

# Szacowanie nośności murów istniejących obciążonych sejsmicznie z płaszczyzny – przegląd norm i standardów

Capacity assessment of existing masonry walls undergoing out-of-plane seismic actions – review of chosen standards and codes

dr inż. Marcin Szyszka (ORCID: 0009-0006-2961-8703), Katedra Budownictwa Ogólnego, Politechnika Wrocławska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1337

**Streszczenie:** W artykule dokonano przeglądu wybranych norm i standardów w zakresie nośności murów istniejących, obciążonych sejsmicznie z płaszczyzny. Szczególny nacisk położono na podane metody szacowania parametrów wytrzymałościowych muru, zalecenia dotyczące badań i inspekcji oraz konsekwencje przyjętego stopnia szczegółowości diagnostyki obiektów. Analizie poddano również kompletność zaleceń i ich wykonalność z inżynierskiego punktu widzenia. Skonfrontowano również zapisy normowe z dostępnymi wynikami badań doświadczalnych i opracowanych na ich podstawie wniosków.

**Słowa kluczowe:** mury istniejące, nośność muru z płaszczyzny ściany, obciążenia sejsmiczne, normy i standardy, wytyczne normowe

**Abstract:** Article presents overview of chosen standards and codes in terms of seismic out-of-plane capacity of existing masonry walls. Particular attention was paid to methods of assessment of mechanical parameters, guidelines regarding testing and inspection, and consequences of diagnostics level. Also the completeness and feasibility of provided recommendations in terms of engineering practice is discussed. Standards are also confronted with available experimental data and scientific conclusions.

**Keywords:** existing walls, load-bearing capacity of the wall from the wall plane, seismic loads, norms and standards, standard guidelines.

## 1. Wprowadzenie

Analiza mechaniki murów istniejących w aspekcie lokalnym, to jest ich zachowanie pod wpływem obciążeń prostopadłych do płaszczyzny, było zaniebawiane przez wiele dekad. Działo się to zarówno na płaszczyźnie naukowej, jak i inżynierskiej. Dopiero w ciągu ostatniego dziesięciolecia nastąpiły istotne zmiany w tym aspekcie. Poniżej przedstawione są zapisy z wybranych norm.

## 2. Eurokody

Projektowanie ścian na obciążenia prostopadłe do ich płaszczyzny jest przedstawione w pakiecie szóstym [1] wraz z pozostałymi częściami. W kontekście badanej tematyki pojawiają się dwa fundamentalne problemy: (1) pakiet ten dotyczy wyłącznie nowych konstrukcji, a podana w normie definicja muru oraz wymogi co do technologii jego wykonania wyklucza wiele z istniejących murów; (2) nie służy on do wymiarowania konstrukcji pod wpływem oddziaływań

sejsmicznym. Pakiet ten zatem nie daje możliwości oceny odporności murów historycznych pod wpływem oddziaływań prostopadłych do płaszczyzny muru.

Obciążeń sejsmicznych dotyczy pakiet ósmy. Do konstrukcji murowych odnosi się część (2) zawierająca zasady ogólne wymiarowania konstrukcji oraz część (3) dotycząca szacowania odporności sejsmicznej i wzmacniania obiektów istniejących. Pierwsza z wymienionych części nie podaje metody wyznaczania nośności muru z płaszczyzny pod obciążeniem sejsmicznym, nie wspomina również o metodach obliczeniowych podawanych w pakiecie szóstym. Część (3) również nie podaje żadnej metody obliczeniowej, która pozwalałaby na wyznaczenie odporności muru w kierunku prostopadłym do jego płaszczyzny. Jedynie Załącznik C normy porusza ten temat w punkcie C2.4v. zalecając: identyfikację obecności/jakości zaprawy, obecności pustek wewnątrz ścian, w przypadku ścian wielowarstwowych z rdzeniem należy określić obecność, zasięg i rozstaw więzów. Norma nie określa jednak, jak te informacje przełożyć na wartości liczbowe.

**Rys. 1.** Kolysząca się ściana jednokierunkowa z obecnością dryfu pomiędzy piętami [6]

Prawdopodobnie kolejna odsłona pakietu ósmego skoryguje/uzupełni opisane braki [4].

### 3. Norma kanadyjska

Norma [5] nie odnosi się do istniejących konstrukcji murowych. Jeśli chodzi o projektowanie nowych konstrukcji na obciążenie prostopadłe do płaszczyzny, to opiera się na zasadach zbliżonych do Eurokodu.

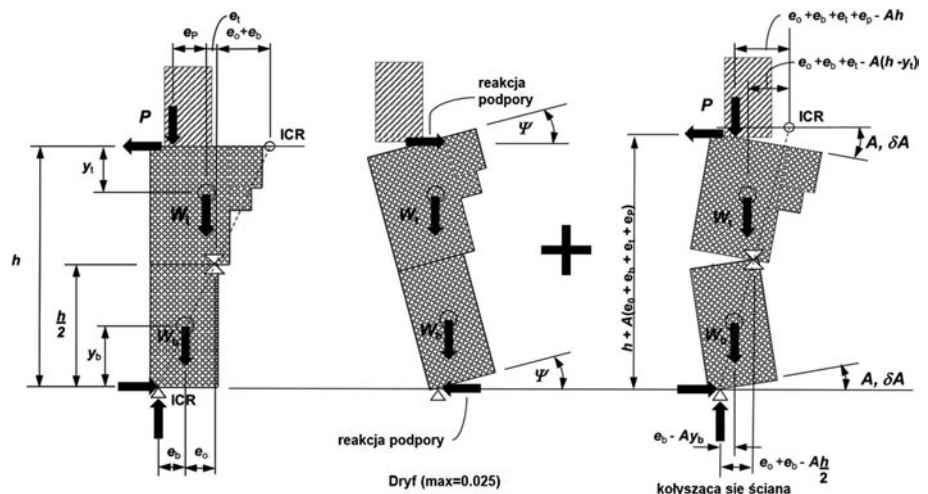
### 4. Norma australijska

Norma [6] nie odnosi się do istniejących konstrukcji murowych. W kwestii projektowania nowych ścian, wyróżnia ją sposób wyznaczania nośności momentowej w zginaniu poziomym oraz podejście do zginania dwukierunkowego. W pierwszej kwestii australijska norma uwzględnia: rozstaw spoin pionowych, wytrzymałość budulca na rozciąganie przy zginaniu poziomym oraz zniszczenie zaprawy w spoinach pionowych. Zginanie dwukierunkowe opiera się na pracy [7] i bierze pod uwagę stopień utwierdzenia ścian, obecność otworów, nośność w zginaniu ukośnym oraz geometrię budulca i spoin.

### 5. Norma nowozelandzka

Prawodawstwo [8] uznaje, wytyczne dedykowane szacowaniu nośności istniejących konstrukcji [9], w tym murowych [10, 11]. Wytyczne te, w przypadku obiektów historycznych, odnoszą się do zasad nowozelandzkiej karty ICOMOS [12]. Istotną rolę odgrywa definicja tzw. budynku podatnego na trzęsienie ziemi – EPB (ang. *Earthquake Prone Building*). Określenie, czy budynek lub jego część zalicza się do EPB, odbywa się na podstawie wstępnej analizy jakościowej ISA (ang. Initial Seismic Assessment) opartej na przyznawaniu punktów w zależności od cech określonych elementów budynku [13]. Historyczne konstrukcje murowe zazwyczaj z definicji można zaliczać do EPB, wówczas stosuje się wyodrębnioną część poświęconą niezbrojonym obiektom murowym [10]. Podany jest szczegółowy algorytm postępowania przy określaniu globalnej nośności obiektów, w tym domów szeregowych.

Zginanie poziome oraz dwukierunkowe omówione są zdawkowo i głównie w odniesieniu do wspomnianej już normy australijskiej [6]. Znacznie więcej uwagi poświęcono zginaniu pionowemu ścian jednokierunkowych, wspornikowych



oraz ścian szczytowych. Zezwala się na stosowanie analizy sił, jednakże szeroko opisane jest zastosowanie analizy przemieszczeń z uwzględnieniem nieliniowości (nieliniowa analiza kinematyczna) – rysunek 1.

W zakresie badań materiałowych, poza typowymi badaniami normowymi, wskazane są praktyczne wytyczne oceny parametrów wytrzymałościowych cegieł i zapraw na podstawie łatwości ich zarysowania i skruszenia. Norma zauważa problem murów wielowarstwowych – „ściany wielowarstwowe, w przypadku obciążeń prostopadłych do ich płaszczyzny, mogą być traktowane jako monolit, jeśli: (1) wszystkie warstwy są przewiązane ze sobą główkami co najmniej co cztery warstwy, regularnie wzdłuż muru; (2) badania lub dedykowane studium potwierdzają zdolność warstw do pracy monolitycznej w innym razie należy traktować warstwy jako działające osobno.”

### 6. Norma amerykańska

Standard [14] dotyczy szacowania nośności istniejących budynków, w tym murowanych, przed i po wzmocnieniu. Zapisy dotyczą murów ceglanych oraz z blozków betonowych, przy czym można je ekstrapolować na mury kamienne (przy wprowadzeniu badań). Dokument dużo miejsca poświęca samemu procesowi szacowania nośności w funkcji wybranej kategorii zachowania budynku. Rozróżnia się trójstopniową analizę. Wyszczególnione są cechy charakterystyczne dla obiektów murowanych i wynikające z nich konsekwencje w kontekście inspekcji oraz obliczeń. W przypadku ścian obciążonych z płaszczyzny, szczególny nacisk położony jest na ich łączenia ze stropami. Podane są również normy/dokumenty dotyczące obiektów historycznych, do których można się odnosić, przykładowo: [15].

Standard pozwala traktować ściany wielowarstwowe jako monolit pod warunkiem, że spoina wzdłużna jest wypełniona zaprawą co najmniej w 50%. Nie ma sprecyzowanych wymogów co do jakości zaprawy. Nie ma odniesienia do obecności więzów czy też ich rozmieszczenia. Norma nie

przywołuje prac/programów badawczych w oparciu, o które zostały określone powyższe wymogi.

Nośność ścian obciążonych sejsmicznie prostopadle do ich płaszczyzny może być określana tylko metodami dynamicznymi. W przypadku stanu granicznego dopuszczającego natychmiastowe użytkowanie obiektu po działaniu obciążenia, nie dopuszcza się powstawania pęknięcia ścian od zginania. Dla stanu granicznego odnoszącego się do zagrożenia ludzkiego życia pęknięcia są dopuszczone pod warunkiem, że wykształcony mechanizm jest stabilny podczas odpowiedzi dynamicznej. Stabilność ta powinna zostać określona za pomocą całkowania równań ruchu z uwzględnieniem odpowiednich akcelerogramów dla obu stropów podpierających. Dla stanu granicznego „prewencja przed destrukcją” podano wartości graniczne smukłości ścian, poniżej których nie są konieczne dodatkowe obliczenia. Po szczegóły standard odsyła do pracy [16].

## 7. Norma i rozporządzenia włoskie

We Włoszech funkcjonuje norma krajowa NTC [17] wraz z obszernym komentarzem [18], które pozwalają na projektowanie konstrukcji budowlanych oraz szacowanie nośności już istniejących. Norma NTC jest nadrzędna względem Eurokodów. W przypadku obiektów dziedzictwa kulturowego wprowadzony jest ponadto dokument – DPCM [19]. DPCM i NTC odwołują się do siebie wzajemnie.

NTC rozróżnia analizę globalną i lokalną konstrukcji oraz ustanawia hierarchię na korzyść tej drugiej. Stąd też norma wiele uwagi poświęca mechanice muru obciążonego prostopadle do jego płaszczyzny. Należy zaznaczyć, iż jest to dokładnie odwrotny ciąg logiczny względem poprzedniej edycji tej normy. Zmiana ta wynika z faktu, iż lokalne mechanizmy zniszczenia są bardzo kosztowne zarówno z punktu widzenia życia ludzkiego, jak i utraty mienia. Stąd, zajmując się problemami lokalnymi, możliwe jest znaczne zwiększenie bezpieczeństwa konstrukcji murowanej przy relatywnie niewielkich nakładach finansowych. W konsekwencji nacisk położony jest na rzetelną i świadomą inspekcję analizowanych obiektów.

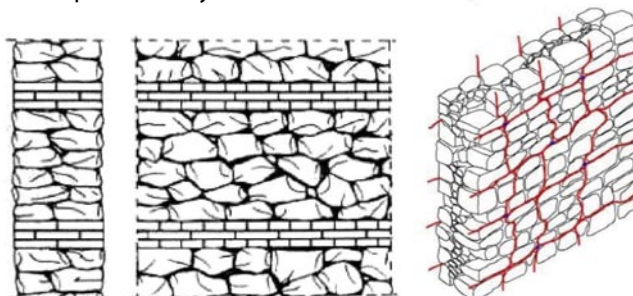
Norma podaje metody niszczące i nieniszczące pozwalające określić poszczególne parametry mechaniczne muru. Ponadto, w normie rozróżnionych jest osiem typów ścian murowanych, wraz z podanymi wartościami (dolnymi i górnymi) parametrów mechanicznych. Podane są współczynniki korekcyjne dla tych parametrów w zależności od czynników, takich jak jakość zaprawy, regularne przemurowania, więzy oraz współczynniki korekcyjne dla różnych metod wzmocnienia murów (rys. 2).

W kwestii więzów norma odnosi się do ich „odpowiedniego” zagęszczenia i jakości, jednakże nie podaje metody oceny ilościowej. Ponadto powyższe parametry mechaniczne dotyczą jedynie pracy muru w jego płaszczyźnie. Co do zachowania murów wielowarstwowych pod wpływem obciążenia z płaszczyzny, podkreślona jest rola więzów i zalecane jest

postępowanie w razie ich braku lub niedostatecznej obecności – w zależności od jakości rdzenia muru, brana pod uwagę jest redukcja grubości efektywnej ściany lub osobne rozpatrywanie poszczególnych warstw. Brak wskazówek ilościowych do oceny efektywności więzów.

Nośność murów obciążonych prostopadle do ich płaszczyzny może być określana według analiz statycznych (analiza kinematyczna liniowa i nieliniowa) lub nieliniowej analizy dynamicznej. Statyczne opierają się o możliwe do realizacji mechanizmy ciał sztywnych, połączonych ze sobą w łańcuch kinematyczny za pomocą więzów wewnętrznych (przegubów, przegubów tarciovych, ściągów). Łańcuch ten połączony jest więzami z pozostałymi elementami konstrukcji. Warunkiem takiego postępowania jest monolityczność ścian. Następnie, zastosowanie ma teoria nośności granicznej według [20], poza pierwotnymi jej postulatami, NTC zezwala na mniej rygorystyczne zapisy: (1) poślizg pomiędzy blokami, z uwzględnieniem tarcia; (2) połączenia między ścianami, z ograniczoną nośnością; (3) obecność metalowych łączników i łańcuchów na styku ściany-strop i ściany-dach; (4) ograniczoną wytrzymałość muru na ściskanie; (5) uwzględnienie rozwarstwienia w ścianach wielowarstwowych.

W przypadku nieliniowej analizy dynamicznej norma dopuszcza stosowanie kompleksowych metod numerycznych pozwalających na analizę układów o wielu stopniach swobody lub układów o jednym stopniu swobody, z odpowiednio wprowadzonym tłumieniem.



**Rys. 2.** Regularne przemurowanie i zbrojenie spoin z kotwieniem w rozumieniu [17]

## 8. Norma niderlandzka

„Norma niderlandzka” są to nieobligatoryjne zalecenia, które są jedynie przedstawione w formie normy. Dokument ten [21], dotyczący projektowania i szacowania nośności konstrukcji na obciążenia sejsmiczne, pojawił się po raz pierwszy dopiero w 2015, w związku ze wstrząsami indukowanymi eksploatacjami gazu w północy-wschodniej Holandii. W zamyśle wydawcy jest on pierwszym krokiem w stronę krajowego załącznika do Eurokodu 8 [3].

W przypadku obiektów zabytkowych dokument nie gwarantuje, iż proponowane w nim rozwiązania są w zgodzie z krajowymi wymogami dotyczącymi dziedzictwa historycznego i kulturowego [22]. Zalecenia podają minimalne wartości wytrzymałości budulca i zaprawy, jeśli nie można ich



określić w żaden inny sposób. Nie jest poruszany temat ścian wielowarstwowych i wiązków. Nie ma też dodatkowego odniesienia do specyfiki ścian historycznych w [22].

Odporność ścian obciążonych prostopadłe do ich płaszczyzny może być określana na kilka sposobów. Pierwszy – to sprawdzenie minimalnej grubości muru oraz proporcji według tabeli 9.2 w Eurokodzie 8 [3]. Istotna jest deklaracja, iż można stosować te zapisy względem istniejących obiektów, w tym historycznych, czego brakuje w Eurokodzie 8. Kolejny – to założenia zawarte w Eurokodzie 6 [1]: wyznaczenie ciśnienia granicznego oraz równoważnego ciśnienia sejsmicznego. Ciśnienie graniczne zależy od położenia ściany, jej grubości, wyężenia osiowego oraz wartości pierwszej częstości własnej. Dokładniejsze metody rozróżniają ściany zginane jednokierunkowo poziomo oraz zginane pionowo i ukośnie. Zginanie pionowe wzorowane jest na normie nowozelandzkiej [11], różniąc się jedynie sposobami uwzględniania stropów.

W przypadku zginania poziomego i ukośnego dokument odwołuje się do aktualnych badań eksperymentalnych, które dla tych rodzajów zginania wskazują, iż nośność przed pęknięciem jest większa niż rezerwa po nim [23]. Dla zginania poziomego zalecenia rozróżniają zginanie ciągłe i schodkowe – odpowiednio linie 2 i 3 na rysunku 3. W zależności od postaci zniszczenia stosuje się dwa różne równania i wybiera to odpowiadające minimum. Równania zostały zaadaptowane wprost z pracy [24]. Zginanie ukośne (linia 4 na rysunku 3) oparte jest wprost na pracy [25] i metodzie tam podanej.

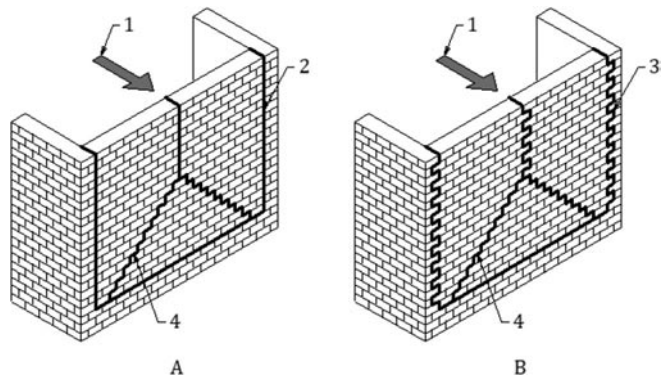
Możliwe jest wykorzystanie dynamicznej analizy nieliniowej w domenie czasu. Wymaga ona jednak bardzo dokładnego odwzorowania rzeczywistego obiektu, między innymi poprzez uwzględnienie sztywności i nośności połączeń, mimośrodków, sztywności stropów oraz ich interakcji ze ścianami.

## 9. Podsumowanie

Pomimo znacznego postępu jakościowego i merytorycznego poszczególnych norm w kontekście nośności istniejących murów obciążonych z płaszczyzny, nadal zauważalnych jest wiele braków i nieścisłości. Najistotniejszym mankamentem jest postępowanie w przypadku historycznych murów wielowarstwowych, w szczególności z niskiej jakości rdzeniem. Stosunkowo słabo uwzględniony jest wpływ efektu kołysania na nośność ścian.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] EN 1996-1-1 Eurocode 6: Design of Masonry Structures, Part 1-1, CEN, Brussels, 2005
- [2] EN 1998-1 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General, European Committee for Standardization, CEN, Brussels, 2004
- [3] EN 1998-3 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 3: Assessment, European Committee for Standardization, CEN, Brussels, 2005



**Rys. 3.** Rodzaje zniszczenia w zginaniu pionowym po wpływie obciążenia z płaszczyzny [21]

- [4] Lu S. et al., Next generation of Eurocode 8, masonry chapter, in Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges – Modena, da Porto & Valluzzi (Eds), London, 2016
- [5] CSA-5304.1-14, Design of masonry structures, Canadian Standard Association, Mississauga, 2019
- [6] AS 3700, Masonry structures, Standards Association of Australia, Homebush, 2011
- [7] Lawrence S. J. Marshall R. J., Virtual work design method for masonry panels under lateral load, in In Proceedings of 12th International Brick/Block Masonry Conference, Madrid, 2000
- [8] NZ Building Act, Building Act 2004, Ministry of Business, Innovation, and Employment, 2004
- [9] MBIE, The Seismic Assessment of Existing Buildings: Assessment Objectives and Principles, Min. of Business, Innovation and Employment, 2017
- [10] MBIE EPB, Unreinforced Masonry Buildings, Ministry of Business, Innovation and Employment, 2017
- [11] MBIE non-EPB, Unreinforced Masonry Buildings, Ministry of Business, Innovation and Employment, 2017
- [12] ICOMOS NZ, Charter for the Conservation of Places of Cultural Heritage Value, The New Zealand National Committee of the International Council on Monuments and Sites, Auckland, 2010
- [13] MBIE, The Seismic Assessment of Existing Buildings: Initial Seismic Assessment, Ministry of Business, Innovation and Employment, 2017
- [14] ASCE/SEI 41-13, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2013
- [15] Secretary of Interior, Standards for the treatment of historic properties with guidelines for preserving, rehabilitating, restoring, and reconstructing historic buildings, MPS, DC, 1995
- [16] ABK Joint Venture, Topical report 08, Methodology for mitigation of seismic hazards in existing unreinforced masonry buildings: The methodology, NSC, Washington, DC, 1984
- [17] NTC 2018, Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Roma, 2018
- [18] Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Roma, 2019
- [19] DPCM 2011, G.U. n. 47, Presidente del Consiglio dei Ministri, Roma, 2011
- [20] Heyman J., The stone skeleton, International Journal of Solids and Structures 2(2)1966, str. 249–256
- [21] Draft NPR 9998, Assessment of structural safety of buildings in case of erection, reconstruction and disapproval – Induced earthquakes – Basis of design, actions and resistances, Royal Netherlands Standardization Institute, 2020
- [22] Cultural Heritage Agency, Heritage Act, Dutch Ministry of Education, Culture and Science, 2016
- [23] Vaculik J., Griffith M. C., Out-of-plane load-displacement model for two-way spanning masonry walls, Engineering Structures 141(6)2007, str. 328–343
- [24] Van der Pluijm R., Laterally Loaded Masonry Panels made with Thin Layer Mortar, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2001
- [25] Griffith M. C. Vaculik J., Out-of-plane flexural strength of unreinforced clay brick masonry walls, TMS Journal 25(1)2007, str. 53–68