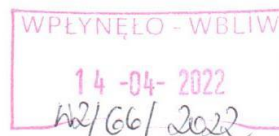


Marcin Szyszka

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego



Mechanika muru historycznego obciążonego z płaszczyzny

Streszczenie:

Mur historyczny obciążony w płaszczyźnie do niego prostopadłej (czyli z płaszczyzny) charakteryzuje się znacznie ograniczoną nośnością i często ulega zniszczeniu w czasie trzęsień ziemi – w postaci tak zwanych mechanizmów lokalnych. Zniszczenia te występują zazwyczaj przy znacznie mniejszym obciążeniu niż mechanizmy globalne (oparte na nośności muru w płaszczyźnie). W związku z tym, zrozumienie pracy jakościowej oraz ilościowej murów obciążonych z płaszczyzny jest kluczowym aspektem określania odporności obiektów historycznych na obciążenia sejsmiczne. W dalszej kolejności pozwoli to na poprawny dobór metod wzmacniania i szacowania ich wpływu na nośność muru i obiektu. Ważkość tych zagadnień podkreśla fakt, iż wiele centrów europejskich miast o charakterze historycznym zlokalizowanych jest w strefach sejsmicznych – przykładowo Bolonia, Asyż, Lizbona, Ateny, Lublana, Split. Biorąc pod uwagę fakt, iż mury historyczne cechują się znaczną różnorodnością technik wznoszenia oraz stosowanych materiałów, ich analiza wymaga usystematyzowanego podejścia badawczego.

W pracy analizowano następujące cechy murów historycznych: brak zaprawy lub obecność zaprawy o słabej jakości/zaprawy zwietrzałej, wielowarstwowość (tutaj mur dwuwarstwowy) oraz obecność więzów (połączeń) międzywarstwowych. Ponadto analizowano wpływ obecności więzi zewnętrznych oraz jakości ich realizacji. Mury były reprezentowane przez modele wykonane w skali 1:10. Proporcje bloczków były zbliżone do proporcji cegieł i kamieni stosowanych w starożytnym Rzymie. Bloczki otrzymano z proszku gipsowego z wykorzystaniem druku 3D. Modele badano z wykorzystaniem równi pochyłej (próby quasi-statyczne) oraz stołu wstrząsowego (próby dynamiczne). W celu uchwycenia pracy jakościowej, a także przeprowadzenia analiz ilościowych, próby rejestrowano kamerą wysokich prędkości (500 klatek/sekunda). Zapisy wideo przetwarzano z wykorzystaniem oprogramowania umożliwiającego śledzenie obiektów.

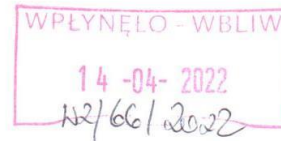
Na równi pochyłej zbadano łącznie 57 modeli o zróżnicowanej charakterystyce. Na podstawie badań zidentyfikowano możliwe schematy zniszczenia oraz ich mnożniki zniszczenia – w postaci tangensa kąta otrzymanego na równi pochyłej. Otrzymane wyniki skonfrontowano z predykcjami teoretycznymi, opartymi na następujących założeniach: wytrzymałość muru na ściskanie oraz jego sztywność są nieskończone, wytrzymałość muru na rozciąganie jest zerowa. Na stole wstrząsowym zbadano 9 różnych modeli obciążając je pojedynczymi impulsami typu sinus. Teoretyczne

zachowanie modeli przybliżano z wykorzystaniem równania ruchu bloku sztywnego podlegającego kołysaniu. Otrzymane wyniki doświadczalne wykorzystano do analizy metod szacowania nośności murów przedstawionych w normie włoskiej i nowozelandzkiej. Posłużyły również do analizy probabilistycznych modeli zapotrzebowania sejsmicznego oraz przeprowadzenia tak zwanej analizy wrażliwości (opartej o prawdopodobieństwo warunkowe).

Najistotniejsze wnioski sformułowane na podstawie badań i analiz są następujące:

- zastosowanie bloczków drukowanych może być tańszą, a także mniej pracochłonną alternatywą dla testów w skali wykonywanych za pomocą elementów z materiałów skalnych;
- analiza wielowarstwowych murów historycznych wymaga rzetelnej oceny stanu oraz uwzględnienia wszystkich cech przekroju, a także rozważenia dwóch lub więcej mechanizmów zniszczenia dla danego elementu (niezależnie od stosowanej metody analizy nośności);
- nadrzędną rolę, w kontekście nośności murów z płaszczyzny, pełni ich integralność oraz smukłość (pionowa i pozioma), parametry wytrzymałościowe są drugorzędne;
- optymalne metody wzmacniania murów tego typu to pręty kotwiące oraz łączniki międzywarstwowe („sztuczne” więzy). Są to również metody zgodne z doktryną konserwatorską;
- badania potwierdziły, iż stosowanie analizy sił do określania nośności murów historycznych o niskiej jakości jest podejściem zasadnym; brak integralności tych murów utrudnia wykorzystanie rezerwy przemieszczeniowej muru po aktywacji mechanizmu;
- wyznaczając nośność filarów i kolumn na obciążenia dynamiczne, należy uwzględnić niekorzystny wpływ smukłości w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny analizowanej;
- ocena odporności muru na obciążenia sejsmiczne tylko na podstawie oględzin może prowadzić do błędnych wniosków – przemieszczenia końcowe mogą być zdecydowanie niższe od szczytowych;
- stosując analizę sił i przemieszczeń należy mieć na uwadze, iż przyjęte mechanizmy zniszczenia mogą być dalekie od rzeczywistych – wskazują na to otrzymane schematy zniszczenia dla identycznych modeli na równi pochyłej oraz stole wstrząsowym;
- probabilistyczna analiza wrażliwości wykazała, iż najefektywniejsze są krzywe, które opierają się o miary intensywności powiązane z przyspieszeniem podłoża; jest to w zgodzie z obserwacjami, iż dla mniejszych elementów (po aktywacji mechanizmu) dodatkowa nośność wynikająca z rezerwy przemieszczeniowej jest niewielka;
- analiza otrzymanych danych ze stołu wstrząsowego potwierdziły, iż zjawisko kołysania zachodzące w murach, ma potencjał w zastosowaniach inżynierskich, przy wykorzystaniu narzędzi probabilistycznych; z kolei analizy deterministyczne mogą prowadzić do błędnych wniosków.

Syryla March



Marcin Szyszka

Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering

Out-of-plane behaviour of historic masonry walls

Abstract:

Historic masonry walls loaded out-of-plane are characterized by significantly limited capacity and frequently undergo destruction during seismic events – taking a form of local mechanisms. These destructions occur under much lower actions than can be carried by the global capacity (which is based on in-plane strength of walls) of the objects. Hence, understanding of qualitative and quantitative behaviour of walls loaded out-of-plane, is a first and critical step during assessment of seismic capacity for historic masonry structures. In further considerations, it will allow to correctly choose strengthening methods and their effect on the capacity of the wall and the entire object as well. The importance of discussed issues is underlined by the fact that numerous European historic city centres are localized in seismic zones – for instance Bologna, Assisi, Lisbon, Athens, Ljubljana, Split. Given the fact that historic masonry walls are characterized by significant variety of construction techniques and applied materials, analysis of such elements requires a systematic scientific approach.

Following features of historical masonry walls were analysed in dissertation: lack of mortar in joints or presence of low-quality/deteriorated mortar, multi-layered wall (here: two-layered masonry) and presence of through-stones connecting the layers. Furthermore, the influence of external supports and their quality were analysed. Masonry was represented by means of scale models (1:10). Proportion of used blocks was similar to ones used in Ancient Rome. Blocks were obtained with utilisation of 3D printing and were based on gypsum powder. Models were tested on tilting table (quasi-static tests) and shake table (dynamic tests). In order to capture the quantitative behaviour, tests were registered by means of high-speed camera (500 frame/second). Obtained videos were processed with dedicated software which was able to follow movement of points and objects (displacements, velocity, acceleration).

On tilting table were tested 57 different models. Basing on tests were identified possible failure mechanisms and their load factors – tangent function of failure angle at tilting table. Obtained results were confronted with theoretical predictions, based on following assumptions: stiffness and compressive strength of masonry is infinite, tensile strength is null. On shake table 9 different models were tested under single sine-like impulses. Theoretically, the behaviour of models were approximated with equation of motion describing rocking behaviour of rigid block. Received

experimental results were used to verify methods given in Italian and New Zealand standards. They were also utilised to analyse probabilistic seismic demand models and to create so called fragility curves (based on conditional probability).

The most important conclusions based on experiments and analyses are as follows:

- in case of scale tests, application of 3D printing might be less expensive and less laborious alternative to elements obtained from rock materials;
- analysis of multi-layered walls requires reliable on-site investigation and consideration of at least two different failure mechanisms for given element (independently of applied calculation method);
- for out-of-plane capacity of masonry walls, crucial role is played by the integrity of wall and its slenderness (both in horizontal and vertical directions), mechanical parameters are secondary;
- optimal strengthening methods for discussed structures are anchor rods and interlayer connectors (artificial through-stones). These methods are also in agreement with conservation doctrine;
- experimental results confirmed that application of force-equilibrium methods in case of low quality masonry is a correct approach; lack of integrity of such walls, impedes utilisation of displacement reserve after the mechanism is activated;
- calculation of columns and pillars capacity, in case of dynamic loading, has to take into account unfavourable influence of high slenderness with regards to both main axes of cross-section;
- assessment of seismic capacity for walls which is based only on post-earthquake inspection might lead to improper conclusions – final displacements might be much lower than the peak ones during the seismic event;
- while applying force-equilibrium and displacement-based formulations, should be borne in mind that adopted failure mechanisms might be far from the real ones – it was observed by comparison of mechanisms obtained on tilting and shake table for identical models;
- obtained fragility curves pointed out that the most effective curves were based on intensity measures related to ground acceleration; it is in agreement with observations that for smaller elements (after mechanism activation) additional displacement reserve is negligible;
- database obtained from shake table confirmed that rocking behaviour of masonry walls can be potentially applied in engineering practice – by means of probabilistic tools; whereas deterministic approach might lead to erroneous results.

Szyzko Marcin