

Angelo Di Tommaso*

Injured architectural heritage in L'Aquila after the earthquake 2009: some general remarks

Uszkodzone obiekty dziedzictwa architektonicznego w L'aquili po trzęsieniu ziemi w roku 2009: kilka ogólnych spostrzeżeń

1. Introduction

The catastrophic event of earthquake in the Abruzzo Region (middle Italy) destroyed the major part of Architectonic Heritage in the region capital city of L'Aquila. Here we want to analyse the main reasons of this generalised collapse, how the first aid post-earthquake has been done and finally the perspective of the Re-Construction.

2. Typical local masonry texture and mechanisms of collapse

The structural quality of masonry is very low facing the dynamic earthquake (expected) shock. In general the masonry of Region consists on irregular stone units with scarce efficiency of binder. Frequently the masonry presents two parallel "leaves" having the purpose of realising the two plane surfaces, internal and external. See fig. 1 in which appears typical masonry surfaces and typical collapse mechanism. This kind of masonry can be considered the **1st Vulnerability factor**.

The construction systems or the architectural shape are frequently non appropriated in seismic zone taking into account the structural quality of masonry. Macro-elements exhibit collapse mechanisms at very low external horizontal forces. The interventions recently made for Conservation in the majority of cases did not consider this aspect, but only the aesthetic aspects of masonry has been restored (see example in fig. 2).

1. Wstęp

Katastrofalne trzęsienie ziemi w Regionie Abruzzo (w środkowych Włoszech) zniszczyło większą część dziedzictwa architektonicznego w rejonie L'Aquili (stolica regionu). Referat przedstawia analizę głównych przyczyn tej powszechnej katastrofy budowlanej, pierwszą pomoc po trzęsieniu ziemi i perspektywy odbudowy.

2. Typowa struktura murów i mechanizmy jej zniszczenia

W kontekście ewentualnego trzęsienia ziemi jakość konstrukcji budynków jest bardzo zła. Budynki w tym regionie zbudowane są zwykle z nieregularnych kamiennych elementów połączonych spoiwem w niewystarczającej ilości. Często ich ściany są ścianami szczelinowymi składającymi się z warstwy zewnętrznej i równoległej warstwy wewnętrznej. Na rys. 1 pokazano typowe konstrukcje murowane i typowe mechanizmy ich zawalania się. Ten rodzaj konstrukcji murowanej można uznać za **pierwszy element podatności budowli na zawalenie się**.

Ze względu na złą jakość muru, konstrukcje budowlane lub ich kształt architektoniczny często są nieodpowiednie do strefy sejsmicznej. Części składowe konstrukcji wykazują objawy typowe dla mechanizmu zawalania się już pod działaniem bardzo małych zewnętrznych sił poziomych. Ostatnio wykonane prace konserwatorskie w większości przypadków nie uwzględniły tego aspektu – odrestaurowano tylko stronę estetyczną substancji murowanej (rys. 2).

Roofing with pushing timber structures, 2nd Vulnerability factor, (see example in fig. 3) has been the cause of many collapses (fig. 3): some kind of roofing could be accepted with consistent masonry, not with the masonry we find in the Region.

The collapse mechanisms of two-leaves masonry is what we could call “de-foliation”: this changes radically the repertory of mechanisms for compact masonry of bricks, as we observed frequently in the recent earthquakes of Umbria and Marche (central Italy) [1]. This remark is fundamental to suggest techniques to strengthen it during Re-Construction.

In fig. 4a we can see a typical de-foliation mechanism regarding the curved wall of an apse: this mechanism is totally different from the recurrent observed in Umbria for solid brick masonry in which vertical cracks make evident the trend of the “opening mode” of macro-element apse.

The restoration works (before earthquake) generally in the Region had the object of renew the surface of masonry, in few words the structural needs were cancelled in the Restoration Design.

It seems a non primary aspect on the disaster of L’Aquila monuments: but it was the real driving force of the earthquake catastrophic event. This opinion can be supported by the evidence that

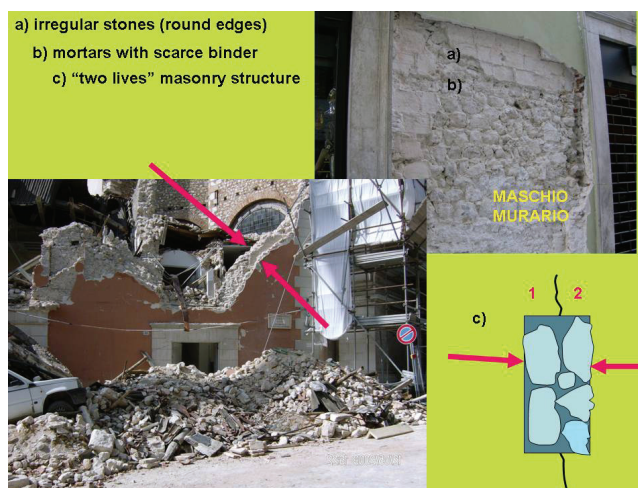


Fig. 1. Typical masonry texture and related collapse mechanism
Rys. 1. Typowa struktura konstrukcji murowanych i związany z nią mechanizm ich zawalania się

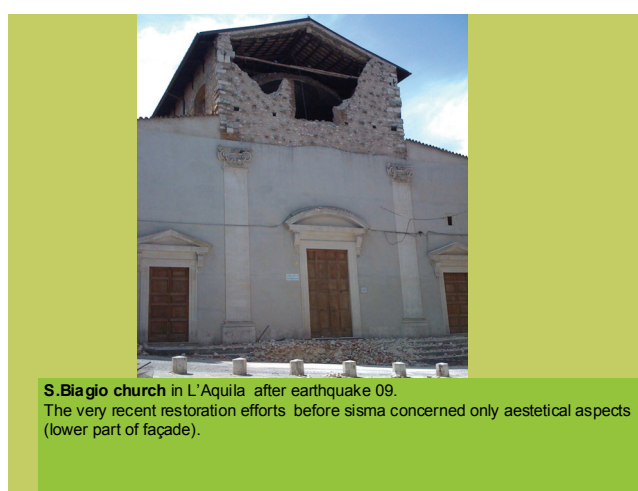


Fig. 2. A typical example of intervention during years before the earthquake. All financial investment has been utilized for aestetical purpose: the world of image requires this

Rys. 2. Przykład typowej interwencji w latach poprzedzających omawiane trzęsienie ziemi. Wszystkie nakłady finansowe wykorzystywano na poprawę estetyki (dbałość o image)



Fig. 3. Problems caused by the irregular and pushing roof timber systems

Rys. 3. Problemy spowodowane nieregularnymi, ciężkimi konstrukcjami dachowymi

w projekcie odbudowy całkowicie pomijano potrzeby konstrukcyjne. W przypadku zabytków L’Aquila to właśnie było główną przyczyną katastrofalnych

Ciężkie drewniane napierające konstrukcje dachowe to drugi element podatności tych budowli na zawalenie się (por. rys. 3), który często przyczyniał się do katastrof budowlanych. Niektóre z tych konstrukcji dachowych można by zaakceptować, ale w przypadku odporniejszych konstrukcji murowanych, lecz nie takich jakie występują w tym regionie.

Mechanizm zawalania się murowanych konstrukcji szczelinowych często określa się terminem „defoliacja”. Różni się on zdecydowanie od typowych mechanizmów zawalania się zwartych konstrukcji murowanych obserwowanych podczas ostatnich trzęsień ziemi w Umbrii i Marche (środkowe Włochy) [1]. To spostrzeżenie ma zasadnicze znaczenie dla opracowania technik wzmocnienia podczas odbudowy.

Rys. 4a pokazuje typowy mechanizm defoliacji łukowej ściany apsydy. Różni się on całkowicie od mechanizmu często obserwowanego w Umbrii w konstrukcjach murowanych z pełnej cegły, w których pionowe rysy są oznaką „otwierania” się makroelementowej apsydy.

Celem prac restauracyjnych w tym regionie przed trzęsieniem ziemi było zwykle odnowienie elewacji konstrukcji murowanych. Tym samym

the majority of monuments were under restoration at moment of the strong motion, few time before the earthquake it was a “celebration” of restoring works of the church of S. Pietro da Coppito (fig. 4b) in L’Aquila. In a long document no one word was spent on the structural problems. Some cultural school now in Italy pretends “to conserve” the monuments in the seismic zone without considering any structural problem!

In the period 1980-1990 the structural interventions on the monuments was a rule in Italy. Often it was applied with R.C. beams on the top of masonry, under the timber roof. A typical example is the bell cell of the tower of the church of S. Pietro of Coppito that was stiffened with R.C. ring beam on the masonry of the tower trunk. The masonry was “multiple leaves” one, then during the 2009 earthquake the mechanism of “de-foliation” was activated (fig. 5) and the whole bell cell had a sliding movement falling down on the soil.

3. First aid to stop complete collapse

A real progress in comparison with previous Italian earthquake, the first aid to Architectural Heritage injured and prone to collapse has been this time very impressive. The work was done mainly by Italian corps of firemen.

This progress has been realised for three “driving forces”, matured after Umbria-Marche (27-09-1997) and Molise (31-10-2002) earthquake experiences [1], [2]:

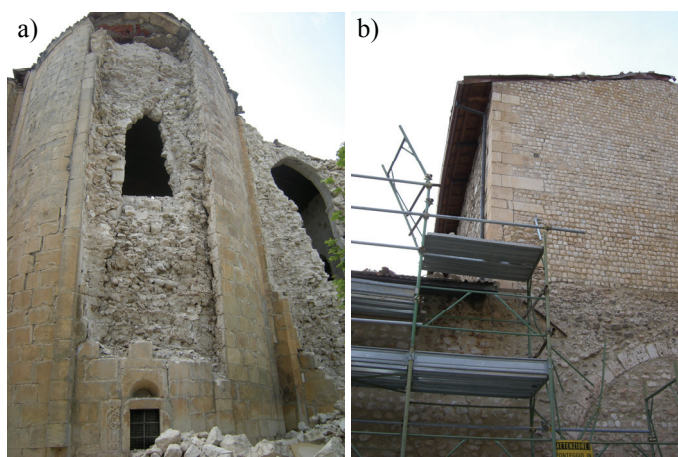


Fig. 4. Masonry with “two-leaves”: the mechanism of “de-foliation” (a); the restoration work active at earthquake time (b): external treatment of surface reproducing historical “two-leaves” stonework
Rys. 4. Ściana szczelinowa dwuwarstwowa: a) mechanizm „defoliacji”, b) prace restauratorskie prowadzone w okresie, gdy nastąpiło trzęsienie ziemi (odnawianie zewnętrznej powierzchni zabytkowego muru szczelinowego)



Fig. 5. The mechanism of “de-foliation” on the top of the tower trunk caused the rigid sliding of the Bell-Cell on the soil
Rys. 5. Mechanizm “defoliacji” u góry trzonu wieży spowodował sztywne osunięcie się celi dzwonowej na ziemię

3. Pierwsza pomoc zapobiegająca całkowitemu zawaleniu się

W porównaniu z poprzednim trzęsieniem ziemi we Włoszech dokonał się rzeczywisty postęp. Tym razem pierwsza pomoc dziedzictwu architektonicznemu, uszkodzonemu i grożącemu zawaleniem, była imponująca. Pracę tę wykonała głównie włoska Straż Pożarna.

Postęp ten był możliwy dzięki następującym trzem elementom udoskonalonym na podstawie doświadczenia wyniesionego z trzęsień ziemi

skutków trzęsienia ziemi. Większość zabytków była w trakcie restauracji, gdy nastąpił ten silny wstrząs. Jakiś czas przed trzęsieniem ziemi, odbyła się uroczystość z okazji odrestaurowania kościoła S. Pietro da Coppito (rys. 4b) w L’Aquila. W przedstawionym długim raporcie nie wspomniano o problemach konstrukcyjnych. Obecnie pewna szkoła ochrony dziedzictwa kulturowego we Włoszech „ochrania” zabytki w strefie sejsmicznej nie uwzględniając żadnych aspektów konstrukcyjnych!

W latach 1980-90 zasadą we Włoszech były doraźne wzmocnienia konstrukcji obiektów zabytkowych, często za pomocą belek żelbetowych umieszczanych na ścianach murowanych pod dachem drewnianym. Typowym przykładem jest cela dzwonowa wieży Kościoła S. Pietro da Coppito. Murowany trzon wieży usztywniono opaską żelbetową. Mur dzwonnicy był wieloszczelinowy. Podczas trzęsienia ziemi w roku 2009 został uruchomiony mechanizm „defoliacji” (rys. 5), cela dzwonowa osunęła się i spadła na ziemię.

- a) new efficient materials, light and strong;
- b) new efficient mechanical devices to apply rapidly the prosthesis;
- c) acquired experience in previous earthquake by the operators, mainly the Italian corps of fire-men.

The main systems of first aid (see fig. 6) can be divided in four categories: a) Spur; b) Contrast; c) Belting; d) Cage.

The **“spur systems”** (as “reinforcing buttress”, Merriam-Webster) are the older system, made of new masonry support. It avoids the overturning of vertical wall. Disadvantages are a) the relevant time for construction b) the encumbrance c) the increase of activating masses during the seismic vibration of after-shocks.

The same structural function can be realised with timber poles.

In this case there is a reduction of masses and less construction times. A variant is the reticular steel spatial structure made with hollow bars used for scaffolding. This can be considered as “industrialized” system because the units and node are standard. In the case of L’Aquila we observed several spur systems mainly made with timber poles (fig. 7a) and some with steel bars, very large and extended.

The **“contrast system”** needs a different structure to absorb the thrust. In the case of L’Aquila, where the damage in historical centre was generalised it is applied in rare situations. Some law restrictions increase the applying difficulties. Some cases have been observed with timber poles (fig. 7b) or steel bar.

The effective innovation can be considered the **“belting system”**. In this case the new structure works in tensile regime and is self closed. The system uses **straps**, the same utilised in the ports to manage heavy packaged goods. To put the strap in strain is simple with a device (ratchet) manually driven. The lay-out of these straps must be designed with accuracy avoiding too long distance between consecutive diverting supports, generally made by timber poles adherent to the wall to be supported. The straps [1] are made with polymeric (polyester) filaments arranged in a textile structure (fabric). These straps can carry from 2000 kg to 16’000 kg with an ultimate strain up to 14%. They have good resistance in humid ambient.

Umbrii-Marche (27-09-1997) i w Molise (31-10-2002) [1], [2]:

- a) nowe lekkie i wytrzymałe materiały;
- b) nowe skuteczne urządzenia mechaniczne do szybkiego “proteżowania”;
- c) doświadczenie nabyte przez operatorów, głównie włoską Straż Pożarną, w poprzednich trzęsieniach ziemi.

Główne systemy pierwszej pomocy (rys. 6) można podzielić na cztery kategorie: a) przyporowe, b) kontrastowe, c) pasowe, d) klatkowe.

Systemy przyporowe to tradycyjne przypory murowane, stosowane, aby zapobiec przewróceniu się ścian pionowych. Wady tego rozwiązania to: a) stosunkowo długi czas wykonania, b) elementy przyporowe zabierają miej-

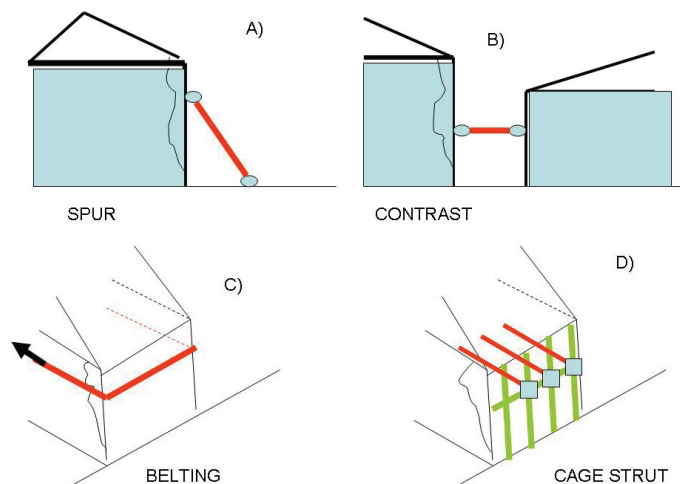


Fig. 6. Scheme of current First-Aid intervention post-sisma
Rys. 6. Schemat przedstawiający obecne systemy pierwszej pomocy po trzęsieniu ziemi

scie w otoczeniu i c) zwiększona masa aktywacyjna w przypadku kolejnych wstrząsów.

Tę samą funkcję konstrukcyjną można uzyskać stosując słupy drewniane, dzięki czemu masa konstrukcji jest mniejsza, a czas wykonania krótszy. Inną odmianą tego rozwiązania jest szkieletowa konstrukcja przestrzenna wykonana z rurek stalowych stosowanych w rusztowaniach. Ten system można nazwać przemysłowym ponieważ elementy i złącza są znormalizowane. W L’Aquila zaobserwowaliśmy kilka systemów przyporowych, niektóre wykonane były ze słupów drewnianych (rys. 7a), a inne, bardzo duże i rozbudowane, z rurek stalowych.

System kontrastowy wykorzystuje inną konstrukcję budowlaną do zamortyzowania naporu. W L’Aquila, gdzie zniszczenia w obszarze historycznym były rozległe, stosowano go rzadko. Tym bardziej, że przepisy prawne ograniczają jego stosowanie. Odnotowano kilka przypadków zastosowania tego systemu z wykorzystaniem słupów drewnianych (rys. 7b) lub stalowych rurek.

System pasowy to skuteczna innowacja. W tym przypadku wykonana konstrukcja pracuje w warunkach rozciągania i jest zamknięta. System wykorzystuje pasy, takie same, jak te używane w portach do przeladunku ciężkich towarów pakowanych. Pasy są w prosty sposób napinane za pomocą ręcznego urządzenia (mechanizm zapadkowy). Układ pasów musi być precyzyjnie zaprojektowany, aby uniknąć zbyt dużych odległości między kolejnymi podporami kie-



Fig. 7. Spur system (a) and Contrast system (b)
Rys. 7. System przyporowy (a) i system kontrastowy (b)

In fig. 8 there is an example of provisional belting structure at the S. Pietro da Coppito (L'Aquila) façade, prone to overturn after earthquake (S. Russo, consulting). These straps are good substitute of steel ropes because are more flexible and adaptable to small radius edges. The problem of moderate stiffness can be overturned using two or three layers superimposed of straps. The application utilises efficient mechanical lifting devices; it is rapid, low cost and versatile.

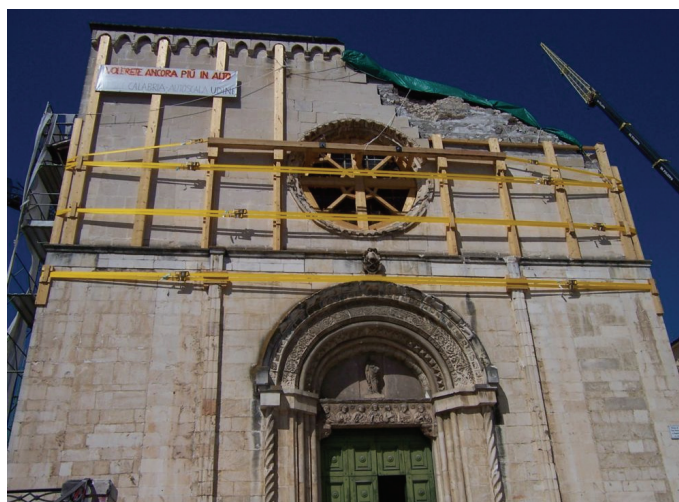


Fig. 8. Belting the façade of S. Pietro da Coppito church (L'Aquila)
Rys. 8. Opasywanie fasady kościoła S. Pietro da Coppito (L'Aquila)

In same cases has been utilised a “cage systems” in which all the construction is wrapped by reticulated structure, self closed. Generally are used timber poles or steel profiles. An example is shown in fig. 9 in which we see a building close to railway line wrapped to protect the train transits.



Fig. 9. Steel cage system with spur aid
Rys. 9. System klatkowy

runkowymi (zwykle w postaci słupów drewnianych przylegających do wspieranej ściany). Pasy [1] wykonane są z włókien polimerowych (poliester) ułożonych w strukturze tkaninowej. Pasy te mogą przenosić obciążenie od 2000 kg do 16000 kg przy odkształceniu granicznym rzędu 14%. Wykazują one wysoką wytrzymałość w warunkach dużej wilgotności.

Na rys. 8 pokazano tymczasową konstrukcję pasową na fasadzie kościoła S. Pietro da Coppito (L'Aquila), która mogła runąć po trzęsieniu ziemi (S. Russo).

Dzięki temu, że są bardziej giętkie i lepiej dopasowują się do krawędzi o małym promieniu, pasy te dobrze zastępują liny stalowe. Problem małej sztywności można rozwiązać nakładając dwa lub trzy pasy na siebie.

System jest tani, uniwersalny, szybko daje się zamontować i wykorzystuje efektywne urządzenia podnoszące.

4. “Post-mortem” analysis and re-construction problems

In the '80 – '90 years the Dominant Culture of Monument Restoration in Italy was inclining to structural interventions to historical building in seismic zones: generally were used techniques based on Reinforced Concrete beams (on the top of building, under the roof) or Steel (prosthesis). After that period prevailed the non-intervention policy, the conviction that during the earthquake the R.C. beams played a role of destroying the masonry below had a large consensus. For small stresses, in quasi-elastic range, the difference of stiffness modulus between masonry and R.C. structure is not so relevant, but the ultimate state makes the difference. The specific fracture energy to create new surfaces is very different: that belonging to R.C. can be also 100 times that relative to masonry. When the vibration energy of the earthquake is transferred to the structure where masonry and R.C. coexist, the masonry collapse anticipates (absorbing less energy) that of R.C. beams that seems to be responsible of the crisis (see fig. 10 and fig. 11).

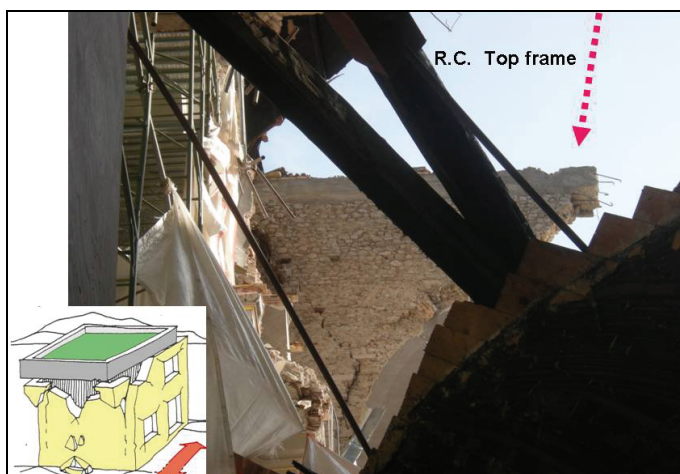


Fig. 10. Top reinforced concrete beams can give negative effects
Rys. 10. Belki żelbetowe na górze budynku mogą mieć negatywne skutki

As example of non-soft intervention I want to mention the “campanile” of a church in province of Teramo (Abruzzo Region). During the earthquake it vibrated strongly but the appearance was without any damage. The motivation is that during past decades it was strengthened with an internal lining of R.C. and external mock masonry (see fig. 12) in the sense that the stones were fixed on a concrete bed. The campanile is attached to the church: the damage is localised on the wall of the church. This confirms the statement that any strengthening on a part of complex structure changes the mechanism of damage involving the weakest parts.

4. Analiza przyczyn katastrofy i problemy odbudowy

W okresie od lat osiemdziesiątych do dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku w dziedzinie ochrony zabytków w strefach sejsmicznych dominowała polityka doraźnych wzmocnień przy zastosowaniu belek żelbetowych (pod dachem na górze budynku) lub stalowych (proteza). Po tym okresie przeważała polityka nieinterwencji. Panowało przekonanie, że podczas trzęsienia ziemi belki żelbetowe przyczyniały się do zniszczenia konstrukcji murowanej znajdującej się pod nimi. Przy małych naprężeniach w zakresie quasi-sprężystym różnica między modułem sztywności muru i konstrukcji żelbetowej nie jest tak istotna, ale w przypadku granicznego stanu nośności jest inaczej. Energia pęknięcia tworzącego nowe powierzchnie jest zupełnie inna w przypadku betonu zbrojonego niż w konstrukcji murowanej. W betonie zbrojonym może być sto razy większa niż w murze. Gdy energia drgań trzęsienia ziemi zostanie przekazana budowli, w której współwystępują mur i beton zbrojony, zawalenie się muru (który pochłania mniej energii) poprzedza zawalenie się belek żelbetowych. To zjawisko powoduje ostateczną destrukcję obiektu (por. rys. 10 i 11).



Fig. 11. Reinforced Concrete Beams (previous strengthening systems) participate to mechanism of collapse
Rys. 11. Belki żelbetowe (poprzednio stosowany system wzmocnienia) przyczyniają się do zawalenia się budynków

Przykładem takiej drastycznej interwencji jest dzwonnica kościoła w prowincji Teramo (region Abruzzji). Podczas trzęsienia ziemi doznała ona silnych wibracji, ale bez widocznych uszkodzeń. Wcześniej została wzmocniona wewnątrz okładziną z betonu zbrojonego, a na zewnątrz pozorowanym murem (kamienie utwierdzone w betonie) (rys. 12). Dzwonnica połączona jest z kościołem. Uszkodzenie pojawiło się w ścianie kościoła. Jest to dowód na to, że wzmocnienie części konstrukcji zespołowej zmienia mechanizm uszkodzenia jej najsłabszych części.

Now we face the demand for Re-Construction because the people want to have again the lost historical heritage and then it is not a problem of Ruin Conservation. The reconstruction must change something to reduce the original vulnerability of the construction. Slender walls made with no regular stones and joints (example in fig. 13) must be replaced by strongest masonry texture. A suggestion is "to band" (Italian: *listare*) the new walls with horizontal cordons of reinforced brick masonry. As example we mention the church of "St Joan" in Barcelona (fig. 14) whose masonry is banded even if the zone is a low seismic risk.

The composite materials are now widely used in the strengthening of masonry historical constructions [5], [3], [6]; basic design principia are presented in [7] and a State of Art can be delineated from a recent specialised seminar devoted to it [8].

The first application of FRP (Fibre Reinforced Polymer) to strengthen historical construction has been made for two domes of the cathedral of Città di Castello (Umbria Region, Italy) in spring 1997, before the earthquake of September 1997; after that date similar applications have been made with FRP in many Italian churches and historical monuments, like the intervention (A. Di Tommaso, [3]) on the huge cross vaults of Basilica of S. Petronio in Bologna (year 2000). A remarkable intervention for Re-Construction was that of S. Francesco of Assisi where aramid and carbon composites have been used (P. Rocchi and G. Croci, in [3]).

An evolution of composite materials, more appropriate to masonry, are the FRCM (Fibre Reinforced Cementitious Materials) in which the matrix is cement based polymer modified. These



Fig. 12. Strong intervention using reinforced concrete and "false" masonry

Rys. 12. Drastyczna interwencja z użyciem betonu zbrojonego i imitacji muru



Fig. 13. Slender walls, "two leaves" texture: need to band (Italian: "listare") it

Rys. 13. Cienkie ściany dwuwarstwowe wymagające zastosowania pasemek

Ponieważ społeczeństwo domaga się przywrócenia utraconego dziedzictwa kulturowego, obecnie стоимy przed problemem odbudowy, a nie konserwacji ruin. W odbudowywanych obiektach muszą być wprowadzone zmiany mające na celu zmniejszenie ich pierwotnej podatności na uszkodzenie. Cienkie ściany zbudowane z nieregularnych kamieni połączonych cienką warstwą zaprawy (rys. 13) muszą zostać zastąpione solidniejszym murem. W tych nowych ścianach proponuje się „przeplatać” (wł. *listare*) warstwy kamieni poziomymi warstwami cegieł (mur pasemkowy) Jako przykład można podać kościół św. Joanny w Barcelonie (rys. 14), którego ściany mają strukturę pasemkową, chociaż jest to strefa niskiego ryzyka sejsmicznego.

Materiały kompozytowe są obecnie szeroko stosowane do

wzmacniania murów obiektów zabytkowych [5], [3], [6]. Podstawowe zasady ich stosowania można znaleźć w [7], a najnowsze osiągnięcia w tej dziedzinie przedstawiono na specjalistycznym seminarium [8].

FRP (polimer wzmocniony włóknami) po raz pierwszy zastosowano do wzmocnienia obiektu zabytkowego wiosną 1997 roku (przed trzęsieniem ziemi, które wystąpiło we wrześniu tegoż roku). Wzmocniono nim dwie kopuły Katedry Città di Castello (region Umbria, Włochy). Od tego czasu FRP znalazł podobne zastosowanie w wielu włoskich kościołach i obiektach zabytkowych, na przykład wzmocnienie (A. Di Tommaso, [3]) ogromnych sklepień krzyżowych Bazyliki S. Petronio w Bolonii (2000). Na szczególną wzmiankę zasługuje odbudowa kościoła Św. Franciszka z Asyżu, gdzie zastosowano kompozyty aramidowe i węglowe (P. Rocchi i G. Croci, [3]).

Inną odmianą materiałów kompozytowych, szczególnie nadającą się do wzmocniania muru, jest FRCM

materials have been used to strength masonry but also for Re-Construction. In fact for the reconstruction of the cathedral of Noto (Sicily) some joints of new masonry have been reinforced with FRCM. The same material has been used in the joint of the ancient roman arch of "Porta Montanara" that has been taken to pieces, translated and reassembled in original place.

A proposal, consistent with the needs of Conservation and structural robustness, is to built or better to rebuilt lacking wall with "banded masonry" (Italian: muratura listata). The band should be made of brick reinforced with FRCM. The "banded masonry" has old

origin, we find it in old roman constructions but it is used also in more recent architectures, see for example fig 14 of a church in Barcelona. Banded masonry consists on two or three brick courses (band) spacing out the masonry made by irregular stones. Now an advancement, compliant to monument conservation, could be to reinforce the band with FRCM (layers of composites, textile reinforced in inorganic matrix) in the joints, among bricks (see scheme in fig. 15). In this solution the new wall would present less vulnerability to collapse mechanisms widely observed in this earthquake preserving the nature of masonry construction.

A consistent improvement about top R.C. beams under the roof, useful to close the structural system and contributing to have box behaviour, could be done with the following concepts:

a top beams with low bending stiffness in the wall plane but very stiff and strong in extensional mode. Similar solutions have been proposed by Borri [3] using brick reinforced with composite materials (FRP or FRCM) and by Doglioni [4] using mortar reinforced by steel reticulated structure.



Fig. 14. "banded masonry" in the façade of Saint Joan church in Barcelona

Rys. 14. Mur pasemkowy fasady kościoła św. Joanny w Barcelonie

(materiał cementowy wzmocniony włóknami), w którym osnową jest zmodyfikowany polimer na bazie cementu). Takie materiały były stosowane do wzmacniania konstrukcji murowanych, a także w ich rekonstrukcji. Przy odbudowie katedry w Noto (Sycylia) niektóre połączenia nowego muru zostały wzmocnione kompozytem FRCM. Ten sam materiał zastosowano do połączeniu części starożymskiego łuku Porta Montanera, który został rozebrany, przemieszczony i złożony w całość w pierwotnym miejscu.

Propozycja odpowiadająca potrzebom ochrony i solidności konstrukcji to budowa, lub lepiej, odbudowa, brakujących ścian w formie muru pasemkowego (wł. murata listata).

Pasemka powinny być wykonane z cegieł wzmocnionych kompozytem FRCM. Mur pasemkowy pochodzi ze starożytności (występuje w starożymskich budowlach), ale jest stosowany także w bardziej współczesnych konstrukcjach architektonicznych. Na przykład w kościele w Barcelonie pokazanym na rys. 14. W murze pasemkowym warstwy nieregularnych kamieni przeplatane są dwiema lub trzema warstwami cegieł.

Udoskonaleniem, zgodnym z regułami ochrony obiektów zabytkowych, byłoby wzmocnienie tych

pasemek kompozytem FRCM (warstwy kompozytu, tkanina z osnową nieorganiczną) w połączeniach między cegłami (rys. 15). Dzięki temu rozwiązaniu nowa ściana byłaby mniej podatna na zawalenie podczas trzęsienia ziemi i zachowałaby charakter muru.

W przypadku belek stosowanych na górze pod dachem, udoskonalenie zamykające układ konstrukcyjny i przyczyniające się do jego pracy skrzynkowej, polegałoby na zastosowaniu belek o małej sztywności zginania w płaszczyźnie ściany, ale bardzo sztywnych i mocnych na rozciąganie. Podobne rozwiązania zaproponowali Borri [3] (cegły wzmoc-

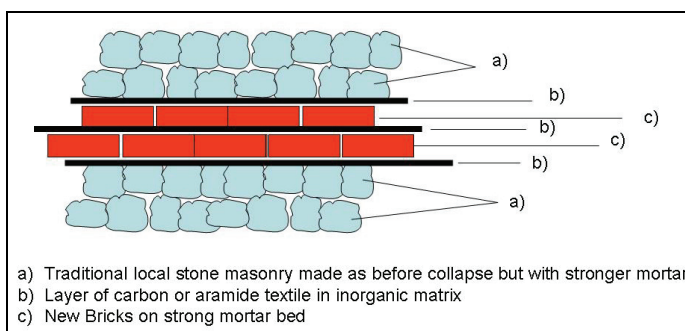


Fig. 15. Proposed integrated texture for RECONSTRUCTION: FRCM reinforcing brick band at different level of new masonry

Rys. 15. Proponowana struktura wzmocnienia: pasemka cegieł wzmocnione kompozytem FRCM na różnych poziomach nowego muru

The challenge is to respect the typology of masonry and the structural system but using present technology, appropriate with the knowledge of seismic behaviour of masonry constructions.

nione materiałami kompozytowymi FRP lub FRCM) oraz Doglioni [4] (zaprawa z wzmocnieniem w postaci siatki stalowej).

Wyzwanie stanowi respektowanie oryginalnej topologii muru i układu konstrukcyjnego przy zastosowaniu nowoczesnej technologii opartej na wiedzy o sejsmicznym zachowaniu się konstrukcji murowanych.

Literatura • References

- [1] Marchetti L., *Le opere provvisionali e la messa in sicurezza dei beni*, in *Beni Culturali in Umbria: dall'emergenza sismica alla ricostruzione*, M. Picarretta Ed., Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Roma, ISBN 88-86210-58-2.
- [2] Podestà S. et al., *Il problema della messa in sicurezza dei beni monumentali*, in *Beni Monumentali e Terremoto: dall'emergenza alla ricostruzione*, G.Cifani et al. Eds, Regione Molise, DAST-UOIG CNR L'Aquila 2005.
- [3] Different Authors, *Consolidamento Contemporaneo – Edilizia storica*, in *Trattato sul Consolidamento*, P. Rocchi Scientific Director, Mancosu Editore, Roma 2003, ISBN 88-87017-06-9.
- [4] Doglioni F., Mazzotti P., *Codice di Pratica*, Edited by Regione Marche, Ancona 2007, ISBN 978-88-902669-0-4.
- [5] Di Tommaso A., Focacci F., *Strengthening Historical Monuments with FRP: a Design Criteria Review*, in *Composites in Construction: a Reality, Int. Workshop, Capri*, E.Cosenza, G.Manfredi, A.Nanni Eds., Proc. ASCE 2002, ISBN 0-7844-0596-4.
- [6] Jasienko J., Lodygowski T., Rapp P., *Naprawa, konserwacja i wzmocnianie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych*, Wydawnictwo DWE, Wrocław 2006, ISBN 83-7125-143-2.
- [7] Focacci F., *Rinforzo delle murature con materiali compositi*, Flaccovio Editore, Palermo 2008, ISBN 978-88-7758-819-7.
- [8] Di Tommaso A. ed., *Mechanics of Masonry Structures strengthened with Composite Materials*, Seminar in Venezia, April 2009, Proc. Printed by Pitagora Editrice s.r.l., Bologna, SBN 88-371-1771-X.

* LabSCo – Laboratorio di Scienza delle Costruzioni
Research Unit “Controllo Strutture Monumentali” CdSM
Università IUAV di Venezia

Abstract

In this paper some aspects of 2009 strong earthquake in Abruzzo Region have been analysed.

First of all a reflection on the causes of so big disaster induced to evaluate a strong vulnerability of masonry due to typology of its texture and poor mortars.

A second topic examined is the advancement of first aid to collapsing building: new materials, new structural systems and recent mechanical lifting devices made this chapter totally different from previous ones relative to past earthquakes in middle Italy.

Last part is devoted to the problem of Reconstruction: seems consistent to rebuild the monument with a reinforced masonry, named “banded masonry” to reduce drastically the vulnerability of constructions, preserving the peculiar character.

Streszczenie

Artykuł przedstawia analizę niektórych aspektów silnego trzęsienia ziemi, które nawiedziło region Abruzzo w 2009 r. Ustalono, że jego katastrofalne skutki spowodowane były dużą podatnością tamtejszych konstrukcji murowanych (ściany szczelinowe z kamieni słabo powiązanych zaprawą) na zawalenie się.

Drugi temat to postęp, jaki dokonał się w dziedzinie pierwszej pomocy w ratowaniu budynków zagrożonych zawaleniem. Nowe materiały, nowe układy konstrukcyjne i nowoczesne urządzenia podnoszące sprawiły, że ten etap przebiegł nieporównywalnie lepiej niż w poprzednich trzęsieniach ziemi, które nawiedziły środkowe Włochy.

Ostatnia część referatu dotyczy problemu odbudowy. Wydaje się, że odpowiednim rozwiązaniem jest zastosowanie tzw. muru pasemkowego w celu radykalnego zmniejszenia podatności budynków na zawalenie się, a jednocześnie zachowania ich szczególnego charakteru.