

Jerzy Jasieńko\*, Marcin Szyszka\*\*

## Ocena parametrów mechanicznych historycznych murów poprzez badania eksperymentalne w kontekście ich konserwacji konstrukcyjnej

### Assessing mechanical parameters of historical masonry structures through experimental testing in relation to structural conservation work

**Słowa kluczowe:** mury historyczne, badania wytrzymałościowe, parametry mechaniczne, schemat zniszczenia

**Key words:** historical masonry structures, strength tests, mechanical parameters, destruction schemes

#### 1. WPROWADZENIE

W przypadku struktur ceglanych oraz murów relatywnie nowych liczne normy, zalecenia, monografie i podręczniki [1, 2] proponują zależności umożliwiające szacowanie wytrzymałości muru w funkcji użytych komponentów. Stają się one praktycznie bezużyteczne w odniesieniu do konstrukcji zabytkowych (ryc. 1). Pojawiają się tu trudności w określaniu wytrzymałości użytego lepiszcza (zaprawy), nieznany jest wpływ czasu, a rdzenie murów wielowarstwowych zazwyczaj wykonane są techniką, która nie pozwala na opis matematyczny ich parametrów. W takich sytuacjach najpewniejszym rozwiązaniem wydaje się określenie cech mechanicznych muru wprost, czyli doświadczalnie.

Próby obciążeniowe są najpewniejszym narzędziem służącym do określania parametrów wytrzymałościowych, jak i pracy statycznej każdego rodzaju konstrukcji. Prawdopodobnie ta dotyczy także konstrukcji kamiennych, w tym zabytkowych. Sytuacja, w której praca statyczna wzmocnionej konstrukcji jest znana na podstawie badań *in situ*, jest zarówno komfortowa, jak i bezpieczna. Badania pozwalają na określenie modułu Younga, współczynnika Poissona, ciągliwości, a przede wszystkim na szacowanie wytrzymałości materiału i postaci schematu zniszczenia. Ponadto, archiwizując wyniki tego typu badań można stworzyć katalog, który pozwalałby na ocenę zachowania i przybliżonej wytrzymałości muru na zasadzie podobieństw.

Niestety dyskusyjnym aspektem tego typu badań, w przypadku obiektów historycznych, jest konieczność ingerencji

#### 1. INTRODUCTION

The strength of a relatively new brick or masonry structure can be assessed by applying equations presented in a variety of standards, regulations and specialist literature [1, 2]. The strength of a wall can be calculated as a function of its component parts. However, these equations are practically useless in the case of historical structures (fig. 1) for a number of reasons. It is difficult to assess the strength of the binder (mortar) used, the impact of time is unknown and the core of a multilayer masonry wall is usually constructed in a way that does not allow for mathematical description of its parameters. In such situations, experimental testing appears to be the best way of defining the mechanical properties of a masonry structure.

Loading tests are the most reliable tool for identifying both the mechanical parameters and the static behaviour of any construction type. This principle applies also to stone masonry, including historical structures. When the static behaviour of a structure being strengthened is determined on the basis of *in situ* loading tests, the situation is both reliable and safe. Tests conducted in this way can be used to determine the elastic modulus, Poisson's ratio, ductility and also provide information on material resistance and destruction schemes. Moreover, compiling experimental results to form a database or a catalogue, provides an opportunity to use analogy to estimate the strength and behaviour of masonry structures.

The difficulty of applying such testing to historical structures relates to the necessity of intervening physically into

\* Prof. dr hab. inż. Jerzy Jasieńko, Politechnika Wroclawska, Instytut Budownictwa

\*\* Mgr inż. Marcin Szyszka, Politechnika Wroclawska, Instytut Budownictwa

\* Prof. dr hab. inż. Jerzy Jasieńko, Wrocław University of Technology, Institute of Building Engineering

\*\* Mgr inż. Marcin Szyszka, Wrocław University of Technology, Institute of Building Engineering

w rzeczywisty wygląd obiektu i pomimo tego, iż po wykonaniu testów mury przywracane są praktycznie do pierwotnego wyglądu, to badania *in situ* są przeprowadzane dosyć rzadko. Ponadto są one kosztowne i pracochłonne w porównaniu z pozostałymi metodami oceny nośności konstrukcji. Dlatego też opisywane badania prowadzi się głównie na obiektach, które uległy awarii, np. w wyniku aktywności sejsmicznej czy też z innych przyczyn. Z tych samych względów wiele przeprowadzanych doświadczeń ma miejsce w laboratoriach na stworzonych specjalnie w tym celu modelach. Zaletą badań laboratoryjnych jest możliwość tworzenia paneli o żądanej geometrii czy też zmiany poszczególnych parametrów (grubość warstw, sposób wykonania) w celu zbadania wpływu określonego czynnika na pracę całego panelu. Oczywiście, ze względu na brak możliwości uwzględnienia czynnika czasu, tego typu badania przeprowadza się głównie pod kątem jakościowym, a aspekt ilościowy jest stowarzyszony. Mimo wszystko są one nieocenionym narzędziem, jeśli chodzi o badania zachowań tego typu konstrukcji (np. rozkład odkształceń i naprężeń w przekroju, wpływ smukłości), odgrywają również ogromną rolę w doskonaleniu stosowanych technik wzmacniania.

Poniżej opisano najczęściej stosowane próby eksperymentalne.

## 2. PRÓBA ŚCISKANIA PROSTEGO

Badania te można przeprowadzać zarówno *in situ*, jak i laboratoryjnie. Na ich podstawie określa się takie parametry mechaniczne, jak moduł Younga, wytrzymałość na ściskanie, współczynnik Poissona, a także przebieg ścieżki równowagi naprężenie-odkształcenie.

W przypadku badań *in situ* (ryc. 2) pierwszą czynnością jest izolacja panelu o stosunku długości do szerokości około 2:1 (zazwyczaj wymiary te wynoszą 180 cm i 90 cm). W tym celu używana jest piła diamentowa, co zapewnia minimalizację uszkodzeń struktury muru, a tym samym zwiększa miarodajność otrzymanych wyników. Separowane są krawędzie boczne oraz górna, natomiast dolna pozostawiana jest w stanie pierwotnym. Obciążenie realizowane jest za pomocą dwóch podnośników płaskich (przykładowe parametry: nacisk – 100 t, moc – 1,1 kW), podnośniki muszą być zawsze skontrolowane. Wspomniany opór zapewniany jest albo przez odpowiedni system belek i prętów (ryc. 2), albo poprzez mur ponad panelem. Oczywiście fakt stosowania dwóch podnośników wynika z chęci uzyskania możliwie najbardziej jednorodnej dystrybucji naprężeń. Z tego samego powodu płaskownik, na którym umieszczone są podnośniki, spoczywa na poduszce z zaprawy. Badane panele wyposażone są w liniowe czujniki transformatorowe (LVDT), od czterech do sześciu pionowych (równomiernie rozłożone po obu stronach panelu) oraz dwa poziome umieszczone w połowie wysokości. Dodatkowo dokonywany jest pomiar czasu i rejestracja ciśnienia w podnośnikach. W zależności od wyznaczonych celów eksperymentu, próba może być realizowana poprzez obciążenia cykliczne lub w sposób ciągły.

W warunkach laboratoryjnych istnieją większe możliwości w zastosowaniu technik pomiarowych, a także metod realizacji obciążenia, gdzie można wykorzystać np. ramy obciążeniowe (ryc. 3). Jak już wspomniano, operowanie na panelach budowanych w laboratorium, poprzez dywersyfikację ich rozmiarów, techniki wykonania, stosowanych materiałów, pozwala w sposób zadowalający zbadać wpływ i znaczenie poszczególnych czynników. Informacje te są niezwykle cenne,

the present form and appearance of a building. Even though masonry is restored to its original state on completion of an experimental test, such tests are still very rarely conducted. This is because *in situ* tests are expensive and labour-intensive when compared to other methods, which can be used to assess the load bearing capacity of a structure. This also explains why such experiments are conducted most often on damaged architectural structures, such as those destroyed during a seismic event, or as a result of some other cataclysm. A substantial number of tests are conducted in laboratories using specially prepared stone panels. The advantage of laboratory tests is that panels can be prepared with a desired geometry or modified according to selected parameters (thickness of layers, the way panels are constructed) with the objective of investigating the influence of a specific factor on the overall response. As the time factor is impossible to account for, such tests are carried out mainly to specify qualitative behaviour, allowing for quantitative results to be inferred. Despite these shortcomings, laboratory tests are an invaluable instrument for researching and analysing the behaviour of masonry structures (e.g. stress and strain distribution in cross-section, slenderness impact). They have also an important role to play in improving reinforcement techniques.

The most frequently used experimental tests are described below.

## 2. COMPRESSION TEST

Compression tests can be conducted both *in situ* and in a laboratory. They can be used to define the following mechanical parameters: elastic modulus, compressive strength, Poisson's ratio and the stress-strain equilibrium path.

In the case of *in situ* tests (fig. 2) the first action is to isolate a panel from the wall. The lengths of the two sides of the panel should be in a relationship of approximately 2:1 (usually the dimensions are 180 cm and 90 cm respectively). A diamond-wire method is most often used to cut out the panel so as to minimise structural damage to the wall as a whole and thereby to increase the reliability of results. The lateral and upper sides of the panel are separated, whereas the lower one remains constrained. Load pressure is provided by two hydraulic jacks (hypothetical parameters: pressure – 100 t, power – 1,1 kW), which must always be countered. Resistance is provided by a system of steel beams and rods (fig. 2) or by masonry located above the panel. In an experimental test, two jacks are used to ensure the most uniform stress distribution possible. This is also why the beam on which the jacks are located must be placed on a bed of mortar. The panels are linked to linear variable differential transformers (LVDT), four to six located vertically (uniformly spaced on both sides of the panel) and two placed horizontally at the midline. Readings of time and pressure in the jacks are recorded. Depending on the goals of the experiment, the test may involve cyclical or continuous loading.

Laboratory conditions provide wider possibilities for the application of a variety of measurement techniques and loading methods, such as loading frames (fig. 3). As previously mentioned, working with panels constructed in laboratory conditions allows for a more complete examination of the impact and significance of specific factors by allowing modifications of panel dimensions, different construction methods, use of different materials etc. Generating such information is extremely

ponieważ w dalszej kolejności mogą być stosowane przy analizie rzeczywistych obiektów o charakterze zabytkowym.

W laboratorium próba ściskania może być wykorzystana zarówno do określania parametrów i pracy statycznej całego przekroju, jak i poszczególnych warstw muru. Badanie tych drugich może być realizowane na dwa sposoby. Pierwsza metoda polega na ściskaniu poszczególnych warstw po ich uprzednim rozszczępieniu poprzez ścinanie (test rozwarstwiania opisano w pkt. 3). Za pewną wadę takiego postępowania można uznać fakt, iż po rozwarstwieniu smukłość ściskanych modeli wzrasta trzykrotnie, co może znacznie utrudniać badanie parametrów wytrzymałościowych ze względu na istotny wpływ wybożenia (niższa siła niszcząca). Drugi sposób badania warstw muru to ściskanie tzw. pryzm, czyli próbek o wysokości ok. 450 mm, poprzecznym przekroju kwadratowym i smukłości ok. 3 (ryc. 4). W ten sam sposób można także badać próbki reprezentujące rdzeń muru wielowarstwowego. W tym celu wykonywane są

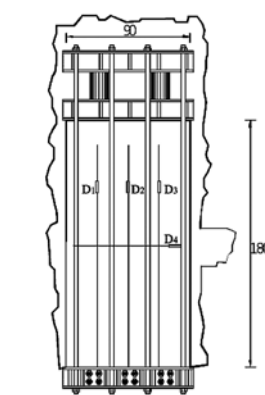
valuable as it can be used subsequently in the research and analysis of existing historical buildings.

In a laboratory, the compression test can be used to determine the parameters and static behaviour of a panel as a whole or of its specific layers. Specific layers of a panel can be analysed in two ways. One method is based on compressing the selected layers one by one. They have to be first separated from the main body of the panel by means of a shear test (described in part 3). An important shortcoming of this test lies in the fact that after the layers are separated out, the slenderness of each tested specimen increases three-fold. This can cause significant difficulties in determining the mechanical parameters of the model being tested due to the considerable impact of buckling (lower ultimate force). A second method uses the compression of so called prisms, i.e. specimens which are approximately 450 mm high, with a square cross-section and a slenderness measure of about 3



Ryc. 1. Przykładowe rodzaje historycznych konstrukcji murowych. Mur z cegły pełnej (po lewej) oraz mur kamienny (po prawej)

Fig. 1. Examples of historical masonry structures. Brick (on the left) and stone masonry (on the right)



Ryc. 2. Szkic panelu badanego in situ. Wymiary, system obciążający, czujniki indukcyjne [3]

Fig. 2. In situ panel tests. Dimensions, loading system, LVDT [3]



Ryc. 3. Stanowisko do ściskania prostego w laboratorium [4]

Fig. 3. A loading frame used for laboratory compression tests [4]

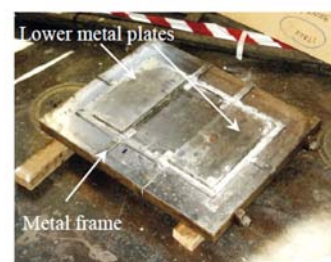
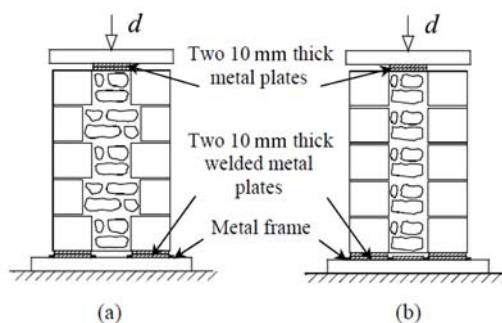


Ryc. 4. Próbki reprezentujące warstwy zewnętrzne [5]

Fig. 4. External leaf specimens [5]

Ryc. 5. Stanowisko obciążeniowe w próbie ścinania: a) panel z częściowym połączeniem transwersalnym, b) panel bez połączeń między warstwami, c) metalowa rama z zamocowanymi blachami dolnymi [9]

Fig. 5. Test stand for shear testing between layers: a) panel with a partial transversal connection, b) panel with no connection between layers, c) metal frames with fixed plates [9]



szalunki o wymiarach jak powyżej, w których umieszczany jest rumosz i zaprawa. Po związaniu szalunek jest usuwany. Należy mieć na uwadze, iż do badania rdzenia konieczna jest znaczna liczba pryzm ze względu na spory rozrzut wyników. Test ten wykonuje się zazwyczaj przy użyciu typowych pras do ściskania.

Począwszy od lat osiemdziesiątych przeprowadzono szereg badań dotyczących ściskania, zazwyczaj jako część większych projektów badających również ścinanie, jak i zachowanie dynamiczne takich konstrukcji. Celem badań było lepsze zrozumienie zachowań statycznych kamiennych murów wielowarstwowych, jak i zbadanie wpływu różnorodnych metod wzmocnienia, np. wprowadzania iniektów. Jednak pomimo licznych badań konieczne są kolejne, a w szczególności te, które będą skupiały uwagę na dystrybucji naprężeń pomiędzy rdzeniem a warstwami licowymi, a także na interakcji pomiędzy nimi.

### 3. ŚCINANIE MIĘDZY WARSTWAMI

Znaczna część historycznych murów kamiennych to mury wielowarstwowe. Mur taki składać się może z dwóch równorzędnych warstw lub z rdzenia (zazwyczaj bardzo słabej jakości) i dwóch warstw zewnętrznych. Dodatkowym parametrem jest obecność (lub brak) połączenia transversalnego pomiędzy warstwami i sposób jego realizacji. Właśnie do murów trójwarstwowych odnosi się omawiany test. Do tej pory, ze względu na trudności techniczne, nie została przeprowadzona tego typu próba w warunkach *in situ*. Prawdopodobnie jedynym rozwiązaniem jest całkowita izolacja panelu i jego transport do laboratorium. Oczywiście wiązałoby się to z wysokimi kosztami, a przede wszystkim znaczną ingerencją w obiekt historyczny. Należy jednak zaznaczyć, iż zdarzały się już przypadki takiego postępowania z jednowarstwowym murem kamiennym, który został przeznaczony do rozbiórki [6]. W przypadku muru wielowarstwowego istniałoby dodatkowo niebezpieczeństwo rozszczepienia warstw w procesie ekstrakcji i transportu. Dlatego też badania tego typu były przeprowadzane jedynie w warunkach laboratoryjnych na zbudowanych w tym celu panelach. Nie istnieją żadne normatywy dedykowane wprost temu testowi, niemniej jednak wykorzystuje się w tym przypadku zalecenia zawarte w RILEM LUB5 [7] i EN 1052-4:2002 [8], które dotyczą badania wartości wytrzymałości na ścinanie dla spoin wspornych. Przykładowy schemat obciążeniowy wykorzystany w badaniach (Minho, Portugalia), opisywany w pracy [9], przedstawia ryc. 5. Do realizacji podpór pod okładzinami, jak i do przekazywania obciążenia z maszyny obciążeniowej na rdzeń zastosowano tu stalowe płaskowniki o grubości 10 mm. Zamiast płaskownika można stosować również dwuteowniki, tak jak podczas badań przeprowadzanych w laboratorium Uniwersytetu w Perugii (ryc. 6).

Należy tutaj zaznaczyć, iż przedstawione powyżej badania są jak do tej pory jedynymi tego typu. W Minho badano wyłącznie panele niewzmocnione. Zmiennymi doświadczalnymi były rodzaj stosowanego budulca i połączenie pomiędzy warstwami. Wykorzystano kamienie różniące się wytrzymałością i porowatością, a połączenie było realizowane w sposób prosty albo poprzez częściowe zazębienie się kamieni z okładzin z materiałem rdzenia.

W Perugii z kolei badano panel niewzmocniony i dwa wzmocnione przy użyciu technik „diatoni” i „diatonos”, których podstawowym zadaniem jest zwiększenie siły połączenia pomiędzy warstwami.

Pomimo iż z omawianego doświadczenia otrzymuje się praktycznie jedną wielkość, a mianowicie wytrzymałość na

(fig. 4). The same method can be used to analyse specimens of the core of a three-leaf stone wall. The test is conducted using a specially constructed formwork (with dimensions as described above), which is filled with rubble and mortar. Once the mortar is cured the formwork is removed. It is worth pointing out that an analysis of the core of a multi-leaf wall requires a significant number of specimen prisms as the results of individual tests can vary considerably. Such tests usually involve loading frames of a smaller size.

Starting in the 1980s numerous compression experiments were undertaken based on shear or dynamic testing, usually as part of larger research programmes. The goal of the tests was to understand better the static behaviour of multilayer stone walls and also to determine the influence of various reinforcement techniques, such as application of injections. Although a large number of tests have now been conducted, there is still a need for more research, especially in relation to stress distribution between the outer leaves and the core, and also concerning the interaction between the layers within a masonry wall.

### 3. SHEAR TEST BETWEEN LAYERS

In the most part, historical stone walls are multilayered. Such masonry is typically composed of two equivalent layers or a core (usually of poor quality) and two outer layers. An additional parameter is the presence (or absence) of a transversal connection between the layers and the way it is constructed. The test described in what follows refers to three-leaf walls. Due to technical difficulties, such tests have never been conducted *in situ*. Panels must be separated out completely and transported to a laboratory. Such an action *in-situ* would be very expensive and would also entail considerable interference into the form of the historical structure. It should be noted also that similar operations have been carried out in relation to single leaf stone walls designated for demolition [6]. Multilayered masonry poses an additional danger of splitting layers during extraction and transportation. That is why tests of this type have been performed only in laboratory conditions using specially built panels. There are no standards dedicated specifically to this test, but the guidelines contained in RILEM LUB5 [7] and EN 1052-4:2002 [8] on testing the shear strength of bed joints are usually applied to this type of analysis. An example of a loading system used in research (Minho, Portugal) has been described in the literature [9] and is presented in fig. 5. The experiment made use of steel plates 10 mm thick for two purposes: as a support for the outer layers and to transfer the load from the loading frame onto the core of the specimen undergoing testing. Double-tee bars can be used instead of plates, as was the case in laboratory tests in the University of Perugia (fig. 6).

It is worth pointing out that the research projects described above are the only ones of this type that have been undertaken to date. In Minho only plain (unreinforced) panels were investigated. Building material types and the connections between layers were the experimental variables. Stone used for the test differed in resistance and porosity, and the connections were of a plain pattern type or with partial interlocking stone from the outer layers and the core material.

In Perugia, one unreinforced and two strengthened wall panels were tested to investigate to what extent the “diatoni” and “diatonos” methods increased the connection strength between layers.

ściananie pomiędzy rdzeniem i okładzinami, jest ono w stanie udzielić odpowiedzi na wiele podstawowych pytań, określić znaczenie rodzaju budulca i sposobu wykonania muru.

Wydaje się, że w najbliższej przyszłości test ścinania pomiędzy warstwami powinien być rozwijany szczególnie intensywnie, za czym przemawia wiele argumentów. Pierwszy z nich to schematy zniszczeń murów wielowarstwowych. Analizując dokumentację obiektów zniszczonych w wyniku akcji sejsmicznych [10] łatwo zauważyć, iż rozwarstwienie muru to podstawowa przyczyna awarii. Zjawiskiem niebezpiecznym dla murów wielowarstwowych jest również pełzanie. W wyniku jego wzrostu także może nastąpić rozwarstwienie przekroju poprzecznego, co z kolei prowadzi do redystrybucji naprężeń, a finalnie do praktycznie niesygnalizowanej awarii [11]. Zapotrzebowanie na tego typu badania wynika również z coraz intensywniej rozwijanych metod wzmacniania opartych na połączeniach transversalnych. W celu określenia ich efektywności, optymalnego rozmieszczenia, wyprowadzenia zależności opisujących ich działanie konieczne będzie dobre zrozumienie zachowania statycznego paneli niewzmocnionych, a następnie wykonanie odpowiedniej liczby doświadczeń na próbach wzmocnionych.

#### 4. ŚCISKANIE W KIERUNKU PRZEKĄTNEJ

Próba ściskania w kierunku przekątnej ma na celu określenie parametrów, takich jak wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość na ścinanie, moduł ścinania. Poza tym można ją stosować do określania znaczenia zmiennych, takich jak technika wykonania, budulec i zaprawa. Opisywane badanie może być przeprowadzane *in situ* lub laboratoryjnie, regulowane jest przez normę amerykańską ASTM [11] oraz zalecenia zaproponowane przez RILEM [12]. Te dwa dokumenty różnią się tylko nieznacznie, jeśli chodzi o kwestie techniczne, natomiast jeśli chodzi o przyjęty stan naprężenia, to rozbieżność jest znacząca i prowadzi do dużych różnic w otrzymanych wynikach, które są wręcz nie do zaakceptowania.

Test przeprowadzany jest na panelach kwadratowych o długości boku 120 cm. Przyjęty rozmiar jest kompromisem pomiędzy reprezentatywnością parametrów a dostępną technologią. Mianowicie chodzi o to, aby badana próbka była wystarczająco duża, by dobrze oddawała charakter konstrukcji murowych, a zarazem mogła być badana za pomocą typowych maszyn wytrzymałościowych.

W wersji laboratoryjnej nowe modele są ustawiane w taki sposób, aby przekątna znajdowała się w pozycji pionowej (ryc. 7a). W tym przypadku obciążenie jest realizowane za pomocą typowych maszyn wytrzymałościowych w formie ram. Wierzchołki panelu umieszczone są w specjalnych stalowych szczękach, których długość stanowi 1/8 długości boku badanej próbki, w celu uniknięcia zniszczenia lokalnego (koncentracja naprężeń) szczęki mogą być wyposażone w blachy równoległe do powierzchni panelu. Przed testem szczęki należy pokryć poduszką gipsową. W warunkach laboratoryjnych każdy typ muru powinien być reprezentowany przez przynajmniej trzy próbki. Przeprowadzając badania laboratoryjne należy pamiętać, aby wykonać badania materiałowe budulca i lepiszcza. Otrzymane w ten sposób dane zwiększają możliwość interpretacji wyników, a następnie umożliwiają wykorzystanie tej wiedzy przy pracy na rzeczywistych obiektach zabytkowych. Pomiaru przemieszczeń dokonuje się wzdłuż obu przekątnych, po obu stronach próbki. Wymagane są zatem cztery czujniki,

Although the focus of the experiment is only one attribute, namely the shear resistance between the outer layers and the core, it is still possible to generate answers to many fundamental questions and determine the significance of building material type and the way masonry is constructed.

In the near future, this test should be developed further. There are a few arguments for this. Firstly, there is a need to understand better destruction schemes. Based on the analysis of documentation of buildings destroyed during seismic events, [10], it is evident that masonry delamination is the basic reason for building failure. A dangerous phenomenon with respect to multilayered walls is creep taking place over the long run. It may result in delamination, which in turn leads to stress redistribution and finally to an unanticipated collapse [11]. Growing demand for this type of experiment also comes from the fact that strengthening methods based on transversal connections are starting to be developed more intensively. Estimating their effectiveness, optimal spacing, and deriving a formula for describing their performance will require better understanding of the static behaviour of unreinforced panels and also a larger number of tests on strengthened panels.

#### 4. DIAGONAL COMPRESSION TEST

The diagonal compression test seeks to determine parameters such as tensile strength, shear resistance, shear modulus. It can be used to specify the significance of such variables as workmanship, building materials or mortar used. The test can be conducted both *in situ* and in the laboratory in accordance with the American code ASTM [11] and the guidelines proposed by RILEM [12]. The two documents differ only slightly with respect to technical issues. When it comes to assumptions on stress levels, the divergence between the two documents is significant. This leads to an unacceptable situation due to large differences in the results obtained.

Experimental testing is conducted on square panels (120 × 120 cm). The dimensions represent a compromise that takes into account the parameters of the structure being assessed and accessible technology. The idea is that the specimen should be large enough to represent the character of the masonry, but also of a size that allows testing to be conducted by means of typical loading frames.

In the laboratory situation, new specimens must be positioned in a way that provides a vertical orientation of the diagonal (fig. 7a). Loading is applied through classic pressure machines in a form of loading frames. Vertices of the panel are placed in special steel loading shoes, which measure 1/8 of the length of the specimen's side. The loading shoes can be supplemented with metal plates, in parallel with the panel surface, in order to exclude local stress failure in the corners (stress concentration). Prior to testing, the vertices must be covered with a bed of gypsum. In laboratory conditions each type of masonry needs to be represented by at least three specimens. In laboratory testing, consideration must also be given to a proper analysis of the building materials and mortars used. Information generated through testing in this way provides data for drawing more general conclusions, which can be applied in working with historical building structures. Measurement of displacement is carried out along both diagonals and on both sides of the panel. Four sensors are required,

np. typu LVDT (długość 1 m). Stosowane są także tensometry oporowe (długość 150 mm). Siła obciążająca powinna być aplikowana równomiernymi przyrostami, tak aby cały proces obciążania trwał od jednej do dwóch minut. Jednocześnie należy pamiętać, aby otrzymać co najmniej dziesięć punktów pomiarowych w celu jednoznacznego określenia krzywej „naprężenie-odkształcenie”.

Omawiany test w warunkach *in situ* podlega pewnym modyfikacjom. Podstawową różnicą jest pozycja badanego elementu. Jak pokazano na ryc. 7b, panel jest obrócony o 45° w stosunku do wersji laboratoryjnej, co wynika między innymi z przyczyn technologicznych. Drugą istotną różnicą jest obecność połączenia panelu z murem. Badany fragment przytwierdzony jest do muru w połowie długości swojej podstawy. Takie rozwiązanie jest konieczne w celu utrzymania stabilności izolowanego elementu. Sam proces izolacji odbywa się przy użyciu ostrza diamentowego, a cięcia wykonywane są według kolejności wskazanej na ryc. 8.

W celu realizacji obciążenia konstruowany jest odpowiedni system, który jest zamknięty – ryc. 7b. Podnośnik płaski ułożony jest na kierunku obciążanej przekątnej, z jednej strony oddziałując na szczyłek w narożniku panelu, a z drugiej na poprzeczny element metalowy (dwa połączone ceowniki, zwrócone do siebie środkami). Element poprzeczny połączony jest za pomocą dwóch lub czterech prętów (obustronnie) z identycznym elementem na przeciwnym wierzchołku przekątnej. Dzięki takiej konstrukcji przekątna jest ściskana na obu końcach – na jednym wprost, na drugim w wyniku rezystancji rozciąganych prętów.

Tak jak już wspomniano, opisywana próba jest normalizowana przez dwa dokumenty: ASTM i RILEM. Wykazują one jednak znaczne różnice zarówno jeśli chodzi o interpretację otrzymanych wyników, jak i sposób szacowania parametrów mechanicznych muru. Główna rozbieżność dotyczy założonego stanu naprężenia w obciążanym panelu.

Według ASTM ściskana przekątna znajduje się w stanie czystego ścinania. Oznacza to, iż wartości bezwzględne naprężeń głównych i naprężeń ścinających są sobie równe:

$$\sigma_1 = |\sigma_2| = \tau = 0,707 P/A; \sigma_1/\sigma_2 = -1$$

gdzie:

$\sigma_1, \sigma_2$  – naprężenia główne,

$\tau$  – naprężenia ścinające,

$P$  – wartość siły obciążającej,

$A$  – przekrój poprzeczny panelu.

Wzorując się na tych założeniach, wytrzymałość panelu na rozciąganie ( $f_t$ ) oblicza się jako:

$$f_t = 0,707 P_u/A$$

gdzie:

$P_u$  – siła niszcząca.

Dodatkową informacją podawaną przez ASTM jest sposób szacowania modułu siecznego, który należy obliczać według zależności:

$$G = 0,707 P/A\gamma$$

gdzie  $\gamma$  to odkształcenie kątowe liczone jako suma względnych

odkształceń czujników pomiarowych:  $\frac{\Delta H}{H} + \left| \frac{\Delta V}{V} \right|$ .

for example of the LVDT type (length 1 m). Strain gauges (length 150 mm) are also used. Loading forces are applied continuously and incrementally. The whole loading process lasts from 1 to 2 minutes. At least ten measurement points need to be in place to ensure an unambiguous description of the stress-strain curve.

Applying the test *in situ* requires several modifications. The basic difference is in the positioning of the panel under investigation. As shown in fig. 7b, the panel is rotated by 45° in comparison to the laboratory version due to technological considerations. Another significant difference is the connection of the panel to the masonry structure. The fragment under examination is fixed to the wall through half the length of its bottom side. Such an arrangement is essential for maintaining the stability of the element, which has been isolated for testing. Diamond wire is used to isolate the fragment to be investigated, with cuts executed in the order shown in fig. 8.

A closed system is used to apply loading – fig. 7b. A hydraulic jack is placed along the direction of the loaded diagonal, on one side pressing on the loading shoe in the vertex of the panel and on the other side on the transverse metal element (two connected U-iron elements, turned to face each other with webs). The transverse element is combined with an identical one placed on the opposite vertex of the diagonal by means of two or four bars (bilateral). This arrangement provides compression of the diagonal on both edges – directly on one side and indirectly on the other side through resistance of the metal bars.

As discussed earlier, the test standard or benchmark is contained in two documents: ASTM and RILEM. The two documents reveal significant differences in the interpretation of results obtained, arising from the way mechanical parameters are estimated. The main discrepancy arises from assumptions made about the stress state of the panel.

According to the ASTM method, the compressed diagonal is in state of pure stress. This means that absolute values of principal and shear stresses are equal to one another:

$$\sigma_1 = |\sigma_2| = \tau = 0,707 P/A; \sigma_1/\sigma_2 = -1$$

where:

$\sigma_1, \sigma_2$  – refers to the principal stresses,

$\tau$  – refers to the shear stress,

$P$  – refers to the loading force value,

$A$  – refers to the cross-section area of the panel.

Based on these assumptions, the tensile resistance of the panel ( $f_t$ ) is calculated as:

$$f_t = 0,707 P_u/A$$

where:

$P_u$  – refers to ultimate force.

Additional information generated by the ASTM approach relates to the way the shear modulus is estimated. This needs to be calculated as follows:

$$G = 0,707 P/A\gamma$$

where:  $\gamma$  is an angular strain calculated as a relative strains sum

of linear sensors:  $\frac{\Delta H}{H} + \left| \frac{\Delta V}{V} \right|$ .



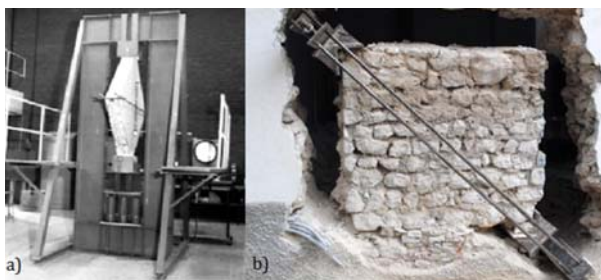
Ryc. 6. Laboratorium w Terni, Uniwersytet w Perugii. Sposób realizacji stanowiska badawczego w próbie ścinania

Fig. 6. Laboratory in Terni, University of Perugia. Test stand for shear testing between layers



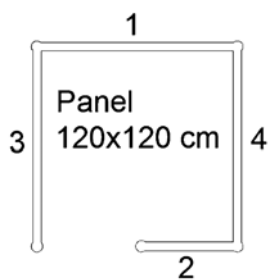
Ryc. 10. Próba ścinania-kompresji bez kontrolowanego ściskania, tzw. próba Shepparda [18]

Fig. 10. Shear-compression test without control of compression – Sheppard test [18]



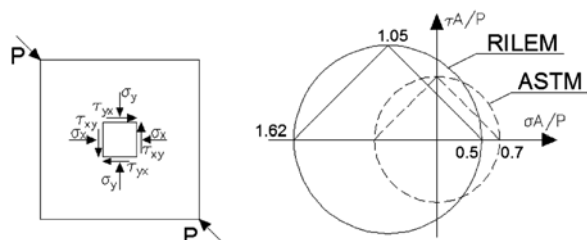
Ryc. 7. Próba ściskania przekątnej w wersji laboratoryjnej (a) i *in situ* (b). [11,13]

Fig. 7. Diagonal compression test in the laboratory (a) and *in situ* (b), [11,13]



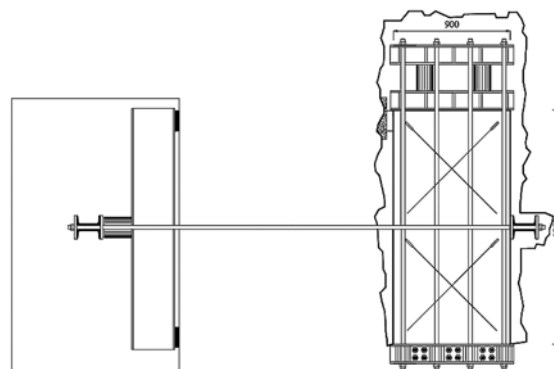
Ryc. 8. Kolejność izolacji panelu z istniejącego muru

Fig. 8. Sequence of steps for isolating the panel from a wall



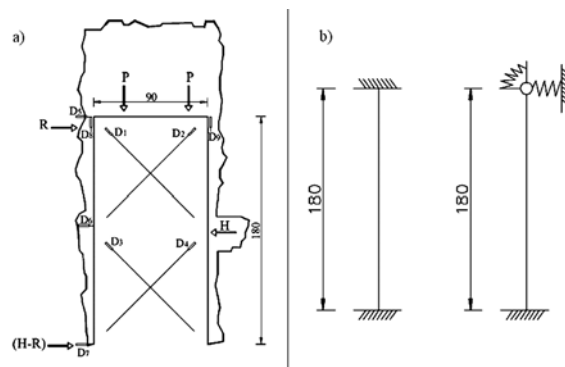
Ryc. 9. Stan naprężenia w obciążonym panelu obrazowany za pomocą koła Mohra

Fig. 9. Stress state in a loaded panel as viewed through Mohr's circle



Ryc. 11. Schemat i oprzyrządowanie w czasie próby ścinania-kompresji [21]

Fig. 11. Concept and instrumentation for a shear – compression test [21]



Ryc. 12. Rozmieszczenie czujników i sił w próbie ścinania-kompresji (a) oraz schematy statyczne stosowane w obliczeniach (b), [3]

Fig. 12. Location of sensors and loads in the shear-compression test (a) and static schemes used in calculations (b), [3]

Zalecenie RILEM zakłada natomiast, iż pole naprężeń wewnątrz badanego muru nie jest jednorodne. Założenie to jest oparte na szacowaniach przeprowadzonych przez Frochta, [14], który opierał się na hipotezie elastycznego homogenicznego kontinuum izotropowego. W tej sytuacji wspomniane relacje przyjmują następującą postać:  $\sigma_1 = 0,52 P/A$ ;  $\sigma_1/\sigma_2 = -0,3$ ;  $\tau = 1,05 P/A$ . Ostatecznie wytrzymałość na rozciąganie muru obliczana jest jako  $f_{i,R} = \sigma_1 = 0,52 P_u/A$ . RILEM nie podaje propozycji szacowania wartości modułu ścinania.

W celu zobrazowania powyższych stanów dobrze jest skorzystać z koła Mohra (ryc. 9). Obie teorie są w stanie poprawnie reprezentować schemat zniszczenia badanych paneli, czyli pęknięcia na obciążonej przekątnej w kierunku działającej siły. W ostatnich latach trwa dyskusja [13, 15, 16, 17] odnośnie do użyteczności i poprawności opisywanych norm, a przeprowadzone eksperymenty numeryczne wskazywałyby na słuszność zaleceń RILEM. Jednak pomimo tego, iż temat jest dość szeroko badany, nie sprawdzono do tej pory wpływu warunków brzegowych – pozycja panelu i więzi – na otrzymywane wyniki i stan naprężenia. Zagadnienie to z pewnością będzie jeszcze wymagało kolejnych badań eksperymentalnych i numerycznych.

## 5. PRÓBA ŚCINANIA-KOMPRESJI (ŚCISKANIA)

Tego typu badania, ze względu na swoją specyfikę, nie są regulowane żadną normą ani zaleceniami. Służą do określania wytrzymałości na ścinanie oraz modułu ścinania. Po raz pierwszy wykonał je w latach osiemdziesiątych Sheppard [19] na osiemnastowiecznych budynkach w Lublanie. W badaniach izolował on panele o wymiarach około 90 cm × 180 cm. Separacja od muru była przeprowadzana za pomocą szeregu odwiertów, przy czym dotyczyło to tylko ścian bocznych. Dolna i górna podstawa pozostały połączone ze ścianą. W ten sposób kompresja realizowana jest przez ciężar muru, który jest przekazywany przez górną powierzchnię panelu (ryc. 10). Oznacza to, że jej wartość nie jest kontrolowana, a do obliczeń szacowana lub mierzona pośrednio [19]. Z kolei siła pozioma jest realizowana za pomocą systemu tworzonego przez podnośnik płaski oraz system prętów i kształtowników kontrujących. Do zrealizowania tej siły potrzebny jest kolejny otwór w ścianie. Prawie zawsze wykorzystywany jest tu otwór drzwiowy. Stosowany system, tak jak w próbie ściskania przekątnej, jest układem zamkniętym i działa na analogicznej zasadzie.

W związku z tym, iż próba Shepparda miała uciążliwe niedociągnięcie w postaci nieznanymi naprężeń ściskających, w latach dziewięćdziesiątych wprowadzono pewną modyfikację [10]. W wyniku zaproponowanej zmiany badane panele są izolowane także na górnej powierzchni, dzięki czemu, poprzez umieszczenie na szczycie panelu dwóch podnośników, można generować dowolne, a przede wszystkim znane naprężenia ściskające (ryc. 11). Można zauważyć, że powstałe ten w sposób panele wyglądają identycznie jak te, na których przeprowadzana jest próba ściskania prostego. Stąd autorzy badań zawsze najpierw przeprowadzają na nich próbę ściskania (tylko faza sprężysta) otrzymując moduł Younga ( $E$ ) i współczynnik Poissona ( $\nu$ ). Dzięki temu po wykonaniu próby ścinania można porównać wartości modułów Younga i Kirchhoffa, czyli  $E/G$ . Jest to bardzo ważna zależność, jeśli chodzi o pracę statyczną i nośność muru. Przykładowo w pracach [19] oraz [20] wykazano, iż stosunek  $E/G$  może być znacznie wyższy,

In the RILEM approach, the assumption is that the stress field within the masonry being investigated is not homogenous. The assumption is based on Frocht's evaluations [14] which are rooted in the hypothesis of an elastic homogenous isotropic continuum. In this situation, the relationships can be described in the following way:  $\sigma_1 = 0,52 P/A$ ;  $\sigma_1/\sigma_2 = -0,3$ ;  $\tau = 1,05 P/A$ . The ultimate tensile strength of the masonry is calculated as:  $f_{i,R} = \sigma_1 = 0,52 P_u/A$ . RILEM does not provide any guidance relating to shear modulus estimation.

In portraying the stress states discussed, it is useful to make use of Mohr's circle (fig. 9). Both theoretical approaches are capable of accurately describing the destruction scheme of the panels, i.e. cracks appear on the loaded diagonal in the direction of the acting force. In recent years, the utility and accuracy of the standards described have been discussed theoretically in the literature [13, 15, 16, 17]. Experimental testing suggests that the RILEM approach should be favoured. Even though the topic has now been quite widely investigated, the influence of boundary conditions has yet to be investigated, especially in relation to the influence of the positioning and bonding of the panel on the results generated and the stress state. This issue undoubtedly requires further experimental and theoretical investigation.

## 5. SHEAR-COMPRESSION TEST

Due to their specific nature, shear compression experiments are not standardised in relation to any code or recommended procedure. They are used to determine shear resistance and shear modulus. P.F. Sheppard [19] first conducted such tests in the 1980s on 18<sup>th</sup> century buildings in Ljubljana. He isolated rectangular panels (90 × 180 cm). Separation from the wall structure was achieved through drilling, but only the lateral sides were isolated. The lower and upper edges remained connected to the wall. In this way, compression was achieved by the weight of the masonry itself compressing the upper surface of masonry (fig. 10). In this arrangement, the stress value remained uncontrolled, and the estimated impact had to be calculated indirectly [19]. The horizontal force was applied through a hydraulic jack and system of counteracting bars and structures. A second hole in the wall is needed to exert a sufficient force. This is why doorways are almost always used in such tests. Just as in the diagonal compression test, the shear compression test is a closed arrangement and works in analogical way.

A modification to the Sheppard test was introduced in the 1990s to deal with its major shortcoming of inability to determine compression stresses in a direct way [10]. The modification involved isolating the panels being assessed also on their upper surface, thus enabling the generation of any desired and controlled compression stresses by means of two hydraulic jacks positioned on this surface (fig. 11). It should be noted that panels tested in this way are identical to those used in simple compression tests. This is why testing always begins with a compression test (only in the elastic range) to determine the elastic modulus ( $E$ ) and Poisson's ratio ( $\nu$ ). The shear test then provides the possibility of determining Young's and Kirchhoff's moduli i.e.  $E/G$ . This is a very important relationship as it links together static behaviour and load capacity of masonry. Several papers [19, 20] have demonstrated that the relationship  $E/G$  can be much higher than could be expected from the dependence  $E = 2(1+\nu)G$ .



niż wynikałoby to z zależności  $E = 2(1 + \nu)G$ . Stąd, temat ten z pewnością wymaga dalszych badań eksperymentalnych.

Po wykonaniu pierwszej fazy – próby ściskania, dokonuje się relokacji czujników – z pozycji ortogonalnej na diagonalną (D1–D4 na ryc. 12a). Dodatkowo umieszcza się 3 czujniki rejestrujące przemieszczenia poziome (D5–D7) oraz dwa rejestrujące przemieszczenia górnego krańca panelu w celu określenia jego rotacji (D8–D9). Rotacja jest efektem niepożądanym. Pomimo iż w czasie próby stosuje się system prętów usztywniających, górna część panelu doznaje obrotu, a tym samym reakcje i dystrybucja naprężeń w dolnym i górnym fragmencie panelu nie są identyczne. W związku z powyższym przy opracowywaniu wyników brane są pod uwagę co najmniej dwa schematy statyczne (ryc. 12b). Stałe sprężystości dla sprężyny translacyjnej i rotacyjnej są wyliczane na podstawie mierzonych sił i przemieszczeń. Siła pionowa jest realizowana przez dwa podnośniki płaskie umieszczone na kształtowniku IPE330 w celu równomiernej dystrybucji parcia. Siła pozioma jest realizowana identycznie jak przez Shepparda (ryc. 11). W celu uniknięcia zniszczenia panelu przez zginanie przy jego górnym krańcu umieszczone są dwa podnośniki płaskie w pozycji horyzontalnej, a mierząc ciśnienie wywierane na nich w czasie realizacji próby otrzymuje się wartość reakcji  $R$ . Czujniki, podnośniki płaskie oraz czas wymagają łącznie 21 kanałów pomiarowych.

W powyższym doświadczeniu panel o rozmiarach 180 cm × 90 cm rozpatruje się jako belkę ściskaną i zginaną. Początkowa wartość naprężeń pionowych jest znana i wynosi:

$$\sigma_0 = \frac{P_v}{A} \quad (1)$$

gdzie:

$P_v$  – obciążenie pionowe,  $A$  – przekrój poprzeczny panelu w kierunku horyzontalnym. Maksymalna siła pozioma  $T_u$  jest reakcją w dolnej części panelu i równa jest różnicy sił  $H$  i  $R$  (ryc. 12). Na jej podstawie wyliczane są maksymalne naprężenia ścinające  $\tau_u$ :

$$\tau_u = \frac{T_u}{A} \quad (2)$$

Wówczas wartość odpowiadającym im naprężeniom głównym w dolnym fragmencie panelu wyrażoną jest zależnością [22]:

$$\sigma_I = \sigma_0 \left[ -\frac{1}{2} + \sqrt{\left(b \frac{\tau_u}{\sigma_0}\right)^2 + \frac{1}{4}} \right] \quad (3)$$

gdzie:

$b$  – współczynnik kształtu uwzględniający zmienność naprężeń w przekroju, wyrażony zależnością:  $b = 1,543 - 0,478 \tau_u/\sigma_0$ .

Otrzymując odpowiednie wartości z zależności (1), (2), (3) ostatecznie można opisać charakterystyczne naprężenia ścinające:

$$\tau_k = \frac{\sigma_I}{b} \quad (4)$$

W dalszej kolejności wyliczany jest moduł ścinania  $G$ . Algorytm obliczeniowy jest tu skomplikowany i zależy zarówno od geometrii, jak i przemieszczeń panelu w czasie próby. Dokładny opis postępowania znajduje się w pracy [10].

W praktyce, ze względu na duże koszty i nakład pracy, opisywany test jest wykonywany relatywnie rzadko. Zdecydowanie częściej w celu oszacowania wytrzymałości na ścinanie stosowana jest próba ściskania przekątnej.

The conclusion is that this issue still requires further experimental testing.

Following on from the first stage – the compression test – sensors are repositioned from the vertical to the diagonal (D1–D4 in fig. 12a). Three additional sensors are positioned to record horizontal displacements (D5–D7) and another 2 are set to record displacements of the edge of the upper panel so as to enable estimation of its rotation (D8–D9). The rotation is an undesired side-effect. Despite a system of bracing bars, the upper part of the panel rotates resulting in different reactions and stress distribution in the bottom and top parts of the panel. To take account of this situation, results are always considered in relation to static schemes (fig. 12b). Elasticity coefficients for the translation and rotation spring are calculated on the basis of measured forces and displacements. Vertical load is exerted by two hydraulic jacks placed on the IPE330 profile, which translates into a uniform pressure. The horizontal force is applied in the same way as in the Sheppard test (fig. 11). In order to avoid destruction of the panel through bending, the two hydraulic jacks are placed in a horizontal position near its upper edge and measuring the pressure exerted through them during loading generates the value of the reaction  $R$ . Sensors, hydraulic jacks and time require up a total of 21 measuring channels.

In this experimental test, a 180 cm × 90 cm panel is treated as a beam compressed and subjected to bending. The initial value of vertical stresses is known and is equal to:

$$\sigma_0 = \frac{P_v}{A} \quad (1)$$

where:

$P_u$  – vertical load,  $A$  – horizontal cross-section of the panel. Maximal horizontal force  $T_u$  is a reaction in the lower part of the panel and is equal to the difference of forces  $H$  and  $R$  (fig. 12). From this force, maximum shear stress received is:

$$\tau_u = \frac{T_u}{A} \quad (2)$$

The value of corresponding principal stress in the lower part of the panel is given by the dependence [22]:

$$\sigma_I = \sigma_0 \left[ -\frac{1}{2} + \sqrt{\left(b \frac{\tau_u}{\sigma_0}\right)^2 + \frac{1}{4}} \right] \quad (3)$$

where:

$b$  – shape factor taking into account the variability of stresses in the intersection, given by the relation:  $b = 1,543 - 0,478 \tau_u/\sigma_0$ .

Obtaining values from equations (1), (2), (3) describes the characteristic shear stresses:

$$\tau_k = \frac{\sigma_I}{b} \quad (4)$$

The secant modulus  $G$  can be determined as a result of this calculation. The calculation algorithm is quite complex and a proof depends on both the geometry and displacement values. A precise description of the procedure can be found in [10].

In practice the test is seldom conducted due to the high labour costs and input required. The diagonal compression test is used much more frequently to estimate the shear resistance.

## 6. PODSUMOWANIE

Poprawna ocena parametrów wytrzymałościowych oraz pracy statycznej wzmocnionej konstrukcji są kluczowymi czynnikami rzutującymi na finalny efekt przeprowadzanej interwencji. Jak przedstawiono powyżej, w przypadku historycznych konstrukcji murowych, a w szczególności jeśli chodzi o wielowarstwowe mury kamienne, napotymane są liczne trudności. Pierwszą z nich jest oczywiście aspekt konserwatorski. Nie każda konstrukcja może bowiem zostać poddana takim badaniom, może być to niemożliwe zarówno ze względów bezpieczeństwa, jak i zachowania wartości. Kolejnym utrudnieniem są duże koszty takich przedsięwzięć oraz wysoki stopień złożoności. Oddzielnym zagadnieniem jest ciągła polemika na temat stanu naprężeń, w jakim znajdują się panele poddawane niektórym z prób. Mowa tu o próbie ściskania w kierunku przekątnej i próbie ścinania-kompresji. Wspomniana dyskusja implikuje z kolei niepewność przy określaniu wartości liczbowych wytrzymałości na rozciąganie i ścinanie.

Niemniej jednak, pomimo wyżej opisanych niedociągnięć oraz niedogodności, scharakteryzowane w pracy badania są nadal najpewniejszym źródłem informacji na temat cech mechanicznych i zachowań statycznych historycznych konstrukcji murowych. Dlatego też, jeśli tylko istnieje taka możliwość, eksperymenty powinny być bezwzględnie przeprowadzane. Należy bowiem pamiętać, iż takie testy nie służą wyłącznie zbadaniu konkretnego muru. Oczywiście jest to informacja priorytetowa, ale każde badanie jest także bezcennym źródłem wiedzy na temat muru o określonej strukturze i przekroju poprzecznym. Taka wiedza, oparta na licznych rezultatach, w przyszłości może posłużyć do wystarczająco pewnego diagnozowania konstrukcji tylko przy użyciu technik nieniszczących i numerycznych. Dlatego też tak ważne jest publikowanie wyników takich badań i współpraca pomiędzy ośrodkami naukowymi i innymi zespołami pracującymi w tym obszarze.

Bardzo ważną rolę, w szczególności w poznawaniu pracy statycznej i badaniu nowych metod wzmocniania konstrukcji, odgrywają badania laboratoryjne. Budowane w laboratoriach modele, murowane technikami stosowanymi w przeszłości, są bardzo cennym źródłem dostarczającym informacji o charakterze jakościowym.

## 6. CONCLUSION

An accurate evaluation of the mechanical parameters and static behaviour of a strengthened construction is crucial to determining the success of an intervention. As discussed in this paper, numerous difficulties must be dealt with, in the case of historical masonry structures, especially with respect to multilayered stone walls. The first difficulty relates to the challenge of preservation. Many building structures are not amenable to testing due to safety considerations and the need to preserve heritage values. Another difficulty relates to the high costs of such projects and their complexity. A further issue relates to differing opinions as to the state of stress of panels during diagonal compression and shear-compression testing, which draws attention to the uncertainties in estimating the numerical value of shear and tensile resistance.

Despite the shortcomings and difficulties discussed, experimental testing still provides the most reliable source of information concerning the mechanical properties and static behaviour of historical masonry structures. For this reason, such testing must be carried out wherever a possibility arises. It is worth noting that such tests do not serve only to assess a specific wall structure, even though this must be the priority. Each test contributes also precious knowledge relating to the specific structure and make-up of masonry. Generating such knowledge from the results of numerous tests may in the future serve to enable assessment of historical structures on the basis of non destructive techniques and numerical modelling. For these reasons, it is very important to publish the results of such experiments and enable cooperation between research centres and teams working in this field.

Laboratory tests have a very important role to play in investigating static behaviour of building structures and in experimenting with new strengthening techniques. Models built in the past for laboratory testing provide an extremely valuable source of qualitative information.

*tlum. M.S.*

---

## BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1996-1-1. *Projektowanie konstrukcji murowych. Część 1-1: Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2010.
- [2] Drysdale R., Hamid A., *Masonry Structures: Behavior and Design*, Colorado 2008: Masonry Society, 3<sup>rd</sup> edition.
- [3] Corradi M., Borri A., Vignoli A., *Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the Umbria-Marche earthquake of 1997-1998*, Construction and Building Materials 16 (2002), 229-239.
- [4] Oliveira D.V., Lourenco P.B., *Experimental behavior of three-leaf stone masonry walls*, Proceedings of the International Conference Heritage Protection – Construction aspects, Dubrovnik, 14-17 October 2006.
- [5] Vasconcelos G., *Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: Characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls*, PhD thesis, University of Minho 2005.
- [6] Almeida C., Costa C. Q., Guedes J., Arede A., Costa A., *Mechanical behavior analyzes of one leaf stone masonry walls*, 6<sup>th</sup> International Congress on Pathology and Recuperation of Constructions, 2-4 June 2010, Cordoba, Argentina.
- [7] RILEM LUMB5, *Short term shear test for the interface between the masonry unit and mortar or moisture-insulating interlayer*. TC 76-LUM, 1991.
- [8] EN 1052-4:2002: *Methods of test for masonry – Part 4: Determination of shear strength including damp proof course*. CEN, 2000.
- [9] Pina-Henriques J. L., *Masonry under Compression: Failure Analysis and Long-Term Effects*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2005.

- [10] Avorio A., Borri A., Corradi M., *Ricerche per la ricostruzione. Iniziative di carattere tecnico e scientifico a supporto della ricostruzione*, Tipografia del Genio Civile, Roma 2002.
- [11] ASTM E 519–81. *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*, American Society for Testing Materials, 1981.
- [12] RILEM TC. 1994. 76-LUM. *Diagonal tensile strength tests of small wall specimens*, In RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. London: E&FN SPON, 488–489, 1991.
- [13] Borri A., Castori G., Corradi M., Speranzini E., *Shear behavior of unreinforced and reinforced masonry panels subjected to in situ diagonal compression tests*, Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 12, December 2011.
- [14] Frocht M.M., Arbor A., *Recent advanced in photoelasticity*. Transaction, ASME, 55: 135–153, 1931.
- [15] Lagomarsino S., Brignola A., Frumento S., Podesta S., *Identification of shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test*. International Journal of Architectural Heritage, 3: 52–73, 2009.
- [16] Calderini C., Cattari S., Lagomarsino S., *The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of masonry*. Construction and Building Materials, Volume 24(2010) 677–685.
- [17] Chiostrini S., Galano L., Vignoli A., *On the determination of strength of ancient masonry walls via experimental tests*, Proc. of the 12th world conference on earthquake engineering (CD-ROM), 2000, [paper no. 2564].
- [18] Vignoli A., *Ordine degli Ingegneri della Provincia di Pistoia Corso di Analisi e Interventi Strutturali su Edifici in Muratura secondo le NTC 2008. Caratterizzazione meccanica delle murature*, Pistoia, Palazzo Vescovile, 28 settembre 2012.
- [19] Sheppard P.F., *In situ test of shear strength and deformability of an 18th century stone and brick masonry wall*, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Brick/Block Masonry Conference, Melbourne, 1985.
- [20] Elmenshaw A., Duchesne D., Paquette J., Mufti A., Jaeger L., Shrive N., *Elastic moduli of stone masonry based on static and dynamic tests*, 11<sup>th</sup> North American Masonry Conference. Minneapolis, MN, USA, June 5-8 2011.
- [21] Corradi M., Borri M., Vignoli A., *Experimental Evaluation of In-plane Shear Behaviour of Masonry Walls Retrofitted Using Conventional and Innovative Methods*, Masonry International. Journal of the British Masonry Society, Volume 1, Spring 2008.
- [22] Turnsek V., Sheppard P.F., *The shear and flexural resistance of masonry walls*, Proc. of the research conf. on earthquake engineering, Skopje, 1980.

## Streszczenie

Praca dotyczy określania parametrów mechanicznych i pracy statycznej historycznych konstrukcji murowych na podstawie badań eksperymentalnych. Omówiono próbę ściskania prostego, ścinania między warstwami, próbę ściskania przekątnej oraz test ścinania-kompresji. Testy opisano zarówno w warunkach *in situ*, jak i laboratoryjnych. Przybliżono tło historyczne oraz najistotniejsze programy badawcze, opisano algorytm postępowania w czasie badań, a także konieczne do ich przeprowadzenia oprzyrządowanie i aparaturę. Przedstawione zostały również zależności wykorzystywane do szacowania parametrów wytrzymałościowych na podstawie otrzymywanych wyników. Uzasadniono użyteczność i zalety wykonywania takich badań, została podkreślona rola badań laboratoryjnych oraz określono przewidywane kierunki ich dalszego rozwoju. Wskazano również na konieczność archiwizowania i udostępniania wyników w celu ich efektywniejszego wykorzystania w przyszłości. Zestawiono także podstawowe problemy związane z przeprowadzanymi badaniami oraz ich wpływ na uzyskiwane wyniki.

## Abstract

The paper is concerned with the use of experimental testing for determining the mechanical parameters and static behaviour of historical masonry structures. The paper discusses simple compression tests, shear test between layers, diagonal compression and shear-compression tests. Experiments are described in both laboratory and *in situ* conditions. The historical context and the most significant research programs are reviewed. The algorithm used in each test is described, along with the instrumentation and apparatus needed for conducting the test. The mathematical relationships used to estimate the mechanical parameters on the basis of experimental results are presented. The utility and benefits of experimental testing and the importance of laboratory work is emphasized as a basis for identifying research and development priorities. The case is made for archiving and making available experimental results as a basis for the development of more effective interventions in the future. The difficulties and challenges related to using data from experimental testing are also discussed.