

Claudio Modena*, Maria Rosa Valluzzi*, Francesca da Porto*, Filippo Casarin*
Enrico Garbin*, Marco Munari*, Nicola Mazzon*, Matteo Panizza*
Massimo Dalla Benetta*, Giulia Bettiol*

Intervention criteria for historic masonry constructions subjected to seismic actions

Kryteria interwencji dla historycznych konstrukcji murowanych podlegających oddziaływaniom sejsmicznym

1. Introduction

The acknowledgment of the scientific community that the structural safety aspects of constructions belonging to the cultural heritage can not be treated according to standard procedures that are fitted for new constructions, is leading to new, specific approaches for assessing their actual structural performances and then for developing new, more appropriate methodologies and design criteria for their repair and strengthening. The basic idea is that the usual, even the most sophisticated, structural design approaches naturally imply a certain level of “over-design”, and this can lead to unacceptable solutions when dealing with “existing structures” (ISO 13822) [1]. Over-designing interventions on existing structures could in fact imply in general unacceptable costs and, in the case of the historical heritage, unacceptable losses of cultural (historic, artistic) values. On this respect, the “seismic condition” presents the most delicate implications, as the very extreme resources of the structure, i.e. those connected with resistance mechanisms that are normally neglected and in any case almost impossible to include in structural models, are mobilized. Attempts to offer comprehensive methodologies to tackle such difficulties have been recently made at an international level by the ISCARSAH [2] committee of ICOMOS and, for constructions in seismic areas, by the Italian codes and guidelines [3] issued by Ministry of Culture and Ministry of Public Works. The consciousness that any calculation imply over-design has as

1. Wprowadzenie

Uświadomienie sobie przez społeczność naukową, że aspekty bezpieczeństwa konstrukcji budowli należących do kulturalnego dziedzictwa nie mogą być traktowane zgodnie ze standardowymi procedurami postępowania, właściwymi dla nowych konstrukcji, prowadzi do przyjęcia nowego, specyficznego podejścia do oceniania ich faktycznych możliwości konstrukcyjnych i następnie do opracowywania nowych, odpowiedniejszych metodologii i kryteriów projektowania dla przeprowadzania ich napraw i wzmacniania. Zasadnicza idea polega na tym, że zwykle, nawet najbardziej wyszukane podejścia projektowania konstrukcji w sposób naturalny zakładają pewien poziom „przeprojektowania”. To może prowadzić do niedopuszczalnych rozwiązań, kiedy mamy do czynienia z istniejącymi konstrukcjami (ISO 13822) [1].

Interwencje typu nadmiarowego projektowania dla istniejących konstrukcji mogłyby w rezultacie spowodować niedopuszczalne koszty i, w przypadku obiektów historycznego dziedzictwa, niedopuszczalne straty wartości kulturalnych (historycznych, artystycznych).

Z tego punktu widzenia, „warunki sejsmiczne” pociągają za sobą najbardziej delikatne konsekwencje, jako że zostają tu uruchomione najbardziej ekstremalne rezerwy konstrukcji, tzn. związane z takimi mechanizmami wytrzymałości, które zwykle są zaniedbane, a w każdym razie prawie niemożliwe do uwzględnienia w modelach konstrukcyjnych. Wysiłki

relevant consequence that the formal match between “code requirements” and “formally demonstrated structural performances” can be misleading, and not necessarily required. Assessment is no more considered a more or less sophisticated exercise of analytical/numerical structural models, but an articulated and combined use of structural models, historical informations, surveys and investigations, personal, qualitative judgments (based on past experiences, specific training, comparisons, evaluations of past performances of a constructions) that in a “multidisciplinary” context, ensuring that all the values (economical, social, historic, artistic) of the constructions are taken into account, leads to a final decisions on if and how to intervene. Moreover, safeguarding “cultural values” implies also appropriated selection and design of the intervention materials and technologies. Attention is than paid to the possibilities offered by the traditional solutions and to their possible combinations with innovative ones.

2. Traditional and innovative structural interventions

Most important aspect is the improvement of the building seismic performance mainly by using traditional methodologies but also adopting innovative techniques and materials (fig. 1 and fig.2). The choice of approach and intervention techniques widely depend on the results of the previous evaluation phases. The main aim is the conservation both of materials and functionality of the structure, therefore interventions should interest a single part of the building avoiding significant alterations to the original structure. These interventions will be chosen preferring the least invasive ones and those with the greatest compatibility with the original structure. Several researches on these aspects were carried out at the University of Padua and the main results are presented in

skierowane na zaproponowanie wszechstronnych metodologii, które by uporały się z takimi trudnościami, zostały ostatnio poczynione na poziomie międzynarodowym przez ISCARSAH [2] komitet ICOMOS i, dla budów na terenach sejsmicznych, przez włoskie przepisy i wytyczne [3] wydane przez Ministerstwo Kultury i Ministerstwo Robót Publicznych.

Świadomość, że każde obliczenie implikuje „przeprojektowanie”, ma odpowiednie konsekwencje, a mianowicie takie, że formalne dopasowanie do siebie „wymagań normowych” i „formalnie zademonstrowanych możliwości konstrukcji” może wprowadzać w błąd i nie jest koniecznie wymagane. Ocena nie jest już dłużej uznawana za mniej lub bardziej skomplikowane ćwiczenie na analitycznych / numerycznych modelach konstrukcyjnych, ale za jasno wyrażone i połączone użycie modeli konstrukcyjnych, informacji historycznych, pomiarów geodezyjnych i badań, osobistej, jakościowej oceny (bazującej na zgromadzonych doświadczeniach, określonym wykszoleniu, porównaniach, ocenach poprzedniego zachowania się konstrukcji). W „multidyscyplinarnym” kontekście zapewnia to, że wszystkie wartości (ekonomiczne, społeczne, historyczne, artystyczne) budowli są uwzględnione.

Prowadzi to do końcowych decyzji odnośnie tego, czy i w jaki sposób zainterweniować. Ponadto ochranianie „wartości kulturalnych” implikuje również odpowiedni wybór i projektowanie materiałów i technologii dla tej interwencji. Zwraca się uwagę na możliwości oferowane przez tradycyjne rozwiązania i na ich możliwe połączenie z rozwiązaniami nowatorskimi.

2. Tradycyjne i nowatorskie interwencje konstrukcyjne

Najważniejszym aspektem jest poprawa zachowania się budynku w warunkach sejsmicznych,



Fig. 1. Example of out-of-plane collapse (left); out-of-plane collapse of a wall with r.c. tie beams (right)
 Rys. 1. Przykład zawalenia się pozapłaszczyznowego (z lewej strony); pozapłaszczyznowe zawalenie się ściany ze ściągami z belki żelbetowej (z prawej strony)



Fig. 2. R.C. roof pounding the masonry walls
Rys. 2. Żelbetowy dach rozbijający murowane ściany

the following paragraphs along with a general introduction of most important techniques used to improve seismic resistance of masonry buildings.

3. Interventions to improve connections

Firstly it is necessary to allow the structure to manifest a satisfactory global behaviour, by improving the connections between masonry walls and between these and floors.

This goal may be achieved inserting ties (fig. 3), confining rings (fig. 4), and tie-beams (preferably in reinforced masonry or steel, also in r.c. but with restrictions).

An effective connection between floors and walls is useful since it allows a better load redistribution between different walls and exerts a restraining action towards the walls' overturning. Considering wooden floors, a satisfactory connection is provided by fasteners anchored on the external face of the wall (fig. 5).

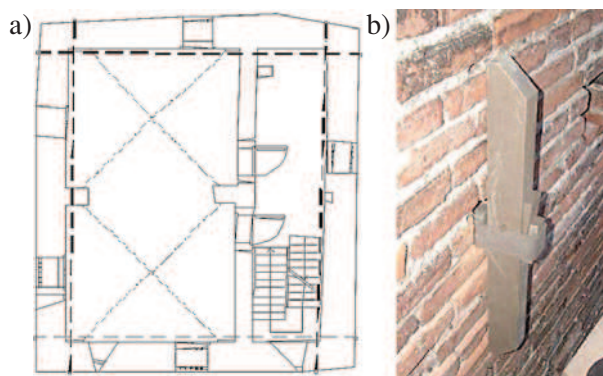


Fig. 3. Strengthening interventions, positioning of stainless steel ties, Vanga tower (Trento): a) tie positioning, plan; b) view of the external anchor

Rys. 3. Interwencje wzmacniające, umieszczenie ściągnięć ze stali nierdzewnej, wieża Vanga (Trento): a) ustawienie ściągnięć, rzut główny poziomy; b) widok zewnętrznej kotwicy

głównie przez zastosowanie metodologii tradycyjnych, ale również zaadaptowanie nowatorskich technik i materiałów (rys. 1 i rys.2). Wybór podejścia i techniki interwencji w szerokim zakresie zależy od wyników poprzednich faz oceny. Głównym celem jest zachowanie zarówno materiałów, jak i funkcjonalności konstrukcji, dlatego też interwencje powinny być skupione na pojedynczej części budynku, unikając znacznych zmian oryginalnej konstrukcji. Wybrane będą te interwencje, które są najmniej inwazyjne i te, które zapewniają największą zgodność z oryginalną konstrukcją. Szereg badań nad tymi aspektami było przeprowadzonych na Uniwersytecie w Padwie i główne wyniki są przedstawione w następujących paragrafach, wraz z ogólnym przedstawieniem najważniejszych technik używanych dla polepszenia sejsmicznej odporności murowanych budynków.

3. Interwencje w celu poprawienia połączeń

Przede wszystkim należy umożliwić konstrukcji jej zadowalające globalne zachowanie, przez polepszenie połączeń między ścianami murowanymi oraz między ścianami i stropami.

Ten cel można osiągnąć wstawiając ściągi (rys. 3), pierścienie ograniczające (rys. 4) i ściągi belkowe (najlepiej jako murowane zbrojone lub stalowe, również żelbetowe ale z ograniczeniami).

Efektywne połączenie między stropami i ścianami jest przydatne, jako że pozwala na lepsze rozłożenie obciążenia między różnymi ścianami i działa ograniczająco na wywracanie się ścian. W przypadku stropów drewnianych, zadowalające połączenie jest zapewnione przez łączniki zakotwiczone na zewnętrznej powierzchni ściany (rys. 5).

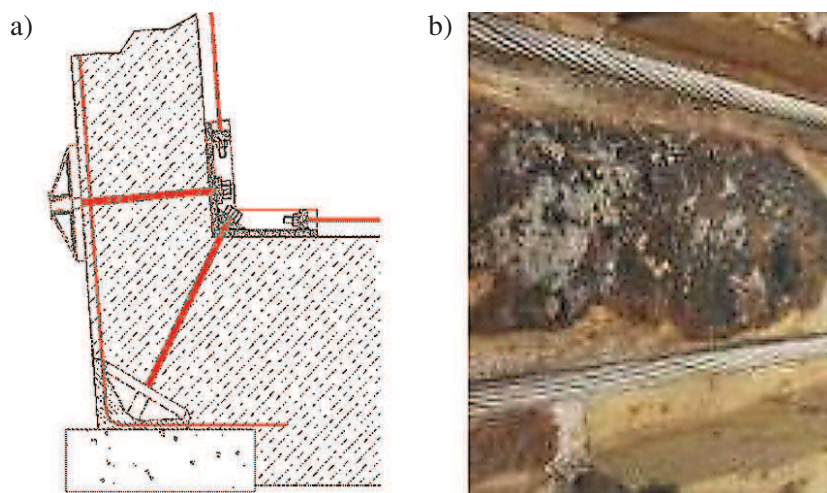


Fig. 4. Strengthening interventions, external confining stainless steel cables, Clock Tower, Padova: a) detail of the core strengthened using steel plates and cables; b) detail of the cable insertion between the mortar joints
 Rys. 4. Interwencje wzmacniające, zewnętrzne liny ograniczające ze stali nierdzewnej, Wieża Zegarowa, Padwa: a) szczegół rdzenia wzmocnionego przy użyciu płyt i lin stalowych; b) szczegół wstawienia liny między połączeniami zaprawy murarskiej

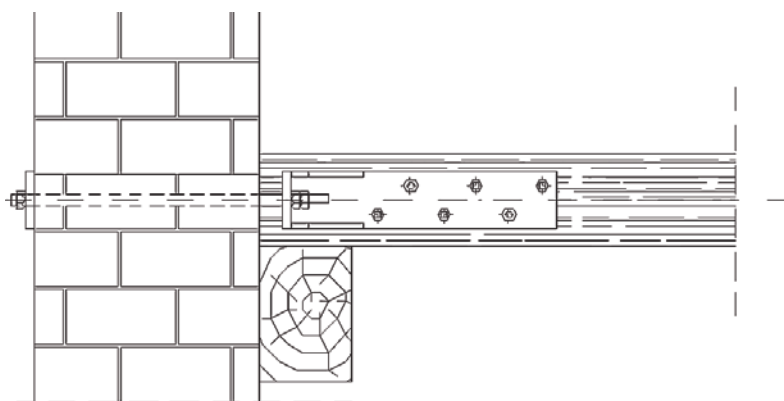


Fig. 5. Strengthening interventions, diffuse wooden floor connections to the masonry wall
 Rys. 5. Interwencje wzmacniające, rozproszone połączenia drewnianego stropu ze ścianą murowaną

4. Interventions to increase the strength of the masonry

Interventions, aiming at increasing the masonry strength, may be used to re-establish the original mechanical properties lost because of material decay or, alternatively, to upgrade the masonry performance. Techniques, employed with opportune and sufficient cautiousness, should utilize materials with mechanical and chemical-physical properties similar to the original fabric guaranteeing both strength and stiffness.

The “scuci-cuci” methodology (fig. 6) aims to restore the wall continuity along cracking lines (substitution of damaged elements with new ones, reestablishment of the structural continuity) and to recover heavily damaged parts of masonry panels. Using of similar materials, for form, dimensions, stiffness and resistance, to those employed in the original wall is preferable, inserting adequate connections orthogonally and on the plain of masonry,

4. Interwencje służące zwiększeniu wytrzymałości konstrukcji murowanych

Interwencje, zmierzające do zwiększania wytrzymałości konstrukcji murowanych, mogą zostać użyte, aby odtworzyć początkowe własności mechaniczne utracone z powodu rozkładu (zniszczenia) materiału lub, jako alternatywa, dla uzyskania lepszych tychże konstrukcji. Techniki, zastosowane z właściwą i dostateczną ostrożnością, powinny wykorzystywać materiały o własnościach mechanicznych i fizyko-chemicznych podobnych do własności oryginalnego materiału, gwarantując zarówno wytrzymałość, jak i sztywność.

Metoda “scuci-cuci” (rys. 6) ma na celu przywrócenie ścianie ciągłości wzdłuż linii pęknięcia (zastąpienie zniszczonych elementów nowymi, przywrócenie ciągłości konstrukcyjnej) i odzyskanie poważnie uszkodzonych części płyt murowanych.

Stosowanie podobnych materiałów, co do formy, wymiarów, sztywności i wytrzymałości, do tych



Fig. 6. Examples of "scuci-cuci" interventions on the bell tower of the Cathedral of Monza [4]
 Rys. 6. Przykłady interwencji typu „scuci-cuci” na dzwonnicy Katedry Monza [4]

to obtain greater homogeneity and monolithic behaviour.

An extensive research focused on the used of non cement-based mortar grouting [5] to increase the strength of multi-leaf masonry walls (fig. 7). The technique consists in the injection of mixture through a regular pattern of holes (fig. 8), with the aim to increase the connection between external layers of masonry. Studies [5], [6] demonstrate (fig. 10) that injections don not increase the stiffness of wall, as oppositely jacketing causes, permitting a methodologically correct intervention.

które były użyte w oryginalnej ścianie, jest korzystniejsze. Należy wstawiać odpowiednie połączenia prostopadłe i w płaszczyźnie muru dla uzyskania większej jednorodności i monolitycznego zachowania się ściany.

Rozległe badania skoncentrowano na zastosowaniu zastrzyków (iniekcji) zaprawą murarską niecementową [5] do zwiększenia wytrzymałości wielościanowych murów (rys. 7). Technika ta polega na wstrzykiwaniu mieszanki przez otwory o regularnym układzie (rys. 8), w celu zwiększenia połączenia między zewnętrznymi warstwami murów. Badania [5], [6] pokazują (rys. 10), że zastrzyki nie zwiększają sztywności ściany, jak czyni to nakładanie płaszcza (wartwy), pozwalając na metodologicznie poprawną interwencję.

Przez ścianę można przeprowadzić belki ściągające o niewielkich rozmiarach, zapewniając działanie łączące między ściankami muru (rys. 11). Jak wykazano w badaniach, ta interwencja pozwala zredukować poprzeczne deformacje (rys. 12) i zauważalnie zmniejszyć miejscowe problemy odkształcenia muru poza płaszczyznę, z powodu braku połączenia między przeciwnymi warstwami muru.

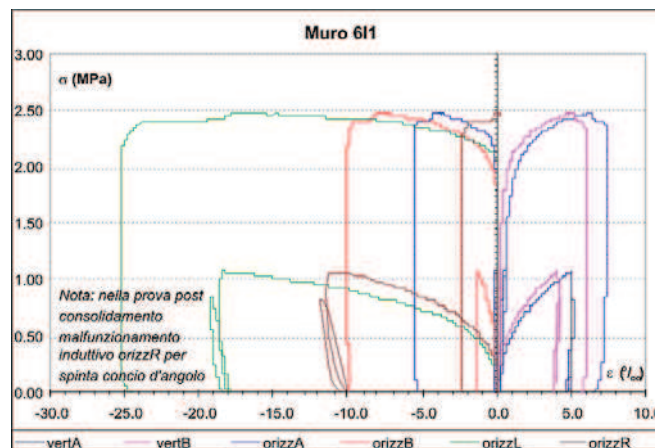


Fig. 7. Comparison between resistance compression of wall in original conditions and after injection; [5]
 Rys. 7. Porównanie między wytrzymałością muru na ściskanie w warunkach początkowych i po iniekcji; [5]

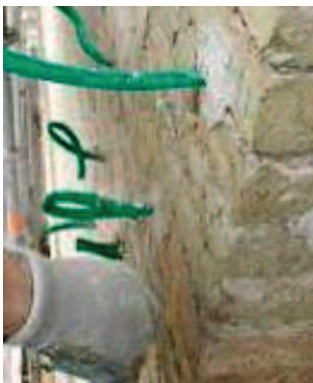


Fig. 8. Strengthening interventions using mortar grouting
 Rys. 8. Interwencje wzmacniające z zastosowaniem zastrzyku (iniekcji) zaprawy murarskiej



Fig. 9. Strengthening interventions, reinforced mortar repointing
 Rys. 9. Interwencje wzmacniające, wzmocnione punktowe naprawy zaprawą murarską

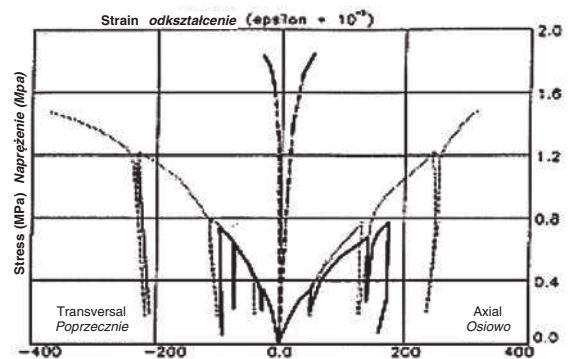


Fig. 10. Comparison of structural behaviour using injections and jacketing [7]
 Rys. 10. Porównanie zachowania się konstrukcji przy użyciu iniekcji i osłony płaszczem [7].

Small size tie beams can be posed across the wall, supplying a connective function between the wall's leaves (fig. 11). This intervention permits to reduce transversal deformations, as a study demonstrates (fig. 12), and noticeably reduce local problems of out-of-plane, due to the lack of connection between opposite layers of wall.

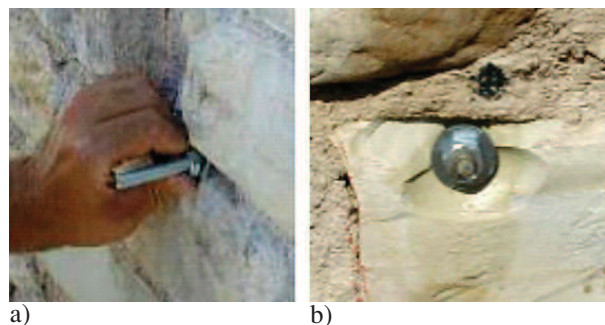


Fig. 11. Strengthening interventions, positioning of stainless steel threaded bars used as ties: a) fixing of the nut; b) external aspect of the strengthened wall

Rys. 11. Interwencje wzmacniające, umieszczenie gwintowanego pręta ze stali nierdzewnej użytego jako ściągu: a) umocowanie nakrętki; b) zewnętrzny widok wzmocnionej ściany

In addition, the combination of these techniques can provide a larger increase in the overall strength of the wall, permitting to carry higher loads.

A wide research, studying the dynamic behaviour of injections and transversal ties, is in progress. Two scaled masonry structures were built using three leaves masonry stones and tested on the shaking table (fig. 13). First results confirm that the overall stiffness of the injected model is not increased with respect to the original one and therefore also the dynamic performance does not change. In addition higher values of seismic input can be reached, thanks to a monolithic performance due to the connection effect provided by mixture. Several compressive, shear-compressive and out-of-plane test complete the investigation permitting to understand the mechanical behaviour of strengthened structures (fig. 14).

An additional technique, improving deteriorated joints, is mortar repointing (fig. 9) and reinforced repointing when a steel bar is provided in the joints. Laboratory tests and numerical models elaborated at the University of Padua (fig. 15) show the employability of new materials as FRP laminates instead of steel, to ensure compatibility and removability as well as controlling creep deformations.

Masonry strength can be also increased by means of the insertion of "diatoni" (masonry units disposed in a orthogonal direction respect the wall's plane), substituting damaged stones or introducing new elements to provide transversal connections between external layers of wall.

Ponadto, połączenie tych technik może zapewnić większy wzrost ogólnej wytrzymałości ściany, pozwalając przenieść większe obciążenia.

Trwają szerokie badania, obejmujące dynamiczne zachowanie się iniektów i poprzecznych ściągu. Zostały zbudowane dwie skalowane konstrukcje murowane, przy użyciu trzech ścian murowanych

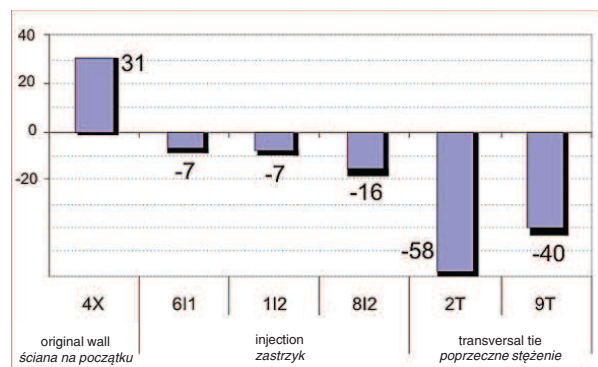


Fig. 12. Inserting transversal tie provides maximum decreasing of transversal deformation of masonry panels; [5]

Rys. 12. Wstawianie poprzecznego ściągu zapewnia maksymalne zmniejszenie deformacji poprzecznej murowanych płyt; [5]

z kamienia, i poddano je badaniom na stole wibracyjnym (rys. 13). Pierwsze wyniki potwierdzają, że ogólna sztywność modelu, poddanego iniekcjom, nie została zwiększona w odniesieniu do oryginału i dlatego również dynamiczne charakterystyki nie uległy zmianie.

Ponadto można zastosować wyższe wartości wprowadzanej siły sejsmicznej, dzięki monolitycznemu zachowaniu się, dzięki efektowi połączenia spowodowanego przez mieszaninę. Szereg testów ściskających, ścinająco-ściskających i pozapłaszczyznowych uzupełnia te badania, pozwalając zrozumieć mechaniczne zachowanie wzmocnionych konstrukcji (rys. 14).

Dodatkową techniką, poprawiającą zniszczone spoiny, jest punktowe naprawianie zaprawą murarską (rys. 9) i wzmocnione punktowe naprawianie, kiedy w połączeniach wprowadzony jest stalowy pręt.

Badania laboratoryjne i modele numeryczne, opracowane na Uniwersytecie w Padwie (rys. 15), pokazują możliwość zastosowania nowych materiałów, takich jak laminaty FRP zamiast stali, aby zapewnić zgodność, możliwość usuwania, oraz kontroleodkształceń spowodowanych pełzaniem.

Wytrzymałość murów może również zostać zwiększona przy pomocy wkładek „diatoni” (elementy murowane rozmieszczone w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ściany), zastępujące uszkodzone kamienie lub wprowadzające nowe elementy, aby zapewnić poprzeczne połączenia między zewnętrznymi warstwami ściany.



Fig. 13. Masonry model, reinforced using injections, on the shaking table
 Rys. 13. Model murowanej konstrukcji, wzmocnionej przy użyciu zastrzyków, na stole wstrząsowym

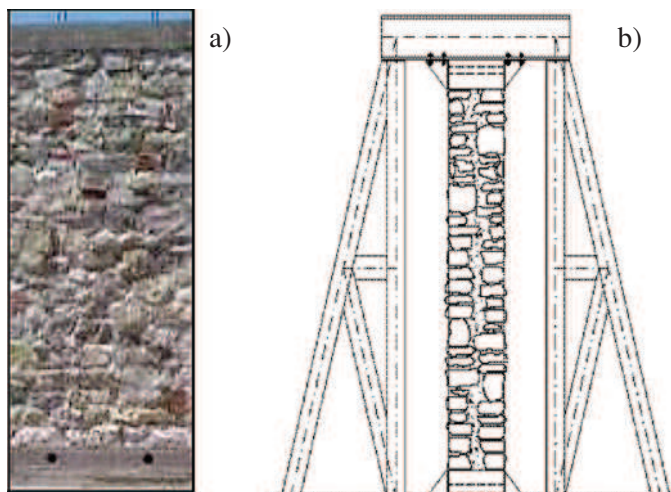


Fig. 14. Single panel (a) and steel frame (b) for shaking table tests
 Rys. 14. Pojedynczy panel (a) i rama stalowa (b) dla testów na stole wstrząsowym

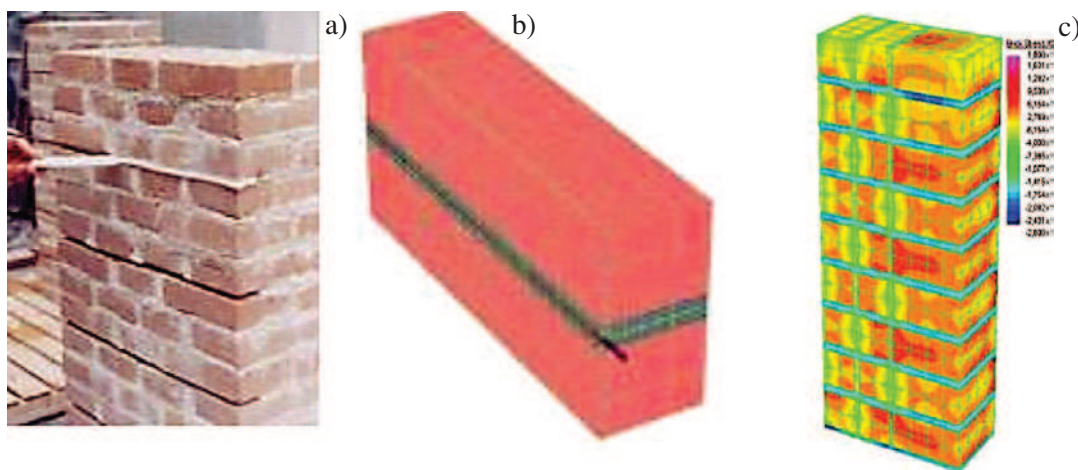


Fig. 15. (a) Reinforced repointing using FRP laminates. FE modelling of masonry wall strengthened with FRP bars (b) and (c); [8]
 Rys. 15. (a) Wzmocnione punktowe naprawy przy użyciu laminatów FRP. Modelowanie FE murowanej ściany wzmocnionej prętami FRP (b) i (c); [8]

5. Interventions to reduce flexibility of floors and their consolidation

Interventions aiming to increase the in-plane stiffness of existing floors must be carefully evaluated since the horizontal seismic action is transferred to the different masonry walls in function of the floor plane action, depending on its stiffness. The role of diaphragms in seismic behaviour in masonry buildings is to transfer lateral actions to the walls which are parallel to the direction of the earthquake, therefore also an effective connection between floors and walls has a large importance.

A limited intervention, that does not modify the overall behaviour and the seismic force redistribution, aiming to increase the wooden floors stiffening, is obtained by providing a further layer of wooden planks. Studies [9] focused on different strength-

5. Interwencje w celu zmniejszenia elastyczności stropów i ich umocnienia

Interwencje zmierzające ku zwiększeniu sztywności istniejących stropów muszą być ostrożnie oceniane, jako że poziome działanie sejsmiczne jest przenoszone na inne ściany murowane jako funkcja działania w płaszczyźnie stropu, zależnie od jego sztywności. Rolą diafragm w sejsmicznym zachowaniu się budynków murowanych jest przenoszenie bocznego działania na ściany, które są równoległe do kierunku trzęsienia ziemi, dlatego również efektywne połączenie między stropami i ścianami ma duże znaczenie.

Ograniczona interwencja, nie modyfikująca ogólnego zachowania i redystrybucji siły sejsmicznej, zmierzająca ku zwiększeniu sztywności drewnianych stropów, jest uzyskana przez dostarczenie kolejnej warstwy drewnianych desek. Badania [9] skupiono na

ening methodologies as double planking in orthogonal direction or with 45° of rotation, using tongue-and-groove joints and nails or screw as connectors. An eventual further intervention consists on inserting diagonal wooden or steel elements (fig. 16). This research leads to a widely utilized technique nailing planks at the extrados of the existing floor (fig. 17). In addition the use of metallic belts or FRP strips, disposed in a crossed pattern and fixed at the extrados of the wooden floor (fig. 18), or the use of metallic tie-beams bracings, may improve the stiffening effect.

różnych metodach wzmacniania, takich jako podwójne deskowanie w kierunku prostopadłym, lub obróconym pod kątem 45°, przy użyciu połączenia na pióro-wpust i gwoździ lub śrub jako elementów łączących. Możliwa dalsza interwencja polega na wstawianiu przekątnych elementów z drewna lub stali (rys. 16). To badanie prowadzi do szeroko stosowanej techniki przybijania desek w grzbiecie łuku istniejącego stropu (rys. 17). Ponadto użycie metalowych pasów lub taśm FRP, rozmieszczonych krzyżowo i umocowanych w grzbiecie łuku drewnianego stropu (rys. 18), lub użycie usztywnień z metalowych belek ściągu może polepszyć efekt usztywnienia.

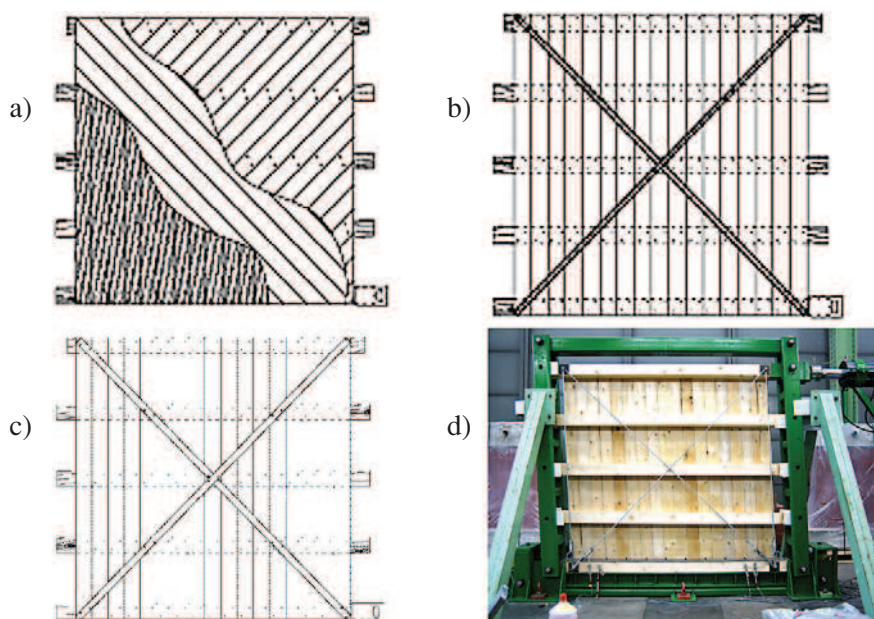


Fig. 16. Different strengthening interventions using: (a) rotated double planking; (b) orthogonal double planking with wooden diagonal; (c) orthogonal double planking with steel diagonal. (d) Steel frame used for laboratory tests [9].

Rys. 16. Inne interwencje wzmacniające przy użyciu: (a) obróconego pod kątem podwójnego odeskowania; (b) prostopadłego podwójnego odeskowania z drewnianą przekątną; (c) prostopadłego podwójnego odeskowania z przekątną stalową. (d) Stalowa rama użyta do badań w laboratorium [9]



Fig. 17. Strengthening interventions, in and out of plane stiffening of an existing wooden floor: wooden planks at the extrados connected by wooden dowels

Rys. 17. Interwencje wzmacniające, usztywnienie istniejącego drewnianego stropu w płaszczyźnie i poza płaszczyzną: drewniane deski w grzbiecie łuku są połączone drewnianymi kółkami



Fig. 18. Strengthening interventions, in-plane stiffening of existing wooden floors: metallic belts reinforcing wooden roof
Rys. 18. Interwencje wzmacniające, usztywnienie istniejącego drewnianego stropu w płaszczyźnie: metalowe pasy wzmacniające drewniany strop

6. Interventions to reduce thrust of vaulted arches and their strengthening

Among the structural components in masonry buildings, arches and vaults deserve particular attention being very widespread in European historical centers, therefore their preservation as part of the cultural heritage is a very topical subject. Because of their ages or for accidental causes (such as earthquakes), these structures can suffer several types of damage, so the contribution of strengthening materials and repair techniques say be required to re-establish their performances and to prevent the brittle collapse of the masonry in possible future hazardous conditions.

Strengthening interventions may be realized by using the traditional techniques of tie-rods, compensating the thrust induced on the bearing walls. In addition, to absorb thrust of vaulted arches, the possibility of realizing buttresses or masonry fillers should be considered, whilst jacketing the extrados using concrete reinforced or not should be avoided.

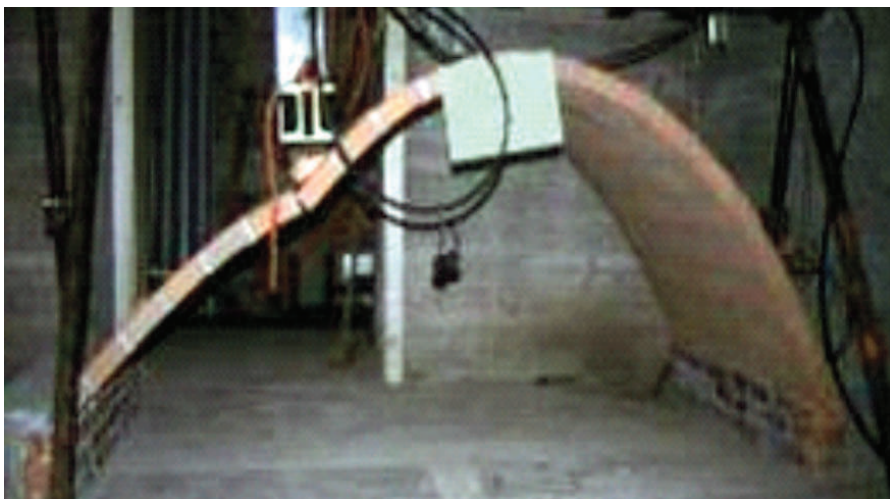


Fig. 19. Collapse mechanism of a vault strengthened using CFRP strips; [10]
Rys. 19. Mechanizm zawalenia się sklepienia wzmocnionego przy użyciu taśm CFRP; [10]

In the last few years, the University of Padua carried out an experimental research [10], [11] to study the behaviour of masonry vaults strengthened by new composite materials, as carbon FRPs (CFRPs) or glass FRPs (GFRPs), placed at the intrados (inner surface) or at the extrados (outer surface) of the structure (fig. 19). A multilayer system of adhesion based on epoxy adhesives and designed to provide a support as homogeneous as possible for the fibers has been adopted.

Vaults strengthened at their intrados revealed a more ductile mechanism of failure that is located in a limited zone, therefore the binding action of the strips can still avoid the collapse of the structure.

6. Interwencje w celu zmniejszenia rozporu sklepień łukowych i ich wzmocnienia

Spośród konstrukcyjnych komponentów w murowanych budynkach, łuki i sklepienia zasługują na szczególną uwagę, jako że są one bardzo rozpowszechnione w europejskich centrach historycznych. Dlatego ich zachowanie jako części kulturalnego dziedzictwa jest bardzo aktualnym tematem. Z powodu swojego wieku lub z przyczyn przypadkowych (takich jak trzęsienia ziemi), te konstrukcje mogą doznać kilku typów uszkodzeń. Stąd więc wymagane jest zastosowanie wzmacniających materiałów i technik napraw, aby przywrócić ich właściwości techniczne i zapobiec kruchemu zawaleniu się konstrukcji murowanych w stanach zagrożenia, które mogą wystąpić w przyszłości.

Interwencje wzmacniające mogą być zrealizowane przy użyciu tradycyjnych technik ściągowych, kompensujących rozpor wywierany na ściany nośne. Ponadto, aby przejąć rozpor łuków sklepień, należy rozważyć możliwość zastosowania przypór lub wypełniaczy murowanych konstrukcji. Należy natomiast unikać nakładania płaszcza na grzbiet łuku, przy użyciu betonu, czy to zbrojonego, czy też nie zbrojonego.

W ostatnich kilku latach, Uniwersytet w Padwie prowadził badania doświadczalne [10], [11], aby zbadać zachowanie się murowanych sklepień wzmocnionych przy pomocy nowych kompozytowych materiałów, takich

jak węglowe FRP (CFRP) lub szklane FRP (GFRP), umieszczonych w podniebieniu sklepienia (wewnętrznej powierzchni) lub w grzbiecie łuku (zewewnętrznej powierzchni) konstrukcji (rys. 19). Został zaadoptowany wielowarstwowy system przyklejania, oparty na epoksydowych klejach i zaprojektowany w taki sposób, żeby przy zastosowaniu włókien zapewnić możliwie największą jednorodność podparcia.

Sklepienia wzmocnione w ich podniebieniach wykazały mechanizm defektu bardziej podatny na rozciąganie, ułożony w ograniczonej strefie, dlatego wiążące działanie taśm może nadal umożliwić uniknięcie zawalenia się konstrukcji.

7. Conclusions

The observation of the damages caused by the earthquakes in the recent period was essential for the definition of new interpretative models, adjusted on the effective damage patterns experienced by the structures, and also for the validation (or rejection) of intervention techniques that demonstrated different performances during seismic events.

The knowledge of the building's history, the detailed evaluation of the actual state of the structure and materials, the monitoring of the structural behaviour and the comprehension of each building's proper characteristics, in order to define suitable interpretative models, should be considered integral part of the seismic assessment of any historical structure.

Structural models fitted for new constructions are considered generally not suitable in the case of cultural heritage buildings, whilst in several cases starting from qualitative evaluations is believed to be significant for the overall judgement of their seismic performance.

In conclusion, some case studies have been presented, where efforts have been made to respond to "conservative" design criteria and to ensure acceptable structural safety conditions of existing historical constructions. These cases outline a methodological approach to the upgrading of an existing structure, unable in its actual state to bear in safe conditions seismic and static loads. Attention had to be focused on avoiding unnecessary interventions on constructions and special care has been paid to limit, if possible, variations not only of external appearance, but also of mechanical behaviour.

7. Wnioski

Obserwacja uszkodzeń spowodowanych przez trzęsienia ziemi w niedawnym okresie była istotna dla zdefiniowania nowych modeli objaśniających, dostosowanych do faktycznych wzorów uszkodzenia, jakich te konstrukcje doświadczyły, jak również dla walidacji (lub odrzucenia) technik interwencji, które zademonstrowały różną skuteczność podczas wstrząsów sejsmicznych.

Znajomość historii budynku, szczegółowej oceny faktycznego stanu konstrukcji i materiałów, monitoringu zachowania konstrukcji i zrozumienie właściwych cech każdego budynku, w celu określenia odpowiednich modeli objaśniających, powinny zostać uznane za integralną część sejsmicznej oceny każdej historycznej konstrukcji.

Modele strukturalne dopasowane do nowych konstrukcji są ogólnie uważane za nieodpowiednie w przypadku budynków dziedzictwa kulturowego, podczas gdy w kilku przypadkach można uznać, że rozpoczęcie od sformułowania jakościowych ocen jest znaczące dla ogólnej oceny ich zachowania się w warunkach sejsmicznych.

Podsumowując, zostały przedstawione badania pewnych przypadków, mające na celu odpowiedzieć na pytania dotyczące kryteriów projektowania „konserwatywnego” i zapewnić zadowalające warunki bezpieczeństwa konstrukcji dla istniejących budynków historycznych. Te przypadki wytyczają metodologiczne podejście do poprawiania istniejącej konstrukcji, niezdolnej w swoim aktualnym stanie przetrwać bezpiecznie sejsmiczne i statyczne obciążenia. Należało skupić uwagę na unikaniu niepotrzebnych interwencji w konstrukcję i zwrócono szczególną uwagę na ograniczenie, o ile to możliwe, zmiany nie tylko zewnętrznego wyglądu, ale również mechanicznego zachowania się.

References • Literatura

- [1] ISO 13822 (2006) *Bases for design of structures – Assessment of existing structures*.
- [2] ICOMOS/ISCARSAH, *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*. Paris (FR), 2003.
- [3] *Guidelines for the application of the seismic standards to cultural heritage buildings*, adopted with Prime Minister Directive, October 12th 2007.
- [4] Modena C., Valluzzi M.R., Folli T.R., Binda L. *Design choices and intervention techniques for repairing and strengthening of the Monza cathedral bell-tower*, Construction and Building Materials, Special Issue Elsevier Science Ltd., vol. 16, pp. 385-395, 2002.
- [5] Valluzzi M.R., *Comportamento meccanico di murature consolidate con materiali e tecniche a base di calce*, PhD Thesis, U. of Trieste, U. of Brescia, U. of Padova, U. of Trento, IUAV, 2000.
- [6] Valluzzi M.R., da Porto F., Modena C., *Structural investigations and strengthening of the civic tower in Vicenza*, Structural faults & repair-2003, 1 -3 July 2003.

- [7] Modena, C. Bettio, *Experimental characterization and modeling of injected and jacketed masonry walls*, Proc. Italian-French Symposium Strengthening and Repair of Structures in Seismic Area, Nizza, pp. 273-282, October 1994.
- [8] Valluzzi M.R., Disaro' M., Modena C. (2003), *Bed joints reinforcement of masonry panels with CFRP bars*, International Conference on Composites in Construction, Rende (CS), pp. 427-432, Bruno-Spadea-Swamy Ed, 16-19 September 2003.
- [9] Valluzzi M.R., Garbin E., dalla Benetta M., Modena C., *Experimental assessment and modelling of in-plane behaviour of timber floors*, VI Int. Conf. on Structural Analysis of Historical Constructions – SAHC08, Proc., Bath 2008.
- [10] Valluzzi, M.R., Valdemarca, M., Modena, C., *Behaviour of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates*, ASCE Int. J. of Composites for Construction, 5(3), 163-169, 2001.
- [11] Panizza M., Valluzzi M.R., Garbin E., Modena C., *Bond Mechanism of Brick Masonry Vaults*, Structural Faults + Repair – 2008, Proc., Edinburgh (UK), 2008.

* University of Padova, Italy
Uniwersytet w Padwie, Włochy

Abstract

The paper presents a review of seismic structural interventions applied to historical masonry buildings, as they were developed and/or tested at the University of Padova. Safeguard of historical buildings from the seismic risk is a difficult task regarding first the prevention, and then the whole process from building assessment through design and execution of interventions. The adoption of the same classes of predictive models developed for new constructions can mislead about the real behaviour of the structures, and can bring to the choice of useless or even harmful interventions for their seismic protection as outlined in the Italian guidelines. The recent seismic events confirmed limits and consequences of some type of interventions, concurrently corroborated also by extensive experimental researches, but also the effectiveness of new methods based on the use of both traditional and innovative materials and techniques.

Streszczenie

Artykuł przedstawia przegląd antysejsmicznych interwencji konstrukcyjnych, odnoszących się do historycznych budynków murowanych, jakie były opracowane i / lub testowane na Uniwersytecie w Padwie. Zabezpieczenie historycznych budynków przed zagrożeniem sejsmicznym jest trudnym zadaniem uwzględniającym najpierw zapobieganie, a następnie cały proces, od oceny budynku poprzez projektowanie i wykonanie interwencji. Adaptowanie tych samych kategorii modeli przewidujących, jakie opracowano dla nowych budynków, może być mylące, jeśli chodzi o prawdziwe zachowanie się konstrukcji, i może doprowadzić do wyboru bezużytecznych lub nawet szkodliwych interwencji dla sejsmicznej ochrony budynków, jak nakreślono we włoskich zaleceniach. Niedawne wydarzenia sejsmiczne potwierdziły ograniczenia i konsekwencje niektórych typów interwencji, jednocześnie potwierdzone również przez obszerne badania doświadczalne, ale potwierdziły również skuteczność nowych metod, bazujących na zastosowaniu zarówno tradycyjnych, jak i nowatorskich materiałów i technik.