

Antonio Borri\*, Marco Corradi\*  
Emanuela Speranzini\*, Andrea Giannantoni\*\*

## Rubble stone masonry strengthened using “reticolatus” system

## Mur z kamienia łamanego wzmocniony za pomocą systemu „reticolatus”

### 1. Introduction

The consolidation and strengthening of masonry walls that are subjected not only to their own weight but also to possible dynamic stresses constitute one of the most important reinforcement works for achieving an adequate level of safety.

This is because poor quality in the mechanical characteristics of the masonry (compressive strength, shear strength, etc.), especially in old historic buildings, has often been the cause of collapsing or of serious damage, for example during seismic events.

Another element that has a considerable impact on the seismic behaviour of a masonry construction is the connection between vertical walls and between these and the horizontal elements. If these connections are present and effective, they can allow the structure to respond adequately to dynamic stress by means of a “box-like” behaviour, without a loss of balance in the individual sections. If these connections are lacking, each individual element (a wall, floor slab, etc.) will be more vulnerable, since it will be free to collapse separately from the rest of the construction.

The techniques used for restoring or reinforcing masonry structures, such as the “scuci-cuci” (patching) of the masonry, the repairing of cracks by means of perforations reinforced with metal bars, circling with strips of composite material, injection into the masonry of cement grout or lime-based mixtures, reinforced plaster, etc., present

### 1. Wstęp

Jednym z głównych sposobów zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa budowlom jest wzmocnienie ich ścian murowanych, które nie tylko obciążone są własnym ciężarem, ale także mogą być narażone na obciążenia dynamiczne.

Słabe własności mechaniczne (wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na ścinanie, itd.) muru, szczególnie w starych budowlach zabytkowych, często były przyczyną ich zawalenia się lub poważnego uszkodzenia, na przykład podczas trzęsienia ziemi.

Inny czynnik mający duży wpływ na sejsmiczne zachowanie się budowli murowanych to połączenia pionowych ścian ze sobą i połączenia ścian z elementami poziomymi. Jeśli takie połączenia występują i są skuteczne, budowla może dzięki pracy skrzynkowej odpowiednio zareagować na obciążenia dynamiczne, nie tracąc równowagi w swoich poszczególnych częściach. Jeżeli takich połączeń nie ma, każdy indywidualny element (ściana, płyta stropowa, itd.) będzie bardziej podatny na zawalenie się, niezależnie od reszty budowli.

Techniki stosowane w celu odrestaurowania lub wzmocnienia konstrukcji murowanych, takie jak szpachlowanie (scuci-cuci), naprawa pęknięć za pomocą otworów zbrojonych prętami metalowymi, wzmocnianie taśmami z materiałów kompozytowych, wstrzykiwanie zaprawy cementowej lub mieszanek bazujących na wapie, tynk zbrojony itd., mają swoje ograniczenia.

some limits and problems. This is especially true in the case of irregular masonry in which it is desired to keep the exterior facing unaltered.

The technique of the deep repointing of the mortar joints that consists of stripping the joints in the masonry by removing the original poor-quality mortar and then repointing the joints with a good quality mortar can be used when the fair-face masonry must be kept. Its effectiveness, however, is limited as regards the increase in the mechanical properties of the masonry, especially if the walls are very thick.

This paper describes a new reinforcement system, called "reticolatus", which is proposed separately or in addition to other techniques (such as injections) and it allows the reinforcement of both regular and irregular masonry, with a limited impact.

As is demonstrated in the experiments presented below, it can make important contributions as regards both horizontal stresses, such as those caused by earthquakes, as well as static vertical loads.

## 2. Description of the reinforcement system

The reinforcement system consists of a continuous mesh of tiny cords made of high strength steel, which are inserted into the mortar joints and thus embedded in the wall.

### 2.1. Materials used

The system is based on the use of following materials:

- a) high strength steel cords, which can be made from coils found on the market. The coils vary in length from 15 m up to 1500 m (fig. 1), and consist of a series of cords laid out parallel to each other and held together by a polyester mesh. It is easy to detach the steel cords out from the strip so as to use them separately. The specifications of the single cord 3×2 are shown in table 1. Other materials may also be used, such as composite materials, provided it is possible to use a cement or lime-based mortar as a matrix.
- b) galvanized steel bars threaded at the ends, which, along with a nut, washer and "cord locking device" (fig. 1), make it possible to hold the cord inside the mortar joint.

Tab. 1. 3×2 cord properties  
Właściwości linki 3×2

Fiber type Typ włókna	3×2
Cross section area (mm <sup>2</sup> ) Przekrój poprzeczny (mm <sup>2</sup> )	0.481
Failure tensile load (N) Niszczące obciążenie rozciągające (N)	1539
Density (g/m) Gęstość (g/m)	18.45
Elongation at failure (%) Wydłużenie po zerwaniu (%)	1.6

Szczególnie w zastosowaniu do niejednorodnego muru, którego lico ma zostać zachowane w niezmienionym stanie.

W przypadku, gdy musi być zachowane lico muru, można zastosować technikę głębokiego uzupełniania spoin w murze, polegającą na usuwaniu słabej oryginalnej zaprawy i uzupełnianiu spoin zaprawą dobrej jakości. Jeżeli chodzi o poprawę własności mechanicznych skuteczność tej techniki jest jednak ograniczona, szczególnie gdy ściany są bardzo grube.

W artykule opisano nowy system wzmacniająca nazywany „reticolatus”, który proponuje się stosować osobno lub w połączeniu z innymi technikami (takimi jak iniekcje). System ten umożliwia wzmacnianie zarówno jednolitego, jak i niejednolitego muru.

Jak wykazały badania przedstawione poniżej, system ten może zwiększyć odporność muru na naprężenia poziome (np. spowodowane trzęsieniem ziemi) i pionowe obciążenia statyczne.

## 2. Opis sytemu wzmacniającego

System wzmacniający składa się z ciągłej siatki linek ze stali o dużej wytrzymałości, które wprowadza się w spoiny i osadza w nich.

### 2.1. Stosowane materiały

W systemie tym stosowane są następujące materiały:

- a) linki ze stali o dużej wytrzymałości, które dostępne są w handlu w postaci kręgów. Kręgi mogą mieć długość od 15 to 1500 m (rys. 1) i składają się z szeregu linek ułożonych równolegle do siebie i utwierdzonych w siatce poliestrowej. Linki dają się łatwo odłączyć od taśmy i można je używać osobno. Dane techniczne pojedynczej linki 3×2 przedstawiono w tabeli 1. Można używać innych materiałów (np. materiałów kompozytowych) pod warunkiem, że jako osnowę da się zastosować zaprawę na bazie cementu lub wapna.
- b) pręty ze stali ocynkowane gwintowane na końcach, które wraz z nakrętką, podkładką i blokadą linki (rys. 1) umożliwiają osadzenie linki w spoinie.

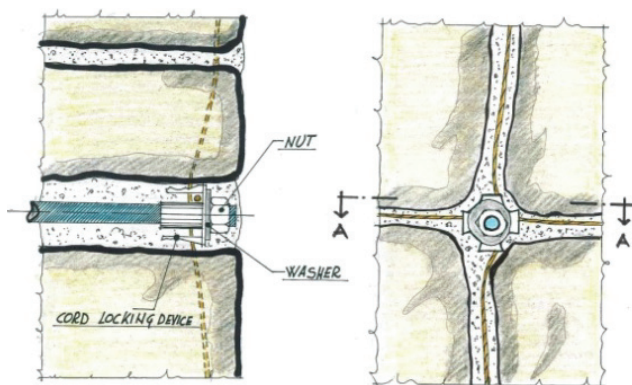


Fig. 1. Close-up of hooking system  
Rys. 1. Widok z bliska systemu kotwiącego



Fig. 2. A typical continuous mesh  
Rys. 2. Typowa siatka ciągła

The most interesting property of the cords used in the proposed system is the fact that their very small size (typical average diameter 1 mm) and their shape, formed by wrapping the individual steel filaments around each other helically (typically 3 or 4 filaments) give rise to high bonding and compatibility between the cords and the mortar surrounding them. This ensures excellent mechanical behavior of the “stone-mortar-cord” assembly. Furthermore, because the cords are so small, they can be easily bent into shape as required in order to pass them through the joints between the various pieces of stone forming the wall (fig. 2).

As concerns the chemical compatibility of the above materials, a number of corrosion tests were carried out which provided positive results, even in particularly aggressive environments. When lime-based mortar is utilized for repointing, it is best to use composite material cords (aramid fibers); metallic cords can also be used if suitable protection (e.g. a plastic sheath or spray coating) is applied beforehand. For this type of application the adhesion between cord and matrix is not fundamentally important, it being possible to count on a mechanism of mutual confinement between the mesh and the stone.

## 2.2. The application

The application is done in the following stages:

- strip the mortar joints in the wall to a depth of 6-8 cm, being careful not to remove the original mortar where it is particularly strong;
- hydroblasting of the stripped joints, doing this operation a few hours before the subsequent application of mortar;
- inserting of the transverse elements (threaded galvanized steel bars, complete with nut, washer and cord locking device). They are typically placed in a minimum number of 4 per square meter, in meshes evenly spaced when it is possible;

Najbardziej interesującą własnością linek stosowanych w proponowanym systemie jest to, że dzięki ich niewielkim wymiarom (typowa średnica 1 mm) i kształtowi, uzyskanemu przez spiralne splecenie pojedynczych (zwykle 3-4) włókien, dobrze łączą i wiążą się one z otaczającą je zaprawą. Zapewnia to doskonałe zachowanie się pod względem mechanicznym zespołu kamień-zaprawa-linka. Dzięki temu, że linki te są krótkie, dają się łatwo wyginać w odpowiedni kształt umożliwiającą przeprowadzenie ich w spoinach między kamieniami tworzącymi mur (rys. 2).

W celu zbadania kompatybilności chemicznej powyższych materiałów przeprowadzono szereg testów na korozję i uzyskano pozytywne wyniki, nawet w szczególnie agresywnych środowiskach. W przypadku stosowania zaprawy na bazie wapna do uzupełniania spoin, najlepiej stosować linki z materiałów kompozytowych (włókna aramidowe). Można używać także linek metalowych, jeśli przedtem zastosuje się odpowiednią ochronę (np. powłokę plastikową lub natryskowaną).

## 2.2. Procedura

Procedura składa się z następujących etapów:

- zdjęcie spoiny w murze do głębokości 6-8 cm, zwracając uwagę na to, aby nie usunąć oryginalnej zaprawy w tych miejscach, gdzie jest ona szczególnie mocna;
- oczyszczenie wodne pozostałej spoiny; operację tę należy przeprowadzić kilka godzin przed nałożeniem zaprawy;
- wsunięcie elementów poprzecznych (gwinutowanych ocynkowanych prętów stalowych wraz nakrętką, podkładką i blokadą linki); typowo 4 sztuki na metr kwadratowy możliwie równo rozmieszczone w siatce;
- utwierdzenie prętów w murze za pomocą specjalnych zapraw bezskurczowych lub żywic epoksydowych;

- fixing of the bars to the wall using specific non-shrink mortars or epoxy resins;
- first repointing with mortar;
- insertion of the UHTSS cords into the stripped joints, passing them through the cord locking devices, proceeding horizontally or vertically across the entire facing being reinforced. If the individual cords are not long enough, they can be joined with resin or simply overlapped with each other by about 20 cm;
- if considered necessary additional cords can be applied diagonally in both directions;
- tightening of the nuts to lightly tension the cords;
- second repointing of the mortar in the joints, completely covering both the cords and the heads of the eyebolts or bars;
- aesthetic finishing of the joints by brushing them with a metal brush.

From a mechanical perspective, the benefits that can be expected are: improved mechanical characteristics (both compression and shear strength, as well as flexural strength for loads both in and out of the plane of the masonry panel), the ability to extensively connect the vertical walls to one another and the vertical walls to the horizontal elements, the possibility of giving the masonry tensile strength, transverse connections between the facings of the masonry.

The system proposed can be used either locally, for example on single wall panels in existing structures (boundary walls, city walls, etc.), or overall, i.e. as a reinforcement system for a masonry construction for improving the overall behavior of entire buildings, especially as regards structural behavior during earthquakes.

### 3. Experiments

In order to investigate the effectiveness of the proposed reinforcement technique, three different series of tests were planned: compression tests using two flat jacks, diagonal tests and flexural tests.

#### 3.1. Compression tests

The compression tests were carried out on the city walls of Trevi (Perugia – Italy). Masonry portions of walls about 50 cm thick were tested by being subjected to compression on a single vertical axis using two flat jacks. During the test the values of the applied pressure and the deflection of the masonry were recorded at each load step. These values were processed to give the stress-strain diagrams (fig. 3), from which the compression

- pierwsze uzupełnienie spoiny zaprawą;
- wprowadzenie linek ze stali o dużej wytrzymałości w szczelinę po usuniętej spoinie i przewleczenie ich przez bloki linki, idąc poziomo lub pionowo, w całym wzmocnianym licu; jeżeli pojedyncze linki nie są wystarczająco długie, można je połączyć za pomocą żywicy lub po prostu zastosować 20 cm długą zakładkę;
- w razie potrzeby można zastosować dodatkowe linki po przekątnej w obu kierunkach;
- dokręcenie nakrętek w celu lekkiego napięcia linek;
- drugie uzupełnienie zaprawy w spoinach, tak aby całkowicie pokryć linki, łby śrub oczkowych i pręty;
- wykończenie estetyczne spoin przez oczyszczenie ich szczotką drucianą.

Z punktu widzenia własności mechanicznych można oczekiwać następujących korzyści: lepsze charakterystyki mechaniczne (wytrzymałość na ściskanie, ścinanie i zginanie w przypadku obciążeń działających zarówno w płaszczyźnie, jak i poza płaszczyznę płyty muru), możliwość połączenia w szerokim zakresie ścian pionowych ze sobą oraz ścian pionowych z elementami poziomymi, możliwość nadania wytrzymałości na rozciąganie poprzecznym połączeniem między licami muru.

Proponowany system można stosować lokalnie, np. na pojedynczych płytach ściennych w istniejących konstrukcjach (mury graniczne, mury miasta, itd.) lub globalnie, tzn. jako system wzmacniający całe konstrukcje murowane w celu poprawy ich pracy, szczególnie podczas trzęsień ziemi.

### 3. Próby

W celu zbadania skuteczności proponowanej techniki wzmacniania, zaplanowano i przeprowadzono trzy różne serie prób: próby ściskania z użyciem dwóch podnośników płaskich, próby ścinania i próby zginania.

#### 3.1. Próby ściskania

Próby ściskania przeprowadzono na murach miejskich Trevi (Perugia, Włochy). Bloki muru o grubości 50 cm poddawano próbie ściskania w jednej osi pionowej za pomocą dwóch podnośników płaskich. Podczas próby w każdym kroku obciążania rejestrowano wartości nacisku i ugięcia muru. Na podstawie tych wartości sporządzano wykresy rozciągania (rys. 3) i obliczano wytrzymałość na ściskanie oraz

resistance and Young's modulus calculated at 33% of the maximum stress were determined.

The results shown in table 2 and in figure 3, regard: the unreinforced masonry (URM), the deep repointed masonry (REP) and the masonry reinforced with the reticolatus technique (SRE). Upon analysis of the results, it can be stated that the reticolatus technique is able to increase significantly the compressive strength  $\sigma_{max}$  of the masonry: a mean value of 1.29 MPa was measured, corresponding to an increase of compression strength of 116% compared to the unreinforced panels ( $\sigma_{max} = 0.595$  MPa). Furthermore, the mean increase of the masonry reinforced with repointing alone ( $\sigma_{max} = 0.834$  MPa) is about 40% compared to unreinforced panel.

Tab. 2. Results of the tests with double flat jacks  
Wyniki prób ściskania za pomocą dwóch podnośników płaskich

	Max compression stress $\sigma_{max}$ (MPa) Maksymalne obciążenie ścisające $\sigma_{max}$ (MPa)	Young's modulus $E_{1/3}$ (MPa) Moduł Younga $E_{1/3}$ (MPa)
URM 01	0.595	480
REP 02	0.807	393
REP 03	0.857	512
SRE 04	1.261	486
SRE 05	1.312	2416

As concerns the failure mechanism, it was seen that a series of vertical cracks formed between the two flat jacks. Furthermore, there was no substantial differentiation of the type of failure between the unreinforced masonry, the repointed masonry and the masonry reinforced with metal fibers. Whereas in the cases of the unreinforced masonry and of the repointed joints the failure occurred with a small number of fairly large vertical cracks, in the case of reticolatus reinforced masonry a larger number of smaller vertical cracks occurred, indicating an improvement in the mechanical behavior of the masonry due to a probable decrease in the concentration of the maximum stresses within the masonry.

### 3.2. Shear tests

The diagonal compression test defined by the ASTM E 519-81 Standard was designed in order to evaluate the effectiveness of the reinforcement as regards shear stress. The tests were performed on site on three stone masonry panels cut from a 17<sup>th</sup> century building in Pale, near Foligno (Perugia – Italy).

The panels, having a thickness of 53 cm and

moduł Younga przy 33% maksymalnego naprężenia.

Wyniki przedstawione w tabeli 2 i na rysunku 3 dotyczą muru niewzmocnionego (URM), muru z głęboko uzupełnionymi spoinami (REP) i muru wzmocnionego przy zastosowaniu techniki reticolatus (SRE). Na podstawie analizy tych wyników można stwierdzić, że stosując technikę reticolatus można znacznie zwiększyć wytrzymałość na ściskanie  $\sigma_{max}$  muru – średnia wartość zmierzona 1,29 MPa odpowiadała wytrzymałości na ściskanie rzędu 116% w stosunku do płyt niewzmocnionych ( $\sigma_{max} = 0,595$  MPa). Ponadto, średni wzrost wytrzymałości muru wzmocnionego tylko poprzez uzupełnienie spoin ( $\sigma_{max} = 0,834$  MPa) wynosi około 40% w stosunku do płyty niewzmocnionej.

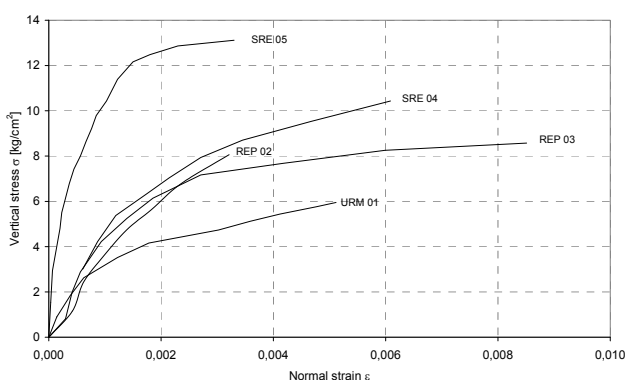


Fig. 3. Diagram ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) resulting from the tests with double flat jacks  
Rys. 3. Wykres ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) sporządzony na podstawie wyników próby ściskania (naprężenie pionowe, odkształcenie normalne)

Jeżeli chodzi o mechanizm zniszczenia, to pojawiło się kilka pionowych pęknięć w murze między dwoma podnośnikami płaskim. Ponadto nie zaobserwowano istotnych różnic w typie zniszczenia między murem niewzmocnionym, murem z uzupełnionymi spoinami i murem wzmocnionym za pomocą włókien metalowych. W przypadku muru niewzmocnionego i muru z uzupełnionymi spoinami zniszczeniu towarzyszyło powstanie kilku stosunkowo dużych pęknięć a w przypadku muru wzmocnionego za pomocą systemu reticolatus wystąpiła większa liczba drobnych spękań, co wskazuje na poprawę pracy mechanicznej tego muru, prawdopodobnie dzięki zmniejszeniu się koncentracji naprężeń maksymalnych w tym murze.

### 3.2. Próby ścinania

Próby ścinania przeprowadzono zgodnie z normą ASTM E 519-81 w celu oceny skuteczności proponowanego wzmocnienia w przypadku naprężeń ścinających. Próby przeprowadzono na miejscu na trzech płytach murowych wyciętych z siedemnastowiecznego budynku w Pale koło Foligno (Perugia, Włochy).

Płyty miały grubość 53 cm i zbudowane były

consisting of very roughly hewn stone (travertine and compact limestones) and lime-based mortar with weak mechanical properties, were consisted of two weakly toothed facings without cross blocks.

The panels were cut to a size of 120×120 cm, and a series of metal beams were then applied at the two edges of one of the two diagonals of the panel, connected by bars. A jack was applied at one of the edges in order to stress the panel until it failed along one of the two diagonals. The diagonals on both faces of the panel were instrumented with two inductive displacement transducers. During testing the load applied and the variation in the length of the diagonals were recorded.

The results expressed in terms of shear strength  $\tau_k$  and of shear elastic modulus  $G_{1/2}$  are shown in table 3 and in figure 4 ( $\tau$ - $\gamma$  diagrams), from which it can be seen that the different reinforced techniques (deep repointing of mortar joints or “reticolatus”) applied have greatly increased the strength.

Tab. 3. Results of diagonal compression tests  
Wyniki prób ścinania

	Max shear stress $\tau_k$ (MPa) <i>Maksymalne naprężenie ścinające <math>\tau_k</math> (MPa)</i>	Shear elastic modulus $G_{1/2}$ (MPa) <i>Moduł sprężystości poprzecznej <math>G_{1/2}</math> (MPa)</i>
DC01 Unreinforced <i>Bez wzmocnienia</i>	0.029	541
DC02 Deep repointing <i>Głębokie uzupełnienie spoin</i>	0.039	1403
DC03 Reticolatus <i>Reticolatus</i>	0.063	653

In particular, the “reticolatus” and the deep repointing show an increase in the shear strength of 117% and 35% respectively, compared to an unreinforced panel. Thus it can be noted that for  $\tau_k$  a percentage increase is obtained that is similar to that reported for the compression strength in the preceding series of tests. The increases in the shear elastic modulus  $G_{1/2}$ , calculated in this case at  $\frac{1}{2}$  of the shear strength of the masonry, were less significant: in the case of the “reticolatus” a value of 653 MPa was obtained, compared to the value of 541 MPa for unreinforced masonry.

### 3.3. Flexural tests on panels

In order to investigate the effectiveness of the reinforcement system proposed, a new experimental

z grubo ciosanych kamieni (trawertyn i zwarte wapnienie) i zaprawy na bazie wapna o słabych własnościach mechanicznych. Miały dwie lekko ząbkowane powierzchnie licowe bez bloków poprzecznych.

Płyty te przycięto do wymiarów 120×120 cm i na końcach jednej z dwóch przekątnych płyty zamontowano szereg belek metalowych połączonych prętami. Do jednego z brzegów przystawiono podnośnik w celu obciążania płyty aż do jej zniszczenia wzdłuż jednej z dwóch przekątnych. Na obu licach płyty na przekątnych umieszczono indukcyjne czujniki przemieszczenia. Podczas próby rejestrowano przyłożone obciążenie i zmiany długości przekątnych.

Wyniki w postaci wytrzymałości na ścinanie  $\tau_k$  i modułu sprężystości poprzecznej  $G_{1/2}$  przedstawiono w tabeli 3 i na rysunku 4 (wykresy  $\tau$ - $\gamma$ ). Widać, że zastosowane techniki wzmocnienia (głębokie uzupełnienie spoin i technika reticolatus) bardzo zwiększyły wytrzymałość.

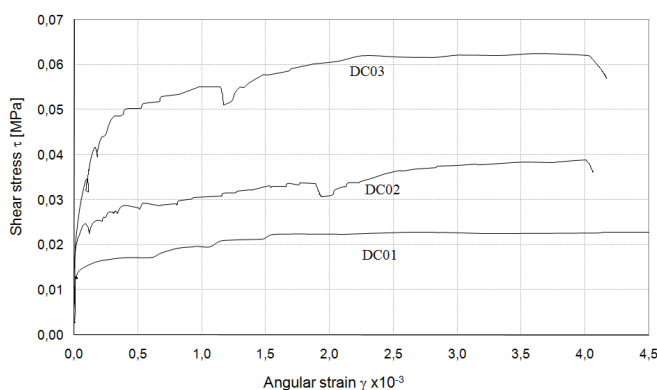


Fig. 4. Diagram ( $\tau$ - $\gamma$ ) resulting from the diagonal compression tests  
Rys. 4. Wykres ( $\tau$ - $\gamma$ ) sporządzony na podstawie wyników próby ścinania

System reticolatus i głębokie uzupełnienie spoin zwiększyły wytrzymałość na ścinanie o odpowiednio 117% i 35% w stosunku do płyty niewzmocnionej. Można zauważyć, że wzrost procentowy  $\tau_k$  jest podobny do wzrostu uzyskanego w poprzedzającej serii prób ścinania. Wzrost modułu sprężystości poprzecznej  $G_{1/2}$ , obliczonego tutaj przy  $\frac{1}{2}$  wytrzymałości na ścinanie muru, był mniejszy: w przypadku systemu reticolatus uzyskano wartość 653 MPa w porównaniu do wartości 541 MPa w przypadku muru niewzmocnionego.

### 3.3. Próby zginania

W celu zbadania skuteczności proponowanego systemu wzmocnienia przeprowadzono próby zgina-

test was conducted, building two rubble stone wall panels reinforced using the “reticolatus” technique.

The two panels were then rotated and placed horizontally, thus subjecting them to a particularly severe flexural test, given the great weight of this wall type.

The panels were built with rough-hewn limestone rubble coming from the demolition of existing walls and cement-lime mortar with modest mechanical properties. The panels are made up of two facings, one (panel 1) without any headers, and the other (panel 2) weakly toothed. Once they had set, the two panels were reinforced with the “reticolatus” technique, using the same 3×2 cords manufactured by Hardwire LLC used previously, according to the stages previous described.

In the first panel, built to investigate the flexural behavior (dimensions: 50 × 268 × 100 cm), in the longitudinal direction 24 cords/meter were applied to the intrados and 12 cords/meter to the extrados, whereas in the transversal direction 24 cords/meter were inserted, for a total of 324 cords applied (fig. 5).

The second panel, built to investigate the shear behavior (40 × 180 × 198 cm), was reinforced in a manner similar to the first panel, again with 12 cords/m on both faces and in both directions, and integrating the face that will be on the inside with an equal number of cords, thus obtaining 24 cords/meter in the two directions on the intrados and 12 cords/meter in the two directions on the extrados, for a total of 175 cords applied (fig. 6).



Fig. 5. Panel 1: front and side views  
Rys. 5. Płyta 1: widok z przodu i z boku

Repointing was done on both panels with cement-lime mortar with modest mechanical properties, with an average depth of about 7 cm. The cords were inserted at a depth of 3-4 cm.

The first panel was placed on a horizontal plane, supporting it at the ends. The four-point bending

nia na dwóch płytach zbudowanych z kamienia łamanego, wzmocnionych za pomocą techniki reticolatus.

Płyty te obrócono i ułożono poziomo, poddając je w ten sposób ciężkiej (biorąc pod uwagę wielki ciężar płyty tego rodzaju) próbie zginania.

Płyty wykonano z grubo ciosanych kamieni wapiennych (pochodzących z rozbiórki istniejących murów) stosując zaprawę cementowo-wapnową o słabych własnościach mechanicznych. Płyty miały dwa lica. Jedna płyta (płyta nr 1) była bez jakichkolwiek główek a druga płyta (płyta nr 2) była lekko ząbkowana. Po ich wykonaniu płyty wzmocniono stosując technikę reticolatus i takie same linki 3×2 (wyprodukowane przez firmę Hardwire LLC) i etapy jak poprzednio.

W pierwszej płycie (50 × 268 × 100 cm) w kierunku wzdłużnym zastosowano 12 linek na metr na podniebieniu i 12 linek na metr na grzbiecie, a w kierunku poprzecznym 24 linki na metr. W sumie zastosowano 324 linki (rys. 5).

Drugą płytę (40 × 180 × 198 cm) wzmocniono w podobny sposób jak pierwszą, stosując 24 linki/metr w obu kierunkach na podniebieniu i 12 linek/metr w obu kierunkach na grzbiecie. W sumie zastosowano 175 linek (rys. 6).

Spoiny w obu płytach uzupełniono zaprawą cementowo-wapnową o słabych własnościach mechanicznych, do średniej głębokości około 7 cm. Linki wsunięto na głębokość 3-4 cm.



Fig. 6. The second panel subjected to flexural tests  
Rys. 6. Druga płyta poddana próbie zginania

Pierwszą płytę umieszczono w płaszczyźnie poziomej, podpierając ją na końcach. Poddano ją próbie czteropunktowego zginania przy rozpiętości 208 cm i obciążeniach oddalonych 38 cm od siebie (rys. 7). Płyta była obciążona ciężarem własnym (oszacowanym na 2200 kg/m<sup>3</sup>)

test was done, with a span of 208 cm and with the loads spaced 38 cm apart (fig. 7). The panel was stressed by its own weight (calculable at  $2200 \text{ Kg/m}^3$ ) as well as by the application of a load increased by increments of 150 kg, distributed among the two loading devices. The displacement was measured by six centesimal comparators placed on both sides of the panel, at midpoint,  $\frac{1}{4}$  and  $\frac{3}{4}$  of the span. The panel reached a critical situation with a load of about 600 kg, corresponding to a maximum flexural moment of 255 kgm, which are added to the 595 kgm deriving from its own weight.

As regards the panel failure mode, various observations can be made. Some cracks parallel to the supports opened in the tension zone, starting with the third load step (450 kg), and these cracks widened progressively up to the 650 kg load, when, due to the deformation of the intrados, some pieces of the intrados contained inside the mesh of the "reticolatus" fell by gravity, and then the masonry itself crumbled apart (fig. 8).



Fig. 7. Panel 1, placed horizontally, on two supports  
Rys. 7. Płyta 1 ułożona poziomo na dwóch podporach

In comparison with a situation of an evenly distributed load equivalent to that applied in the case being examined, the panel failed with a uniform load (inclusive of its own weight) of 1610 kg/m.

The second panel ( $40 \times 180 \times 198 \text{ cm}$ ) was also subjected to a four-point bending flexural test. In this case the panel was significantly shorter and wider than the first panel. The load, almost entirely concentrated in the middle, has a punching effect on the panel that mobilizes mainly the out-of-plane shear resistance.

The panel was tested over a span of 124 cm (along the 180 cm side), and the load was applied by means of two HEA metal beams spaced 35 cm apart, with loads increasing by steps of 100 kg (fig. 9).

The test results seem especially significant for the purposes of demonstrating the effectiveness of

oraz przyłożonym obciążeniem zwiększonym stosując przyrosty wielkości 150 kg, rozłożonym między dwoma urządzeniami obciążającymi. Przemieszczenie mierzono sześcioma komparatorami umieszczonymi po obu stronach płyty w środku rozpiętości, w  $\frac{1}{4}$  rozpiętości i  $\frac{3}{4}$  rozpiętości. Płyta osiągnęła stan krytyczny pod obciążeniem około 600 kg, odpowiadającym maksymalnemu momentowi zginającemu 255 kgm, dodanym do 595 kgm pochodzących od ciężaru własnego.

Jeżeli chodzi o symptomy zniszczenia płyty to zaobserwowano co następuje: kilka rys równoległych do podpór pojawiło się w strefie rozciągania, poczynając od trzeciego kroku obciążania (450 kg) i rysy te rozszerzały się stopniowo do osiągnięcia obciążenia 650 kg, kiedy to na skutek odkształcenia podniebienia kilka fragmentów podniebienia ujętych w siatce reticolatus wypadło pod własnym ciężarem, po czym mur rozpadł się (rys. 8).



Fig. 8. Failure of panel 1  
Rys. 8. Zniszczenie płyty 1

W kategoriach równomiernie rozłożonego obciążenia, równoważnego obciążeniu zastosowanemu w próbie opisanej powyżej, płyta uległa zniszczeniu pod równomiernym obciążeniem (wliczając w to jej ciężar własny) wynoszącym 1610 kg/m.

Druga płyta ( $40 \times 180 \times 198 \text{ cm}$ ) również została poddana próbie zginania czteropunktowego. W tym przypadku płyta była znacznie krótsza i szersza niż pierwsza płyta. Obciążenie, prawie całkowicie skoncentrowane pośrodku oddziaływało przebijająco na płytę, mobilizując głównie niepłaski opór ścinania.

Płyta ta była poddana próbie na rozpiętości 124 cm (wzdłuż boku o długości 180 cm), a obciążenie przykładano za pomocą dwóch metalowych belek HEA oddalonych 35 cm od siebie, stosując kroki o wielkości 100 kg (rys. 9).

Wyniki próby wyraźnie pokazują skuteczność proponowanej techniki wzmacniania. Płyta nie



the reinforcement technique proposed. Indeed, the panel did not reach the failure point, even though a load of about 2000 kg was applied, corresponding to an equivalent uniform load (inclusive of its own weight) of 4100 kg/m.

The panel was not brought to the collapsing point so that it could be used in a subsequent test.

The two experimental tests described above gave excellent results, considering that the panels were tested by placing them horizontally and subjecting them to flexure, a very difficult situation for structures of this type.

A preliminary evaluation of the failure loads, based on the simplified flexural checking of the two reinforced structures, and considering, for simplicity's sake, the cords as being arranged parallel in the direction of the flexural stress (i.e. as if it were a reinforced masonry beam), it would have provided values of about 1800 kg for panel 1 and 8000 kg for panel 2, assuming a typical average value for the compression strength of the masonry for the type in question.

These values correspond, however, to failure due to tensile stress of the cords in the tension area, a mechanism that was not reached for the case examined (panel 1) because it was anticipated by the falling of pieces and crumbling of the masonry at the intrados.

The crumbling of the masonry in the tension zone was also facilitated in this particular situation (masonry placed horizontally) by the rather large size of the blocks, which "hang" from the intrados and thus tend to fall downward, sliding along the mortar joints, facilitated by their weight. In real situations, with the wall set vertically, the behavior is obviously much different, given that its own weight acts in the plane of the panel.

#### 4. Design

The results of the experiment showed the necessity of finding a model that can describe, in a manner consistent with the real situation, the mechanical behavior of the masonry reinforced using the reticolatus technique.

Diverse methods, from the simplest to the most sophisticated, are being tried regarding this aspect.

It should be said however that in works in which all that is proposed is an overall improvement of



Fig. 9. Testing of panel 2  
Rys. 9. Próba zginania płyty 2

uległa zniszczeniu nawet po obciążeniu ciężarem 2000 kg, odpowiadającemu równoważnemu obciążeniu równomiernemu (włączając w to ciężar własny płyty) wynoszącemu 4100 kg/m.

Płyta nie została doprowadzona do zniszczenia, aby można ją było poddać następnej próbie.

Wyniki obu prób opisanych powyżej były bardzo dobre, biorąc pod uwagę fakt, że płyty poddawano próbie zginania w pozycji poziomej, co jest bardzo ciężką próbą dla konstrukcji tego typu.

Wstępna ocena obciążeń niszczących, dokonana na podstawie uproszczonego sprawdzianu zginania tych dwóch wzmocnionych konstrukcji i przy założeniu, że linki są ułożone równoległe w kierunku naprężenia zginającego (tzn. tak jakby była to zbrojona belka murowana), dała wartości rzędu 1800 kg dla płyty nr 1 i 8000 kg dla płyty nr 2 (przyjmując średnią wartość wytrzymałości na ściskanie dla rozważanego typu muru).

Jednak wartości te odpowiadają zniszczeniu spowodowanemu naprężeniem rozciągającym linek w strefie rozciągania, a mechanizm ten nie został osiągnięty w badanym przypadku (płyta nr 1) ponieważ wcześniej wystąpiło wypadnięcie kawałków muru podniebienia i jego kruszenie się.

W analizowanym przypadku (mur położony poziomo) kruszeniu się muru w strefie rozciągania sprzyjały także duże rozmiary kamieni w podniebieniu, które na skutek dużego ciężaru własnego odspajały się i wypadały. W rzeczywistych sytuacjach, gdy mur stoi pionowo jego zachowanie się jest zdecydowanie inne ponieważ jego ciężar własny działa w płaszczyźnie płyty.

#### 4. Modelowanie

Wyniki prób wskazują na potrzebę opracowania modelu, który opisywałby mechaniczne zachowanie się w rzeczywistych sytuacjach muru wzmocnionego za pomocą systemu reticolatus.

Próbowane są różne podejścia (od najprostszyc do najbardziej zaawansowanych).

Należy jednak zauważyć, że w przypadkach, gdzie celem jest jedynie ogólna poprawa pracy

the performance of the masonry, some suggestions of a qualitative type will be sufficient, deriving from the experiments done and from the comparison with the RC jacket technique, which, although entirely different, does have some similarities with the proposed technique. Indeed, the RC jacket technique consists of two separated reinforced concrete thin walls, external to the existing walls. In case of the proposed technique, definitely there are no reinforced concrete facing walls but improved face shell reinforced masonry walls, enabling much better continuity and compatibility with the existing material.

Following this analogy, the minimum number of nodes in the mesh must not be less than 4/sq.m. and the area of the cords in the single side of the mesh must not be less than 19.60 sq.mm. per meter.

When a very precise strength increment is required instead, the mesh size and the size of the cords must be determined by means of a structural analysis that considers in a precise manner the different project requirements (flexure, shear, sliding). The analysis method is omitted here for the sake of brevity; let it suffice to say that in the two improved face shell reinforced masonry walls the cords work under tension and the masonry confined inside the mesh can work under compression. Various models can be followed, from a Morsch-type design to an FEM model in a nonlinear field.

## 5. Conclusions

The result of the presented technique is that of a reinforced masonry, for which there is an increase in compressive and shear strength. The improvement does not concern solely the mechanical characteristics of the masonry thus reinforced, but affects the entire masonry construction, since in addition to reinforcing the wall panel, the "skeleton" of the continuous grid inside the masonry connects the various contiguous masonry walls to one another, thus forming a reinforcement system. Furthermore, the small size of the reinforcement cords and the fact that they are easy to insert into the mortar joints makes it possible to apply this technique on an extensive, which avoids dangerous concentrations of stress.

The upgrading work is not very invasive and is reversible. It is compatible with preservation of the original material of the building and is therefore particularly suitable for fair-face walls of buildings registered as being of historical and/or

murow, wystarczają pewne jakościowe zalecenia oparte na badaniach doświadczalnych i na porównaniu z techniką płaszcz żelbetowego, która, chociaż bardzo różniąc się od proponowanej techniki, wykazuje pewne podobieństwa do niej. W technice płaszcz żelbetowego stosuje się dwie oddzielne cienkie ścianki z betonu zbrojonego na zewnątrz istniejących ścian. W przypadku proponowanej techniki nie występują ścianki licowe z betonu zbrojonego, ale ulepszone ściany murowane zapewniające lepszą ciągłość i kompatybilność z istniejącym materiałem.

Z tej analogii wynika, że liczba węzłów siatki powinna być nie mniejsza niż 4 na metr kwadratowy, a pole powierzchni linek w jednym boku siatki nie powinno być mniejsze niż 19,60 mm<sup>2</sup> na metr.

W przypadku gdy trzeba uzyskać ściśle określony wzrost wytrzymałości, wielkość siatki i wielkości linek powinny być wyznaczone za pomocą statyki budowli, uwzględniając precyzyjnie różne wymagania (zginanie, ścinanie, poślizg) danego projektu. Ze względu na ograniczoną objętość referatu, nie opisano tu metody takiej analizy. Wystarczy powiedzieć, że w przypadku ulepszonych dwóch lic ściany murowanej linki są rozciągane, a mur ujęty w siatkę może być ściskany. Do analizy można zastosować różne modele, np. model typu Morscha lub model oparty na metodzie elementów skończonych w dziedzinie nieliniowej.

## 5. Wnioski

Dzięki zastosowaniu proponowanej techniki zwiększa się wytrzymałość muru na ściskanie i ścinanie. Poprawa obejmuje nie tylko charakterystyki mechaniczne w ten sposób wzmocnionego muru, ale także całą konstrukcję murowaną ponieważ oprócz wzmocnienia płyty ściany, „szkielet” ciągłej siatki wewnątrz muru łączy różne przyległe ściany murowane ze sobą, tworząc w ten sposób system wzmocnienia. Ponadto małe rozmiary linek zbrojeniowych i fakt, że dają się łatwo wprowadzać w spoiny umożliwiają ekstensywne zastosowanie tej techniki, przez co unika się niebezpiecznej koncentracji naprężeń.

Prace wzmocniające są mało inwazyjne i odwracalne. Zachowany jest pierwotny materiał budowli i dlatego technika ta nadaje się szczególnie do wzmocniania reprezentacyjnych ścian budynków zarejestrowanych jako obiekty zabytkowe lub interesujące pod względem architektonicznym. W przypadku takich obiektów

architectural interest. Therefore historical and archeological buildings and structures may find the system proposed to be an appropriate solution for some of their structural problems, as it is able to combine the need to obtain high safety levels with the demands of protection and preservation.

tów proponowana technika może rozwiązać niektóre ich problemy konstrukcyjne, zapewniając wysoki poziom bezpieczeństwa i jednocześnie spełniając wymogi ochrony i konserwacji.

## References • Literatura

- [1] Binda, L., Modena, C., Baronio, G. and Abbaneo, S. (1997) Repair and investigation techniques for stone masonry walls, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 11, (3), 133-142.
- [2] Borri, A. and Castori, G. (2009) Durabilità dei rinforzi strutturali con materiali compositi: sperimentazione e monitoraggio, *III Conf. Mechanics of Masonry Structures Strengthened with FRP Materials: Modeling, Testing, Design, Control.*, Venice, in press.
- [3] Cecchi, A., Milani, G. and Tralli, A. (2004) In-plane loaded CFRP reinforced masonry walls: Mechanical characteristics by homogenisation procedures, *Comp. Science and Technology*, (64), 13-14, 2097-2112.
- [4] Chiostrini, S. and Vignoli, A. (1994). In-situ determination of the strength properties of masonry walls by destructive shear and compression tests, *Masonry International*, 7, (1) 87-96.
- [5] Corradi, M., Tedeschi, C., Binda, L. and Borri, A. (2008). Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: deep repointing. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 22/4, 463-472.
- [6] Corradi, M., Borri A., Speranzini E., and Giannantoni A. (2008). Consolidation and reinforcement of stone walls using a reinforced repointing grid”, *Proc. of the 6° ICSAHC*, Bath, UK, 2-4 July, 2008.
- [7] Elgawady, M.A., Lestuzzi, P. and Badoux, M. (2006). Analytical model for the in-plane shear behavior of URM walls retrofitted with FRP, *Composites Science and Technology*, Elsevier, (66), 459-474.
- [8] Gregorczyk, P., Lourenço, P.B. (2000). A review on flat jack testing, *Engenharia Civil*, n.9. 39-50.
- [9] Turco, V., Secondin, S., Morbin, A., Valluzzi, M.R., Modena C. (2006). Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars, *Comp. Science and Technology*, Elsevier, 66, 290-296.
- [10] Tassios, P.T. 1988. *Masonry mechanics*, Liguori Publ., Napoli, (Italian Translation).

---

\* Department of Civil and Environmental Engineering, University of Perugia, Perugia, Italy

\*\* UniLAB srl, Foligno, Italy

## Abstract

A new technique is proposed for reinforcing rubble stone masonry walls (double and triple-leaf walls), when the fair-face masonry must be kept. The reinforcement technique consists of embedding a continuous mesh of high strength steel cords in the mortar joints after a first repointing, and then anchoring this to the wall by means of transversal steel bars. A second repointing covers the cords and the heads of the steel bars. This gives a reinforced fair-face masonry wall in which there is increased compression, shear and flexural strength, an effective transverse connection between the masonry leaves due to the presence of the steel bars, and the capacity to withstand tensile stresses, as was confirmed by the first tests. The reinforcement is non-invasive and reversible, and is aimed at integrating the masonry rather than transforming it. Various experimental tests, briefly presented here, have clearly demonstrated the structural effectiveness of this technique.

## Streszczenie

Zaproponowano nową technikę wzmacniania muryrowanych ścian (szczelinowych ścian dwu- i trójwarstwowych) przy zachowaniu oryginalnego lica muru. Proponowana technika wzmacniania polega na wprowadzeniu ciągłej siatki z linek stalowych o wysokiej wytrzymałości w spoiny po ich pierwszym uzupełnieniu i zakotwiczeniu jej w murze za pomocą poprzecznych prętów stalowych. Drugie uzupełnienie spoin pokrywa linki i łby prętów stalowych. Uzyskuje się wzmocnioną ścianę muru z zachowanym oryginalnym licem, charakteryzującą się zwiększoną wytrzymałością na ściskanie, ścinanie i zginanie, skutecznym poprzecznym połączeniem między warstwami muru (dzięki obecności prętów stalowych) i zdolnością wytrzymywania naprężeń rozciągających, co potwierdziły wyniki badań doświadczalnych. Wzmocnienie jest nieinwazyjne i odwracalne i jego celem jest scalenie muru, a nie jego przekształcenie. Różne badania doświadczalne (opisane tutaj w skrócie) jasno wykazały skuteczność tej techniki.