzoru:

$$E_{\text{longterm}} = E / (1 + \varphi_{\infty}) \quad (3.10)$$

gdzie końcową wartość współczynnika pełzania φ_{∞} przyjmuje się następująco:

- dla elementów ceramicznych: od 0,5 do 1,5;
- dla silikatów, betonu kruszywowego i kamienia sztucznego: od 1,0 do 2,0;
- dla betonu na kruszywach lekkich: od 1,0 do 3,0;
- dla autoklawizowanego betonu komórkowego: od 0,5 do 1,5.

3.5. Wytrzymałość obliczeniowa muru

Wartości obliczeniowe wytrzymałości muru otrzymuje się, dzieląc wartości charakterystyczne przez częściowy współczynnik bezpieczeństwa γ_M . Wartość γ_M odczytuje się z tablicy 3.6., z załącznika krajowego PN-EN 1996-1-1:2010:

Tablica 3.6. Wartości współczynnika γ_M , wg PN-EN 1996-1-1:2010, tabl. NA.1

Materiał			γ_M	
			Klasa	
			A	B
A	Mury wykonane z elementów murowych kategorii I, zaprawa projektowana ^a	Ściany grubości $t > 150$ mm ^f	1,7	2,0
B	Mury wykonane z elementów murowych kategorii I, zaprawa przepisana ^b		2,0	2,2
C	Mury wykonane z elementów murowych kategorii II, dowolna zaprawa ^{a, b, c}		2,2	2,5
D	Zakotwienie prętów stali zbrojeniowej		2,0	2,2
E	Stal zbrojeniowa i sprężająca		1,15	
F	Wyroby dodatkowe ^{c, d} zgodne z PN-EN 845-1 i PN-EN 845-3		2,0	2,2
G	Nadproża	prefabrykowane zgodne z PN-EN 845-2 wykonywane na budowie	1,7	
			2,5	

^a Wymagania dotyczące zaprawy projektowanej podano w PN-EN 998-2 i PN-EN 1996-2.

^b Wymagania dotyczące zaprawy przepisanej podano w PN-EN 998-2 i PN-EN 1996-2.

^c Wartość deklarowana jest wartością średnią.

^d Przyjmuje się, że współczynnik γ_M odnosi się również do warstw izolacji przeciwwilgociowej.

^e Gdy współczynnik zmienności dla kategorii II elementów murowych jest nie większy niż 25 %.

^f Dla ścian grubości 150 mm $\geq t \geq 100$ mm:

– wykonanych z elementów murowych kategorii I i zaprawy projektowanej, pod nadzorem odpowiadającym klasie A wykonania robót – $\gamma_M = 2,5$;

– w pozostałych przypadkach – $\gamma_M = 2,7$.

Wartości współczynnika γ_M zależne są od klasy (kategorii) wykonania robót na budowie. Klasę wykonania robót zakłada projektant:

- klasę A wykonania robót – gdy roboty murarskie wykonuje należycie wyszkolony zespół pod nadzorem mistrza murarskiego, stosuje się zaprawy produkowane fabrycznie, a jeżeli zaprawa wytwarzana jest na budowie, kontroluje się dozowanie składników, a także wytrzymałość zaprawy, a jakość robót kontroluje inspektor nadzoru inwestorskiego;
- klasę B wykonania robót – gdy warunki określające klasę A nie są spełnione.

Gdy pole przekroju poprzecznego elementu konstrukcji murowej jest mniejsze niż 0,30 m², wytrzymałość obliczeniową muru zmniejsza się do:

datkowo, dzieląc ją przez współczynnik γ_{Rd} o wartości podanej w tablicy 3.7.:

Tablica 3.7. Wartości współczynnika γ_{Rd} PN-EN 1996-1-1:2010, tabl. NA.2				
Pole przekroju poprzecznego muru (m^2)	$\leq 0,05-0,09$	0,12	0,20	$\geq 0,30$
γ_{Rd}	2,00	1,43	1,25	1,00
Uwaga: Dla wartości pośrednich pola przekroju muru, wartości γ_{Rd} można interpolować liniowo.				

Obliczeniowe wytrzymałości muru oznacza się dolnym indeksem d, przykładowo wytrzymałość obliczeniową muru na ściskanie oznacza się jako f_d .

4. Nośności muru w poszczególnych przypadkach wytrzymałościowych

4.1. Nośność muru obciążonego głównie pionowo

Eurokod 6 nie rozróżnia, jak ostatnia norma polska PN-B-03002, 2 modeli obliczeniowych: przegubowego i ciągłego. Jedynym modelem obliczeniowym jest model ramowy, będący odpowiednikiem modelu ciągłego wg PN-B-03002.

Niżej przedstawiona metoda obliczeniowa dotyczy ścian murowanych, których wiodącym (podstawowym) obciążeniem jest obciążenie pionowe. Ponadto metoda uwzględnia momenty zginające powstałe od mimośrodków sił pionowych oraz od sił poziomych, np. od wiatru.

Nośność muru obciążonego głównie pionowo sprawdza się w 3 charakterystycznych przekrojach:

- na górnej krawędzi ściany,
- na dolnej krawędzi ściany,
- w środku wysokości ściany.

Sprawdzenia nośności dokonuje się z warunku:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (4.1)$$

gdzie:

N_{Ed} – obliczeniowe obciążenie pionowe, kN/m,

N_{Rd} – nośność obliczeniowa na jednostkę długości ściany, kN/m.

$$N_{Rd} = \Phi t f_d \quad (4.2)$$

gdzie:

Φ – współczynnik redukcyjny nośności, uwzględniający wpływ smukłości oraz mimośrodów obciążenia, oznaczany jako:

Φ_i – na górnej ($i = 1$) i na dolnej ($i = 2$) krawędzi ściany;

Φ_m – w środku ściany;

t – grubość ściany;

f_d – wytrzymałość obliczeniowa muru na ściskanie.

Współczynniki redukcyjne Φ_i wyznacza się z zależności:

$$\Phi_i = 1 - \frac{2e_i}{t} \quad (4.3)$$

Mimośród e_i u góry i u dołu ściany oblicza się ze wzoru:

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_{id}} + e_{he} + e_{init} \geq 0,05t \quad (4.4)$$

gdzie:

M_{id} – obliczeniowy moment zginający u góry ściany (M_{1d}) i u dołu ściany (M_{2d}), wynikający z mimośrodkowego przekazywania reakcji ze stropu na ścianę; sposób wyznaczenia podano niżej;

N_{id} – obliczeniowa ściskająca siła pionowa u góry ściany (N_{1d}) i u dołu ściany (N_{2d});

e_{he} – mimośród u góry i u dołu ściany, pochodzący od sił poziomych (np. od wiatru);

e_{init} – mimośród początkowy, wyznaczany jako $h_{ef}/450$,

h_{ef} – wysokość efektywna ściany;

t – grubość ściany.

Obliczenie współczynnika redukcyjnego w połowie wysokości ściany Φ_m wymaga wstępnego określenia mimośrodu w połowie wysokości ściany e_{mk} :

$$e_{mk} = e_m + e_k \geq 0,05t \quad (4.5)$$

$$e_m = \frac{M_{md}}{N_{md}} + e_{hm} + e_{init} \quad (4.6)$$

gdzie:

e_m – mimośród działania obciążenia,

M_{md} – obliczeniowy moment zginający w środku wysokości ściany, wynikający z momentów obciążających górną i dolną krawędź ściany,

N_{md} – obliczeniowa siła pionowa w połowie wysokości ściany,

e_{hm} – mimośród w połowie wysokości ściany, wynikający z jej obciążenia poziomego (np. od wiatru); Eurokod 6 nie podaje sposobu wyznaczenia momentu w ścianie od wiatru, w modelu ramowym wartość mimośrodu e_{hm} można za ostatnią normą polską PN-B-03002 obliczać dla momentu od wiatru równego $q_w h_1/16$ (q_w – obciążenie ściany wiatrem, h_1 – wysokość ściany),

e_k – mimośród wywołany przez pełzanie, obliczany jako:

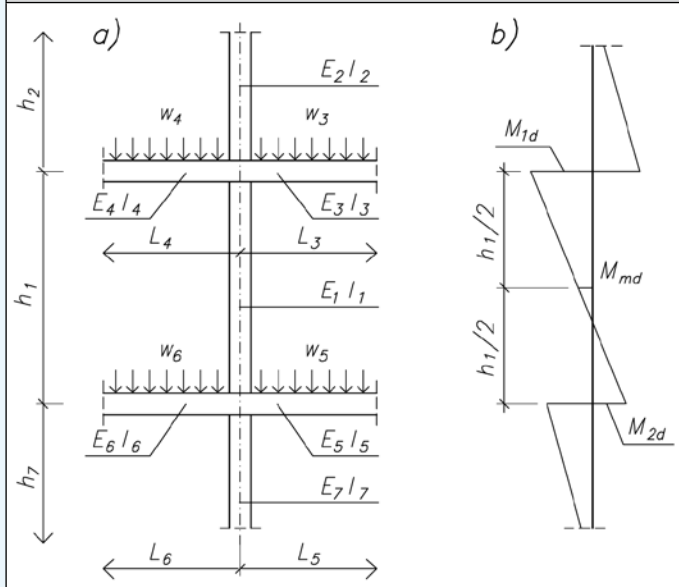
$$e_k = 0.002 \varphi_{\infty} \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \sqrt{t_{ef}} \quad (4.7)$$

t_{ef} – efektywna grubość ściany, dla ściany o jednolitej grubości (bez pilastrów) $t_{ef} = t$, dla ściany z pilastrami t_{ef} wyznacza się wg p. 5.5.1.3 normy PN-EN 1996-1-1:2010,

φ_{∞} – końcowy współczynnik pełzania, można przyjmować wg p. 3.4 PN-EN 1996-1-1:2010

Największą trudnością w procedurze wyznaczenia nośności ściany na obciążenia pionowe jest określenie momentów M_{1d} oraz M_{2d} , działających na górnej i na dolnej krawędzi ściany. Zakłada się model obliczeniowy, w którym sprężystość połączone w węzłach ściany i stropy tworzą ustrój ramowy (rys. 4.1.). W modelu tym momenty ujemne powstałe w płytach stropowych w miejscu ich oparcia na ścianach są częściowo przekazywane na ściany w postaci momentów skupionych. Wyznaczenie według tego modelu momentów M_{1d} oraz M_{2d} wymagałoby od projektanta rozwiązania całego układu ramowego z uwzględnieniem trudnej do określenia podatności połączenia stropu ze ścianą.

Rys. 4.1. Ramowy model obliczeniowy muru obciążonego głównie pionowo, opracowano na podstawie PN-B-03002:2007



W załączniku C normy PN-EN 1996-1-1:2010 podano metodę obliczania momentów M_{1d} oraz M_{2d} . Metoda ta polega na wydzieleniu z układu ramowego płyt stropowych jako pojedynczych prętów, nadaniu im schematu statycznego belek obustronnie lub jednostronnie utwierdzonych, a następnie wyznaczeniu dla nich wartości momentów podporowych

z zasad mechaniki budowli. Tak wyznaczonymi momentami obciąża się następnie górny i dolny węzeł analizowanej ściany, dzieląc je na schodzące się w nich pręty (stropy i ściany) proporcjonalnie do ich sztywności giętnej EI oraz odwrotnie proporcjonalnie do ich długości. Otrzymane w ten sposób momenty na górnej i na dolnej krawędzi ściany redukuje się następnie współczynnikiem η , uwzględniającym podatne połączenie stropów ze ścianami.

Wyżej opisany tok postępowania ujęto w załączniku C normy PN-EN 1996-1-1:2010 wzorem (5.8):

$$M_1 = \frac{\frac{n_1 E_1 I_1}{h_1}}{\frac{n_1 E_1 I_1}{h_1} + \frac{n_2 E_2 I_2}{h_2} + \frac{n_3 E_3 I_3}{l_3} + \frac{n_4 E_4 I_4}{l_4}} \left[\frac{w_3 l_3^2}{4(n_3 - 1)} - \frac{w_4 l_4^2}{4(n_4 - 1)} \right] \quad (4.8)$$

gdzie:

- n_i – współczynnik sztywności prętów, równy 4 dla prętów utwierdzonych na obydwu końcach, w przeciwnym przypadku 3;
- E_i – moduł sprężystości pręta i , gdzie $i = 1, 2, 3$ lub 4 ; wystarczające jest przyjęcie dla wszystkich elementów murowych $E = 1000f_k$;
- I_i – moment bezwładności pręta i , gdzie $i = 1, 2, 3$ lub 4
- h_1 – wysokość w świetle pręta 1,
- h_2 – wysokość w świetle pręta 2,
- l_3 – rozpiętość w świetle pręta 3,
- l_4 – rozpiętość w świetle pręta 4,
- w_3, w_4 – obciążenia obliczeniowe równomiernie rozłożone na prętach 3 i 4, o wartościach wywołujących efekt niekorzystny; zwykle uwzględnia się możliwość największego zróżnicowania obciążeń w_3 i w_4 , co prowadzi do osiągnięcia ekstremalnej wartości momentu na krawędzi ściany.

Wzór (4.8) obowiązuje dla węzła, w którym są połączone 4 pręty (2 stropy i 2 ściany). Jeżeli w węźle łączą się 3 pręty (2 ściany i jeden strop lub 2 stropy i 1 ściana), pręt nieistniejący powinien zostać we wzorze pominięty.

Przeciwnie końce prętów należy przyjmować jako zamocowane, chyba że nie przenoszą momentów, wówczas można je przyjąć jako przegubowe.

Podobnie jak moment M_1 w węźle 1 (górnym) wyznacza się moment M_2 w węźle 2 (dolnym), podstawiając do wzoru dane właściwe dla prętów zbiegających się w węźle 2.

Współczynniki sztywności n_3 i n_4 uwzględniają schemat statyczny płyty stropowej:

■ dla n_3 i $n_4 = 4$ część wzoru (4.8) zawarta w nawiasie prostokątnym daje w wyniku różnicę momentów utwierdzenia 2 prętów obustronnie utwierdzonych z momentami zamocowania równymi $wl^2/12$;

■ dla n_3 i $n_4 = 3$ część wzoru zawarta w nawiasie prostokątnym daje różnicę momentów utwierdzenia 2 prętów jednostronnie utwierdzonych z momentami zamocowania równymi $wl^2/8$;

Iloraz stojący przed nawiasem prostokątnym wydzieli z tak obliczonego, działającego na węzeł momentu skupionego jego część, przejmowaną przez ścianę na jej dolnej lub górnej krawędzi (M_1 lub M_2).

Obliczone ze wzoru (4.8) momenty M_1 i M_2 redukuje się następnie, mnożąc je przez współczynnik redukcyjny η , uwzględniający podatne połączenie stropów ze ścianami, powstałe wskutek luzów na styku wieńca żelbetowego z konstrukcją murową ściany. Współczynnik η wyznacza się następująco:

$$\eta = 1 - k_m/4 \quad (4.9)$$

$$k_m = \frac{\frac{n_3 E_3 I_3}{h_3} + \frac{n_4 E_4 I_4}{h_4}}{\frac{n_1 E_1 I_1}{h_1} + \frac{n_2 E_2 I_2}{h_2}} \leq 2 \quad (4.10)$$

W załączniku G normy PN-EN 1996-1-1:2010 podano uproszczoną metodę obliczania współczynnika redukcyjnego Φ_m :

$$\Phi_m = A_1 e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (4.11)$$

$$A_1 = 1 - 2 \frac{e_{mk}}{t} \quad (4.12)$$

Dla murów o module sprężystości $E = 1000 f_k$:

$$u = \frac{\frac{h_{ef}}{t_{ef}} - 2}{23 - 37 \frac{e_{mk}}{t}} \quad (4.13)$$

Dla murów o module sprężystości $E = 700 f_k$:

$$u = \frac{\frac{h_{ef}}{t_{ef}} - 1,67}{19,3 - 31 \frac{e_{mk}}{t}} \quad (4.14)$$

Wysokość efektywną ścian h_{ef} należy przyjmować równą:

$$h_{ef} = \rho_n h \quad (4.15)$$

gdzie:

h – wysokość ściany w świetle,

ρ_n – współczynnik redukcji, $n = 2, 3$ lub 4 w zależności od liczby usztywnionych krawędzi ściany.

Współczynnik redukcji ρ_n w najczęściej spotykanych przypadkach można przyjmować następująco:

- dla ścian utwierdzonych na górnej i na dolnej krawędzi przez stropy żelbetowe lub dachy rozpięte dwukierunkowo, lub przez stropy żelbetowe rozpięte jednokierunkowo oparte na co najmniej $2/3$ grubości ściany: $\rho_2 = 0,75$; chyba że mimośród obciążenia na górnej krawędzi ściany jest większy niż $0,25$ grubości ściany, wtedy $\rho_2 = 1,0$,
- dla ścian utwierdzonych na górnej i dolnej krawędzi przez stropy lub dachy drewniane rozpięte dwukierunkowo lub przez stropy drewniane rozpięte jednokierunkowo oparte na co najmniej $2/3$ grubości ściany i nie mniej niż 85 mm: $\rho_2 = 1,0$.
- dla ścian usztywnionych wzdłuż 3 i 4 krawędzi współczynniki ρ_3 i ρ_4 określa się wg p. 5.5.1.2 normy PN-EN 1996-1-1:2010.

4.2. Nośność muru pod siłą skupioną

Nośność muru pod obciążeniem skupionym sprawdza się z następującego warunku:

$$N_{Edc} \leq N_{Rdc} \quad (4.16)$$

gdzie:

N_{Edc} – obliczeniowe pionowe obciążenie skupione

N_{Rdc} – nośność obliczeniowa ściany pod obciążeniem skupionym

Dla ścian obciążonych siłą skupioną, wykonanych z elementów murowych grupy 1, nośność obliczeniową ściany wyznacza się ze wzoru:

$$N_{Rdc} = \beta A_b f_d \quad (4.17)$$

gdzie:

$$\beta = \left(1 + 0,3 \frac{a_1}{h_c}\right) \left(1,5 - 1,1 \frac{A_b}{A_{ef}}\right) \quad (4.18)$$

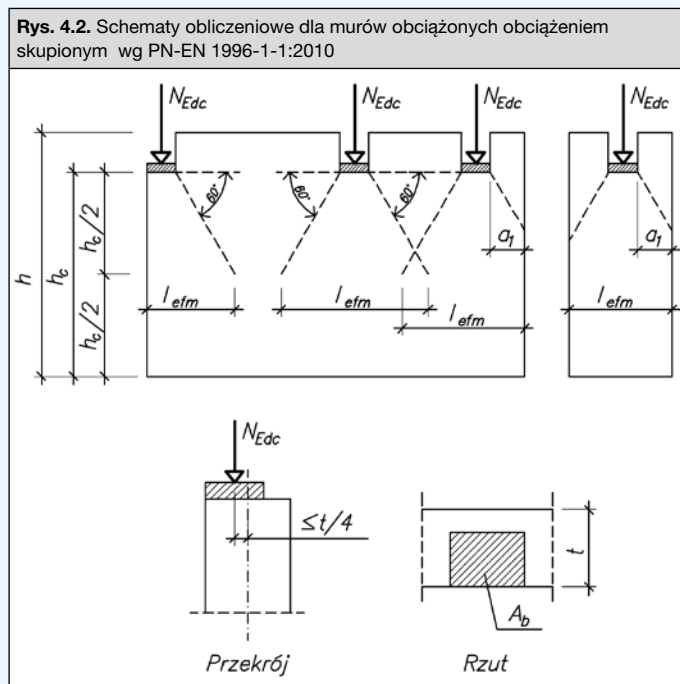
Współczynnik β należy przyjmować nie mniejszy niż 0 i nie większy niż:

$$1,25 + \frac{a_1}{2h_c} \quad (4.19)$$

oraz nie większy niż $1,5$.

- β - współczynnik zwiększający nośność na obciążenie skupione,
- a_1 - odległość końca ściany od krawędzi skrajnego obszaru obciążenia,
- h_c - wysokość ściany do poziomu obciążenia,
- A_b - powierzchnia obciążenia,
- A_{ef} - powierzchnia efektywna rozdziału, $A_{ef} = l_{efm} \cdot t$,
- l_{efm} - efektywna długość rozdziału określona w połowie wysokości ściany lub filara,
- t - grubość ściany, z uwzględnieniem bruzd w spoinach większych niż 5 mm,
- $\frac{A_b}{A_{ef}}$ - nie więcej niż 0,45.

Schematy do wyznaczania efektywnej długości rozdziału określonej w połowie wysokości ściany l_{efm} podano na rys. 4.2.



W przypadku ścian wykonanych z elementów murowych grupy 2, 3 i 4 murowanych na pasmach zaprawy, należy sprawdzić, czy lokalnie obliczeniowe naprężenia ściskające pod obciążeniem skupionym nie przekraczają wytrzymałości obliczeniowej muru f_d (współczynnik β we wzorze (4.17) należy przyjąć = 1,0).

Mimośród obciążenia względem osi ściany powinien być nie większy niż $t/4$ (patrz rysunek 5.2.).

Wymagania podane we wzorze (4.16) powinny być spełnione poniżej obciążenia w połowie wysokości ściany we wszystkich przypadkach, z uwzględnieniem wpływu każdego obciążenia

pionowego, szczególnie w przypadku, gdy obciążenia skupione są usytuowane względem siebie tak blisko, że ich długości efektywne zachodzą na siebie.

Bezpośrednio pod obciążeniem skupionym powinny być zastosowane elementy murowe grupy 1 lub inne pełne elementy na długości równej długości przyłożonego obciążenia zwiększonej o długość obliczoną z uwzględnieniem rozdziału obciążenia po obydwu stronach przyłożonego obciążenia pod kątem 60° od krawędzi jego przyłożenia do poziomu rozpatrywanej warstwy. W przypadku obciążenia przyłożonego na końcu ściany, dodatkowa długość rozdziału jest wymagana jedynie z jednej strony.

Gdy obciążenie skupione przyłożone jest poprzez belkę o odpowiedniej sztywności i szerokości równej grubości ściany oraz wysokości większej niż 200 mm i długości większej niż trzykrotna długość przyłożenia obciążenia, naprężenia obliczeniowe poniżej obciążenia skupionego nie powinny przekraczać $1,5 f_d$.

4.3. Nośność muru na ścinanie

W stanie granicznym nośności, obciążenie obliczeniowe ścinające działające na ścianę murowaną, V_{Ed} , nie powinno być większe od nośności obliczeniowej na ścinanie ściany, V_{Rd} :

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = f_{vd} t l_c \quad (4.20)$$

gdzie:

f_{vd} - wytrzymałość obliczeniowa muru na ścinanie, wyznaczona wg p. 3.2, dla średnich naprężeń pionowych nad ściskaną częścią ściany, dla której ustalana jest nośność na ścinanie;

t - grubość ściany przenoszącej ścinanie;

l_c - długość ściskanej części ściany, z pominięciem rozciąganej części ściany.

4.4. Nośność ścian obciążonych prostopadle do swojej powierzchni

W stanie granicznym nośności, moment obliczeniowy przyłożony do ściany murowanej, M_{Ed} , nie powinien być większy od nośności obliczeniowej na zginanie ściany, M_{Rd} :

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (4.21)$$

Nośność obliczeniową na zginanie ściany murowanej obciążonej prostopadle do powierzchni

ściany, M_{rd} , na jednostkę wysokości lub długości ściany, wyznacza się ze wzoru:

$$M_{rd} = f_{xd} Z \quad (4.22)$$

gdzie:

f_{xd} – wytrzymałość obliczeniowa muru na zginanie odpowiednio do płaszczyzny zginania, wyznaczona wg p. 3.3;

Z – sprężysty wskaźnik wytrzymałości przekroju na jednostkę wysokości lub długości ściany.

W przypadku działania na ścianę obciążeń pionowych, można uwzględnić dodatni wpływ naprężeń ściskających poprzez przyjęcie zastępczej wytrzymałości na zginanie, $f_{xd1,app}$, określonej wzorem:

$$f_{xd1,app} = f_{xd1} + \sigma_d \quad (4.23)$$

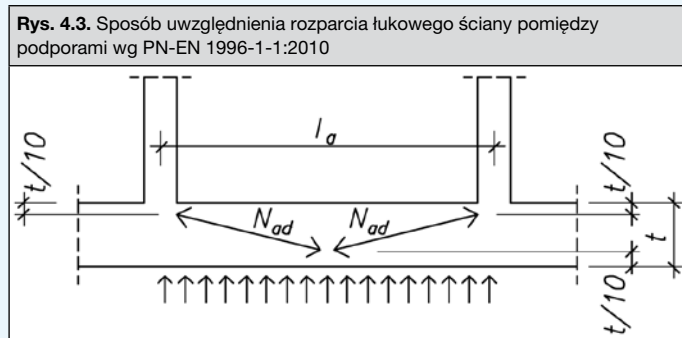
gdzie:

f_{xd1} – wytrzymałość obliczeniowa muru na zginanie w płaszczyźnie zniszczenia równoległej do spoin wspornych,

σ_d – naprężenie ściskające od obciążeń obliczeniowych na górnej powierzchni ściany, o wartości nie większej niż $0,2f_d$.

4.5. Przesklepienie łukowe pomiędzy podporami

Sprawdzenie nośności ściany obciążonej prostopadłe do swojej powierzchni można wykonać uwzględniając powstanie w grubości ściany, pomiędzy podporami, łuku trójkątowego. Łuk taki może być zorientowany w kierunku poziomym lub pionowym. Odległości punktów podparcia na podporach i wierzchołku łuku przyjmuje się równe $0,1$ grubości ściany, jak na rysunku 4.3.



Strzałkę łuku r określa się następująco:

$$r = 0,9t - d_a \quad (4.24)$$

gdzie:

t – grubość ściany, z uwzględnieniem jej ewentualnej redukcji z uwagi na występowanie wnęk,

d_a – ugięcie łuku pod obciążeniem prostopadłym do powierzchni; można nie uwzględniać dla ścian o stosunku długości do grubości nie większym niż 25.

r – strzałka łuku ze wzoru (4.24).

W normie PN-EN 1996-1-1:2010 sformułowano ogólne założenia do wyznaczenia sił wewnętrznych w łuku: siły rozporu należy wyznaczać na podstawie danych dotyczących obciążenia prostopadłego do powierzchni ściany, wytrzymałości muru ściskanego, efektywności połączenia pomiędzy ścianą i podporami przejmującymi rozpór łuku oraz sprężystym i długotrwałym skracaniem się ściany, nie podano jednak wzorów do wyznaczenia tych sił. Siłę rozporu można wyznaczać na podstawie normy PN-B-03002:

$$V_{sd} = W_{Ed} l_a^2 / 8r \quad (4.25)$$

gdzie:

W_{Ed} – obliczeniowe obciążenie prostopadłe do powierzchni;

Maksymalny dopuszczalny obliczeniowy rozpór łuku na jednostkę długości ściany, N_{ad} , można wyznaczać z równania:

$$N_{ad} = 1,5f_d \frac{t}{10} \quad (4.26)$$

Gdy ugięcie w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ściany jest małe, nośność obliczeniową wyznacza się jako:

$$q_{lat,d} = f_d \left(\frac{t}{l_a} \right)^2 \quad (4.27)$$

gdzie:

N_{ad} – rozpór obliczeniowy łuku;

$q_{lat,d}$ – nośność obliczeniowa na obciążenia prostopadłe, na jednostkę długości ściany;

t – grubość ściany;

f_d – wytrzymałość obliczeniowa muru na ściskanie w kierunku rozporu łuku;

l_a – długość lub wysokość ściany pomiędzy podporami zdolnymi do przeniesienia rozporu łuku.

Obliczenia polegają na wykazaniu, że siła V_{sd} nie przekracza wartości N_{ad} , a W_{Ed} jest nie większe od $q_{lat,d}$.

Powyższą procedurę można zastosować pod następującymi warunkami:

- naprężenia obliczeniowe od obciążeń pionowych są nie mniejsze niż 0,1 MPa,
- współczynnik smukłości w rozpatrywanym kierunku nie przekracza 20.

5. Uprozczone metody obliczeń

Uprozczone metody obliczeń ścian obciążonych pionowo oraz obciążonych wiatrem, zawarte w normie „PN-EN 1996-3:2010. Projektowanie konstrukcji murowych. Część 3: Uprozczone metody obliczania konstrukcji niezbrojonych”, można stosować pod następującymi warunkami:

- wysokość budynku powyżej poziomu terenu nie jest większa niż h_m ; w przypadku budynków z dachami nachylonymi wysokość budynku określa się jako średnią, mierzoną do połowy wysokości połaci dachowej; w zależności od klasy (1, 2 lub 3) norma zaleca wartości h_m odpowiednio 20 m, 16 m oraz 12 m; załącznik krajowy nie podaje zalecanej klasy dla wysokości h_m ,
- rozpiętość stropów opartych na ścianach nie jest większa niż 7,0 m,
- rozpiętość dachów opartych na ścianach nie jest większa niż 7,0 m, z wyjątkiem dachów z lekkich elementów kratownicowych, których rozpiętość nie powinna przekraczać 14,0 m,
- wysokość kondygnacji w świetle nie jest większa niż 3,2 m, z wyjątkiem budynków o całkowitej wysokości nie większej niż 7,0 m, w których wysokość w świetle kondygnacji parteru może wynosić 4,0 m,
- obciążenie charakterystyczne zmienne na stropie i dachu nie jest większe niż 5,0 kN/m²,
- ściany są 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 odpowiedni sposób, np. za pomocą wieńca o odpowiedniej sztywności,
- ściany na poszczególnych kondygnacjach znajdują się w jednej płaszczyźnie,
- stropy i dach opierają się na ścianie za pomocą wieńców o szerokości równej co najmniej 0,4 grubości ściany i nie mniej niż 75 mm,
- końcowa wartość współczynnika pełzania dla muru ϕ_{∞} jest nie większa niż 2,0,

- grubość ściany i wytrzymałość muru na ściskanie należy sprawdzać na każdej kondygnacji, chyba że są takie same na wszystkich kondygnacjach.

Dla ścian stanowiących skrajną podporę stropów uproszczoną metodę obliczania można stosować tylko w przypadku, gdy rozpiętość stropu l_f jest nie większa niż:

$$7,0 \text{ m przy } N_{Ed} \leq k_G \cdot t \cdot b \cdot f_d \quad (5.1)$$

lub jest równa mniejszej z wartości

$$4,5 + 10 t \text{ (w m) i } 7,0 \text{ m, gdy } f_d > 2,5 \text{ N/mm}^2 \quad (5.2)$$

lub

$$4,5 + 10 t \text{ (w m) i } 6,0 \text{ m, gdy } f_d \leq 2,5 \text{ N/mm}^2 \quad (5.3)$$

gdzie:

- N_{Ed} - pionowe obciążenie obliczeniowe na rozpatrywanym poziomie,
- t - rzeczywista grubość ściany lub warstwy nośnej ściany szczelinowej stanowiącej skrajną podporę stropu, w metrach,
- b - szerokość, na której przyłożone jest obciążenie,
- f_d - wytrzymałość obliczeniowa muru na ściskanie,
- k_G - współczynnik równy 0,2 dla grupy 1 elementów murowych oraz 0,1 dla grupy 2, grupy 3 i grupy 4 elementów murowych.

Ściany stanowiące skrajną podporę stropów lub konstrukcji dachowych, poddane jednocześnie obciążeniu wiatrem, należy obliczać zgodnie z p. 6.1, jeżeli spełniony jest warunek (5.4):

$$t \geq \frac{c_1 q_{Ewd} b h^2}{N_{Ed}} + c_2 h \quad (5.4)$$

gdzie:

- h - wysokość kondygnacji w świetle;
- q_{Ewd} - obciążenie obliczeniowe wiatrem na jednostkę powierzchni ściany;
- N_{Ed} - pionowe obciążenie obliczeniowe wywierające najbardziej niekorzystny wpływ na górnej krawędzi ściany rozpatrywanej kondygnacji;
- b - szerokość, na której przyłożone jest obciążenie;
- t - rzeczywista grubość ściany lub warstwy nośnej ściany szczelinowej stanowiącej skrajną podporę stropu;
- α - współczynnik równy $N_{Ed} / (t \cdot b \cdot f_d)$
- c_1, c_2 - stałe wg Tablicy 5.1.

Tablica 5.1. Stałe c_1 i c_2 wg PN-EN 1996-3, tabl. 4.1

α	c_1	c_2
0,05	0,12	0,017
0,10	0,12	0,019
0,20	0,14	0,022
0,30	0,15	0,025
0,50	0,23	0,031
UWAGA Dopuszcza się interpolację liniową.		

5.1. Ściana obciążona pionowo

Dla ściany poddanej obciążeniu pionowemu sprawdza się następujący warunek:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (5.5)$$

gdzie:

N_{Ed} – pionowe obciążenie obliczeniowe;

N_{Rd} – nośność obliczeniowa ściany z uwagi na obciążenia pionowe, ze wzoru (5.6):

$$N_{Rd} = \Phi_s \cdot f_d \cdot A \quad (5.6)$$

gdzie:

Φ_s – współczynnik redukcyjny nośności uwzględniający wpływ smukłości oraz mimośrodów obciążenia;

f_d – wytrzymałość obliczeniowa muru na ściskanie;

A – przekrój poprzeczny obciążonej ściany.

Współczynnik redukcyjny nośności Φ_s dla ścian wewnętrznych zaleca się wyznaczać ze wzoru (5.7):

$$\Phi_s = 0,85 - 0,0011 \left(\frac{h_{ef}}{t_{ef}} \right)^2 \quad (5.7)$$

Dla ścian stanowiących końcowe podparcie stropów, wartość Φ_s zaleca się wyznaczać jako mniejszą z wartości uzyskanych ze wzoru (5.7) lub (5.8):

$$\Phi_s = 1,3 - \frac{l_{f,ef}}{8} \leq 0,85 \quad (5.8)$$

Dla ścian najwyższej kondygnacji stanowiących skrajną podporę stropu lub dachu, za wartość Φ_s zaleca się przyjmować mniejszą z wartości uzyskanych ze wzorów (5.7), (5.8) oraz (5.9):

$$\Phi_s = 0,4 \quad (5.9)$$

gdzie:

h_{ef} – wysokość efektywna ściany, patrz wzór (5.15),

t_{ef} – grubość efektywna dla ściany jednowarstwowej

$$t_{ef} = t,$$

$l_{f,ef}$ – rozpiętość efektywna stropu stanowiącego skrajną podporę ściany wyznaczana jako:

$$l_{f,ef} = l_f \text{ dla stropu swobodnie podpartego,}$$

$$l_{f,ef} = 0,7 l_f \text{ dla stropu ciągłego,}$$

$$l_{f,ef} = 0,7 l_f \text{ dla stropu swobodnie podpartego,}$$

rozpiętego w 2 kierunkach, gdzie długość podparcia rozpatrywanej ściany jest nie większa niż $2 l_f$,

$$l_{f,ef} = 0,5 l_f \text{ dla stropu ciągłego rozpiętego w 2 kierunkach, gdzie długość podparcia rozpatrywanej ściany jest nie większa niż } 2 l_f,$$

Φ_s – współczynnik redukcji nośności uwzględniający efekt wybożenia, mimośród początkowy, mimośród przyłożenia obciążenia i wpływ pełzania.

Maksymalna smukłość ścian h_{ef}/t_{ef} nie powinna przekraczać 27.

Dla budynków o wysokości nie większej niż 3 kondygnacje w załączniku A normy PN-EN 1996-3:2010 podano metodę obliczania niezbrojonych ścian murowych, zawierającą dodatkowe uproszczenia. Metodę tę można stosować, jeżeli spełnione są następujące warunki:

- 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 $5,0 \text{ kN/m}^2$,
- 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.

Nośność obliczeniową ściany na działanie obciążenia pionowego N_{Rd} , można obliczyć ze wzoru:

$$N_{Rd} = c_A \cdot f_d \cdot A$$

gdzie:

c_A – wynosi 0,50, jeżeli $h_{ef}/t_{ef} \leq 18$,

c_A – wynosi 0,36, jeżeli $18 < h_{ef}/t_{ef} \leq 21$,

f_d – wytrzymałość obliczeniowa muru na ściskanie,

A – przekrój poprzeczny ściany, z pominięciem wszystkich otworów.

5.2. Ściana obciążona siłą skupioną

Nośność obliczeniową ściany poddanej obciążeniu skupionemu N_{Rdc} , wyznaczyć można metodą uproszczoną pod następującymi warunkami:

- powierzchnia oddziaływania obciążenia skupionego nie przekracza 1/4 powierzchni przekroju poprzecznego ściany oraz wartości $2t^2$, gdzie t jest grubością ściany,
 - mimośród przyłożenia obciążenia względem osi ściany jest nie większy niż $t/4$,
 - nośność ściany w przekroju usytuowanym w środku jej wysokości sprawdza się zgodnie z p. 6.1, przyjmując, że obciążenie skupione rozkłada się pod kątem 60° .
- Nośność obliczeniową N_{Rdc} wyznacza się:
- ze wzoru (5.10), dla murów wykonanych z elementów murowych grupy 1.,
 - ze wzoru (5.11), dla murów wykonanych z elementów murowych grupy 2., 3. lub 4.:

$$N_{Rdc} = f_d \left(1.2 + 0.4 \frac{a_1}{h_c} \right) A_b$$

$$\text{lecz nie więcej niż } 1.5 f_b A_b \quad (5.10)$$

$$N_{Rdc} = f_d \cdot A_b \quad (5.11)$$

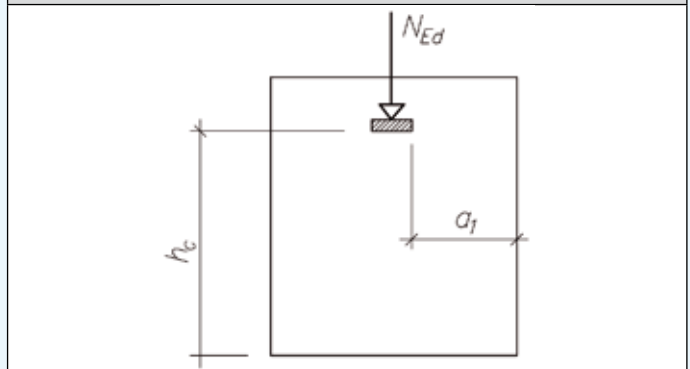
gdzie:

a_1 – odległość od krawędzi ściany do najbliższej krawędzi pola oddziaływania obciążenia skupionego (patrz rys. 5.1),

h_c – wysokość ściany do poziomu obciążenia (patrz rys. 6.1.),

A_b – pole oddziaływania obciążenia skupionego.

Rys. 5.1. Ściana poddana obciążeniu skupionemu w uproszczonej metodzie obliczeń wg PN-EN 1996-3:2010



5.3. Ściana ścinana

Dla ściany poddanej ścinaniu należy spełnić warunek:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (5.12)$$

gdzie:

V_{Ed} – siła ścinająca w ścianie, wywołana obciążeniem obliczeniowym,

V_{Rd} – nośność obliczeniowa ściany na ścinanie.

Nośność obliczeniową ściany na ścinanie V_{Rd} wyznacza się ze wzoru (5.13):

$$V_{Rd} = c_v \left[\frac{l}{2} - e_{Ed} \right] t f_{vdo} + 0.4 \frac{N_{Ed}}{\gamma_M} \leq 3 \left[\frac{l}{2} - e_{Ed} \right] t f_{vdu} \quad (5.13)$$

gdzie:

c_v – współczynnik równy 3 dla muru z wypełnionymi spoinami pionowymi lub 1.5 dla muru z niewypełnionymi spoinami pionowymi,

l – długość ściany w kierunku jej zginania,

e_{Ed} – mimośród ściskającego obciążenia w rozpatrywanym przekroju poprzecznym, nie mniej niż $l/6$,

M_{Ed} – moment obliczeniowy w rozpatrywanym przekroju poprzecznym,

N_{Ed} – obciążenie obliczeniowe ściskające w rozpatrywanym przekroju poprzecznym,

t – grubość ściany,

f_{vdo} – początkowa wytrzymałość obliczeniowa muru na ścinanie równa wartości f_{vko} podzielonej przez γ_M ,

f_{vdu} – wytrzymałość obliczeniowa muru na ścinanie.

Równanie (5.13) stosuje się pod następującymi warunkami:

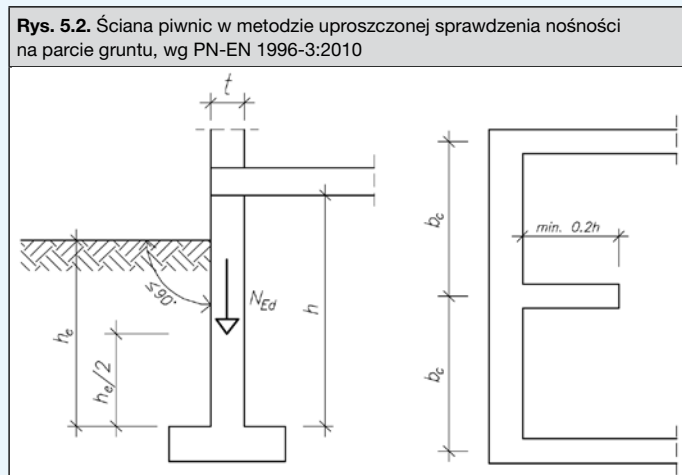
- mur nie jest wykonywany ze spoinami pasmowymi,
- zaprawa jest: zaprawą zwykłą, zaprawą do cienkich spoin o grubości 0,5 mm do 3,0 mm lub zaprawą lekką zgodnie z EN 998-2,
- ściskające obciążenie obliczeniowe spełnia warunek:

$$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot l \cdot t \cdot f_d \quad (5.14)$$

5.4. Ściana piwnic obciążona parciem gruntu

Uproszczoną metodą obliczania ścian piwnic podanych poziomemu parciu gruntu (rys. 5.2.) można posługiwać się w przypadku, kiedy spełnione są następujące warunki:

- wysokość ściany w świetle wynosi $h \leq 2,6$ m, a grubość ściany $t \geq 200$ mm,
- strop nad piwnicą zachowuje się jak przepona i jest w stanie przenieść siły będące efektem działania parcia gruntu,
- obciążenie charakterystyczne naziomu na obszarze wpływu parcia gruntu na ścianę nie przekracza 5 kN/m^2 , a obciążenie skupione przyłożone w odległości nie większej niż $1,5$ m od ściany nie przekracza 15 kN ,
- poziom gruntu i głębokość zasypania nie przekraczają wysokości ściany,
- na ścianę nie działa parcie hydrostatyczne,
- nie występuje płaszczyzna poślizgu, na przykład na izolacji przeciwwodnej, lub podjęto środki dla przeniesienia sił ścinających.



Dla obciążonej parciem gruntu ściany piwnic należy spełnić następujące warunki:

$$N_{Ed,max} \leq \frac{t b f_d}{3}$$

$$N_{Ed,min} \geq \frac{\rho_e b h h_e^2}{\beta t}$$

gdzie:

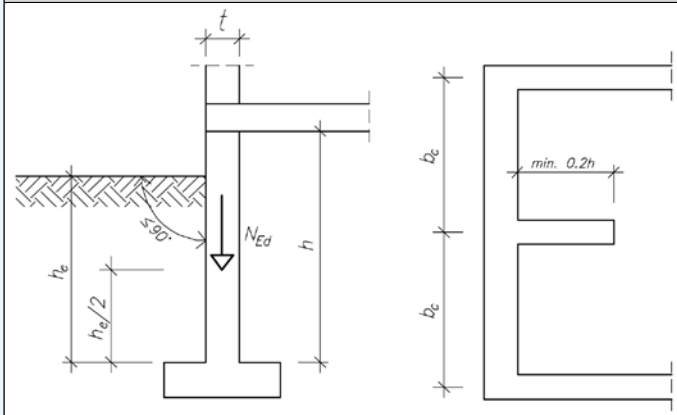
- $N_{Ed,max}$ – pionowe obciążenie obliczeniowe ściany w połowie wysokości zasypania ściany, wywołujące najbardziej niekorzystny wpływ,
- $N_{Ed,min}$ – pionowe obciążenia obliczeniowe ściany w połowie wysokości zasypania ściany, wywołujące najmniej niekorzystny wpływ,
- b – szerokość ściany,
- b_e – odległość ścian poprzecznych lub innych elementów podpierających,
- h – wysokość ściany w świetle,
- h_e – wysokość ściany pod powierzchnią gruntu,
- t – grubość ściany,
- ρ_e – gęstość objętościowa gruntu,
- f_d – wytrzymałość obliczeniowa muru na ściskanie,
- β – współczynnik o wartości:
 - $\beta = 20$ gdy $b_e \geq 2h$,
 - $\beta = 60 - 20b_e/h$ gdy $h < b_e < 2h$,
 - $\beta = 40$ gdy $b_e < h$.

6. Przykład obliczeniowy

Należy sprawdzić nośność muru wg normy PN-EN 1996-1-1:2010 dla następujących założeń (rys. 6.1.):

- układ konstrukcyjny kilkukondygnacyjny, powtarzalny, wysokość kondygnacji w osiach stropów $3,0$ m;
- grubość muru: 38 cm; charakterystyczny ciężar objętościowy muru 18 kN/m^3 , współczynnik γ_g dla obciążenia obliczeniowego: $\gamma_g = 1,35$;
- sprawdzany mur: wewnętrzny, z obustronnie opartymi na nim płytami stropowymi;
- mur z cegły pełnej klasy 15 na zaprawie $M5$, na zwykłych spoinach;
- stropy żelbetowe o grubości 16 cm, beton $C25/30$;
- rozpiętość przęseł stropu: z lewej strony muru $3,5$ m, z prawej strony $6,0$ m;
- maksymalne całkowite obciążenie stropów: $12,0 \text{ kPa}$;
- minimalne całkowite obciążenie stropów: $6,0 \text{ kPa}$;
- mur jest obciążony siłą z wyższych kondygnacji oraz reakcjami ze stropów o łącznej wartości 400 kN/m oraz ciężarem własnym.

Rys. 6.1. Układ geometryczny powtarzalnej kondygnacji budynku z analizowaną ścianą wewnętrzną (obszar zakreślony)



Klasa elementów murowych: 15, $f_b = 15$ MPa
 Elementy murowe grupy 1, współczynnik $K = 0,45$
 Klasa zaprawy 5, $f_m = 5$ MPa
 Wytrzymałość charakterystyczna muru na ściskanie

$$f_k = K \cdot f_b^{0.70} \cdot f_m^{0.30} = 0,45 \cdot 15^{0.70} \cdot 5^{0.30} = 4,85 \text{ MPa}$$

Moduł sprężystości muru

$$E = 1000 f_k = 1000 \cdot 4,85 = 4850 = 4,85 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

Przyjęto według tablicy NA.1:

- elementy murowe kategorii II;
- klasa wykonania robót B;
- częściowy współczynnik bezpieczeństwa $\gamma_M = 2.5$;

Dla pola przekroju poprzecznego muru $> 0.30 \text{ m}^2$
 współczynnik zmniejszający $\gamma_{Rd} = 1,0$.

Wytrzymałość obliczeniowa muru na ściskanie:

$$f_d = f_k / \gamma_M = 4,85 / 2,5 = 1,94 \text{ MPa}$$

Poniżej podano procedurę wyznaczenia momentów zginających na dolnej i na górnej krawędzi ściany:

Beton stropów C25/30, wg PN-EN 1992-1-1 moduł sprężystości $E_{cm} = 32 \text{ GPa}$

Momenty bezwładności:

- stropów: $J = bh^3/12 = 1,0 \cdot 0,16^3/12 = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$;
- muru: $J = bh^3/12 = 1,0 \cdot 0,38^3/12 = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$.

Przyjęto wartości współczynników $n = 4$, jak dla prętów obustronnie zamocowanych.

Wartości cząstkowe wzoru C.1:

■ dla murów:

$$\frac{n_1 E_1 I_1}{h_1} = \frac{n_2 E_2 I_2}{h_2} = \frac{n_7 E_7 I_7}{h_7} = \frac{4 \cdot 4,85 \cdot 10^3 \cdot 4,6 \cdot 10^{-3}}{3,0} = 29,7$$

■ dla stropów:

$$\frac{n_3 E_3 I_3}{h_3} = \frac{n_5 E_5 I_5}{h_5} = \frac{4 \cdot 32 \cdot 10^3 \cdot 3,4 \cdot 10^{-4}}{6,0} = 7,3$$

$$\frac{n_4 E_4 I_4}{h_4} = \frac{n_6 E_6 I_6}{h_6} = \frac{4 \cdot 32 \cdot 10^3 \cdot 3,4 \cdot 10^{-4}}{3,5} = 12,4$$

Największe momenty w węzłach górnym i dolnym ściany wystąpią wtedy, gdy przeszło stropu o większej rozpiętości (6.0 m) zostanie mocniej obciążone ($q = 12.0 \text{ kPa}$), a przeszło stropu o mniejszej rozpiętości (3.5 m) zostanie słabiej obciążone ($q = 6.0 \text{ kPa}$), a zatem:

$$M_1 = \frac{\frac{n_1 E_1 I_1}{h_1}}{\frac{n_1 E_1 I_1}{h_1} + \frac{n_2 E_2 I_2}{h_2} + \frac{n_3 E_3 I_3}{h_3} + \frac{n_4 E_4 I_4}{h_4}} \left[\frac{w_3 l_3^2}{4(n_3 - 1)} - \frac{w_4 l_4^2}{4(n_4 - 1)} \right]$$

$$M_1 = \frac{29,7}{29,7+29,7+7,3+12,4} \left[\frac{12,0 \cdot 6,0^2}{4(4-1)} - \frac{6,0 \cdot 3,5^2}{4(4-1)} \right] = 11,2 \text{ kNm/m}$$

Ponieważ rozpiętości, obciążenia i sztywności prętów modelu ramowego, schodzących się w górnym i w dolnym węźle ściany są jednakowe, należy przyjąć, że momenty przekazywane ze stropów na obie krawędzie ściany są jednakowe, ale różnią się znakiem (jak na rys. 4.1):

$$M_1 = 11,2 \text{ kNm}$$

$$M_2 = -11,2 \text{ kNm}$$

Współczynnik redukcyjny η w węźle górnym:

$$k_m = \frac{\frac{n_3 E_3 I_3}{h_3} + \frac{n_4 E_4 I_4}{h_4}}{\frac{n_1 E_1 I_1}{h_1} + \frac{n_2 E_2 I_2}{h_2}} = \frac{7,3+12,4}{29,7+29,7} = 0,33 \leq 2$$

$$\eta = 1 - 0,33/4 = 0,92$$

Ze względu na to, że wartości cząstkowe wzoru na k_m w węźle dolnym ściany są jednakowe jak w węźle górnym, wartość współczynnika η dla dolnej krawędzi ściany wyniesie również 0,92.

Zredukowane wartości momentów M_1 i M_2 :

$$|M_1| = |M_2| = 0,92 \cdot 11,2 = 10,3 \text{ kNm/m}$$

Wysokość efektywna ściany:

$h_{ef} = \rho_n h$; dla ścian utwierdzonych na górnej i na dolnej krawędzi przez stropy żelbetowe $\rho_n = \rho_2 = 0,75$, zatem $h_{ef} = 0,75(3,0 - 0,16) = 2,13 \text{ m}$

Mimośrod u góry i u dołu ściany:

- mimośród od sił poziomych $e_{he} = 0$ (ściana nie-obciążona wiatrem);
- mimośród początkowy, $e_{init} = h_{ef}/450 = 213/450 = 0,5 \text{ cm}$;
- mimośród u góry ściany:

$$e_1 = \frac{M_{1d}}{N_{1d}} + e_{he} + e_{init} = \frac{10,3}{400} + 0 + 0,005 = 0,03 \text{ m} \geq 0,05t$$

$$= 0,05 \times 0,38 = 0,02 \text{ m};$$

- ciężar muru z 1 kondygnacji: $0,38 \cdot (3,0 - 0,16) \cdot 18,0 \cdot 1,35 = 26 \text{ kN/m}$
- mimośród u dołu ściany (do wartości N_{1d} dodano ciężar własny muru, 26 kN/m):

$$e_2 = \frac{M_{2d}}{N_{2d}} + e_{he} + e_{init} = \frac{10,3}{400+26} + 0 + 0,005 =$$

$$= 0,03 \text{ m} \geq 0,05t = 0,02 \text{ m};$$

Mimośród w środku ściany:

- mimośród od sił poziomych $e_{hm} = 0$ (ściana nie-obciążona wiatrem);
- mimośród początkowy, $e_{init} = 0,5 \text{ cm}$, jw.;
- moment w środku wysokości ściany M_{md} , wynikający z momentów obciążających górną i dolną krawędź ściany; ponieważ momenty obciążające górną i dolną krawędź ściany są jednakowe co do wartości, ale różnią się znakiem, $M_{md} = 0$;
- siła pionowa w połowie wysokości ściany N_{md} , $N_{md} = 400 + 13 = 413 \text{ kN/m}$ (do wartości N_{1d} dodano ciężar własny muru z połowy wysokości kondygnacji, $26/2 = 13 \text{ kN/m}$);
- mimośród działania obciążenia:

$$e_m = \frac{M_{md}}{N_{md}} + e_{hm} + e_{init} = \frac{0}{400+13} + 0 + 0,005 = 0,005 \text{ m}$$

- mimośród wywołany przez pełzanie:

$$e_k = 0,002\varphi_{\infty} \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \sqrt{te_m} = 0,002 \cdot 1 \cdot \frac{2,13}{0,38} \sqrt{0,38 \cdot 0,005} = 0,0005 \text{ m}$$

- mimośród w połowie wysokości ściany:

$$e_{mk} = e_m + e_k = 0,005 + 0,0005 = 0,0055 \text{ m} < 0,05t = 0,05 \cdot 0,38$$

$$= 0,02 \text{ m}, \text{ przyjęto zatem: } e_{mk} = 0,02 \text{ m}$$

Współczynnik redukcyjny na górnej krawędzi ściany:

$$\phi_1 = 1 - \frac{2e_1}{t} = 1 - \frac{2 \cdot 0,03}{0,38} = 0,84$$

Współczynnik redukcyjny na dolnej krawędzi ściany:

$$\phi_2 = 1 - \frac{2e_2}{t} = 1 - \frac{2 \cdot 0,03}{0,38} = 0,84$$

Nośność muru na górnej krawędzi:

$$N_{1Rd} = \phi_1 t f_d = 0,84 \cdot 0,38 \cdot 1,94 \cdot 103 = 619 \text{ kN/m} > N_{1d} = 400 \text{ kN/m}, \text{ nośność ściany jest wystarczająca}$$

Nośność muru na dolnej krawędzi:

$$N_{2Rd} = \phi_2 t f_d = 0,84 \cdot 0,38 \cdot 1,94 \cdot 103 = 619 \text{ kN/m} > N_{2d} = 426 \text{ kN/m}, \text{ nośność ściany jest wystarczająca}$$

Współczynnik A_1 :

$$A_1 = 1 - 2 \frac{e_{mk}}{t} = 1 - 2 \frac{0,02}{0,38} = 0,89$$

Współczynnik U :

$$u = \frac{\frac{h_{ef}}{t_{ef}} - 2}{23 - 37 \frac{e_{mk}}{t}} = \frac{\frac{2,13}{0,38} - 2}{23 - 37 \frac{0,02}{0,38}} = 0,22$$

Współczynnik redukcyjny Φ_m w środku ściany:

$$\Phi_m = A_1 e^{-\frac{u^2}{2}} = 0,89 e^{-\frac{0,22^2}{2}} = 0,87$$

Nośność muru w środku wysokości:

$$N_{mRd} = \Phi_m t f_d = 0,87 \cdot 0,38 \cdot 1,94 \cdot 103 = 641 \text{ kN/m} > N_{md} = 413 \text{ kN/m}, \text{ nośność ściany jest wystarczająca.}$$