

Marek Skłodowski

**COMPACT DIAGNOSTIC TEST:
OUTLINE OF
HISTORICAL MONUMENTS TESTING PROCEDURE**



INSTITUTE OF FUNDAMENTAL TECHNOLOGICAL RESEARCH
POLISH ACADEMY OF SCIENCES
WARSZAWA 2006

ISSN 0208-5658

Redaktor Naczelny:
doc. dr hab. Zbigniew Kotulski

Recenzent:
doc. dr hab. Michał Glinicki

Praca wpłynęła do Redakcji 30 stycznia 2006 r.

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład: 100 egz. Ark. druk.: 1,5

Oddano do druku w kwietniu 2006 roku

Druk i oprawa: Drukarnia Braci Grodzickich, Piaseczno, ul. Geodetów 47a

ABSTRACT

Report presents a concept of a new testing of mechanical properties of heritage materials used in historical constructions. Suggested QNDT (quasi non-destructive) method is an adaptation of the methods known in rock mechanics and mechanics of concrete and here is used for testing of micro-cores taken out of heritage buildings. Discussion shows that together with strength measurements there is also possible to use the same micro-core for measurement of ultrasonic waves velocities and material microstructure analysis. No additional destruction to cultural heritage is introduced as micro-core may come from the holes drilled in heritage structures in their everyday use. Hence the method of micro-cores testing presents useful supplement to the existing measurement methods.

JUSTIFICATION OF NEEDS

Problems of conservation of historical structures are strictly related to assessment of their technical conditions and of presence of possible threats to their further existence. Therefore in the first place there are needs for measurement or identification of properties of structural materials. This results usually from lack of sufficient documentation combined with degradation of materials suffering mechanical and environmental effects since centuries [1].

The most important mechanical properties such as stiffness of structural elements, compression strength, distribution of stresses and existing deformations (settlements, opening of cracks, out of plumb inclinations of columns and walls) need to be measured for a purpose of calibration of numerical models and of assessment of a structure behaviour, its safety and an effectiveness of undertaken protecting activities.

COMMON DENOMINATOR OF NOWADAYS METHODS

A lot of measurement methods for needs of historical structures research have been developed. All those methods characterize a great care to preserve the structure and its elements in unaltered condition as a matter of the monumental character of the structure. However almost all methods have a common feature. This is drilling of holes.

Drilling of holes accompanies installation of all types of deformations monitoring sensors [2, 3] such as inclinometers, displacement transducers, (LVDT or fiber optics), mounting of geophones, measuring stresses with flat-jacks [3], and fixing of geodetic markers. Holes are also drilled during placement of lighting, loudspeakers, TV safeguarding and fire alarm systems and also during measurement of cohesion of a masonry material by drilling resistant method (DRMS) [4].

The historical material is pulverised during drilling processes in all the above cases and becomes irrecoverably lost. This is a main drawback of the nowadays methods. The purpose of the proposed investigation procedure is to eliminate this waste to be able to use the material in further research.

CORE MICRODRILLING

The material from hundreds of holes drilled in historical structures for technical purposes if used for further research would be a valuable source of information of their mechanical properties. As a possible solution of the problem a concept of development of a technology of core micro-drilling in historical masonry structures was born in Division of Vision and Measurement Systems of IFTR PAS.

Drilling of holes with hollow (core) drills is universally applied in mining engineering and rock mechanics [4]. In the case of historical structures using such drills of large diameter cannot be widely accepted. A much smaller hollow drills of

several millimetres in diameter should be used which allows to take out a small piece of a structural material leaving a hole fulfilling the same functional role as that of a hole drilled out in the traditional way for sensor mounting. Such micro-cores drilled out from sandstone and brick are shown in Fig.1 together with a large rock core from a mine shown for comparison.



Fig. 1. Micro-cores taken out of sandstone and brick and a rock core from a mine.

Instead of destroying the valuable material while mounting installations and sensors it is possible to make use of micro-cores taken-out for testing of mechanical properties in a laboratory and next for possible physical and chemical analysis.

The most important testing include measurements of a modulus of elasticity and a compressive strength. But spectrum of possible measurements is much wider if only a proper care is taken while planning the research. Suggested test of historical structural materials taken as micro-cores out of heritage buildings is presented in following section of the report.

ILLUSTRATIVE PROCEDURES OF TAKING OUT AND TESTING OF MICRO-CORES

Let us consider at first a method of simple over-coring shown in Fig. 2. One starts drilling with a small core drill bit from the surface of a historical material and drills to a depth required to get a micro-core of the desired slenderness. Drilling over of long micro-cores shown in Fig. 1 is a long and tedious operation due to heat and chips removal problems. However deep drilling opens a special research perspective as long micro-cores of slenderness about three can be used in testing of flexural strength and for material morphological analysis.

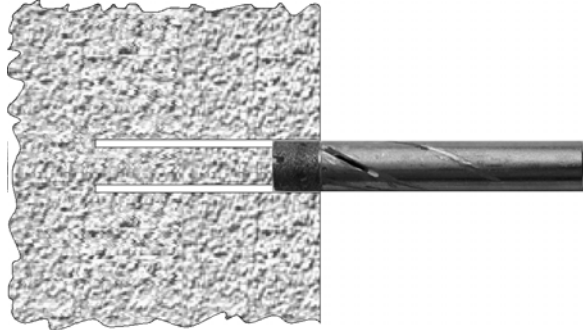


Fig. 2. Outline of micro-core drilling

The most often however it is enough when drilling depth does not exceed 10 mm owing to not large micro-cores diameter being usually from 6 to 8 mm. This is dictated by a need to preserve a small slenderness of specimens matched properly for uniaxial compression experiments and due to difficulties in obtaining long micro-cores.

Short micro-cores can be used for measurement of velocity of longitudinal ultrasonic wave, of material density, of uniaxial compressive strength or a test of diametral compression (so-called Brazilian Test) for evaluation of tensile strength.

The same measurements can be made using short micro-cores taken out of depth of a building wall. In such a case the first drilling phase should be made to a required depth of d_1 using ordinary drill and next, as shown in Fig. 3, the hole should be deepened with a core drill bit to obtain in this way a core of the length $d_2 - d_1$ from a deeper material layer. Further drilling is made with ordinary drill bit again to obtain a hole suitable for mounting needs.

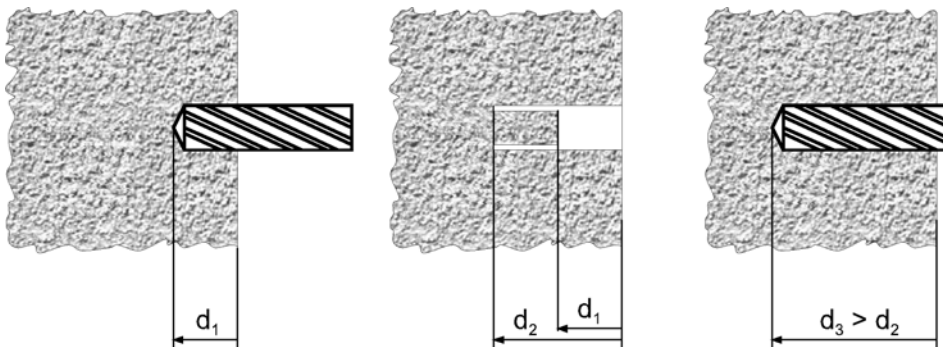


Fig. 3. Core-from-depth procedure.

To illustrate possibilities of micro-core testing there are shown examples of application of computer vision methods and of ultrasonic measurements.

An apparatus for simple morphological tests of micro-cores consists of a CCD camera, a rotating table driven by a stepping motor for specimens fixing, a motor controller and a computer. An image of the side wall of the microcore is registered at each of N angular positions of the table. In the case of pictures presented below it was $N = 200$ positions. One of the registered images is shown in Fig. 4.

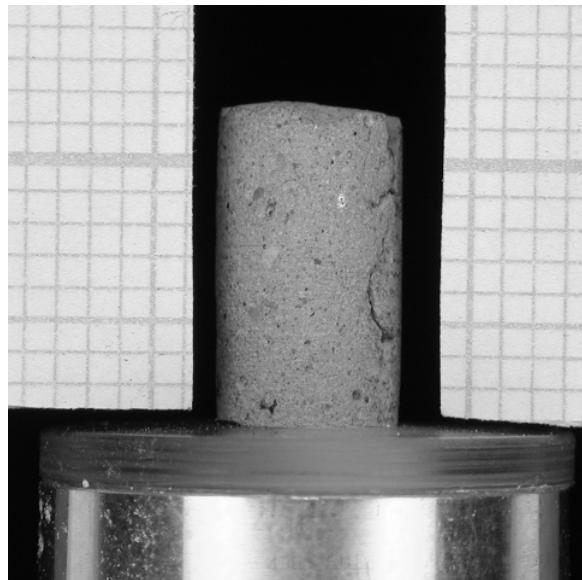


Fig. 4. Micro-core on a rotating table driven by a stepping motor (preview).

The developed measuring device provides analogous information to boroscope tests and is many times cheaper than commercial boroscopes [6] especially in the case of registration of colour images. The difference of results possible to obtain with both methods lies in a much higher resolution of the suggested method and in that that boroscope images show a side surface of a hole left after taking the core out and the suggested method shows side surface of the core. So the image from boroscope and the image of the side wall of the core present slightly different fragments of the material, spaced a wall thickness of the core drill bit apart each other, which is less than 1 millimeter. However boroscope inspection or drilling out cores of large diameters seems to be the only solution for a greater depth of holes.

As an example an image of a side wall of the micro-core of $D=6.4$ mm in diameter drilled out of a brick is presented in Fig. 5.

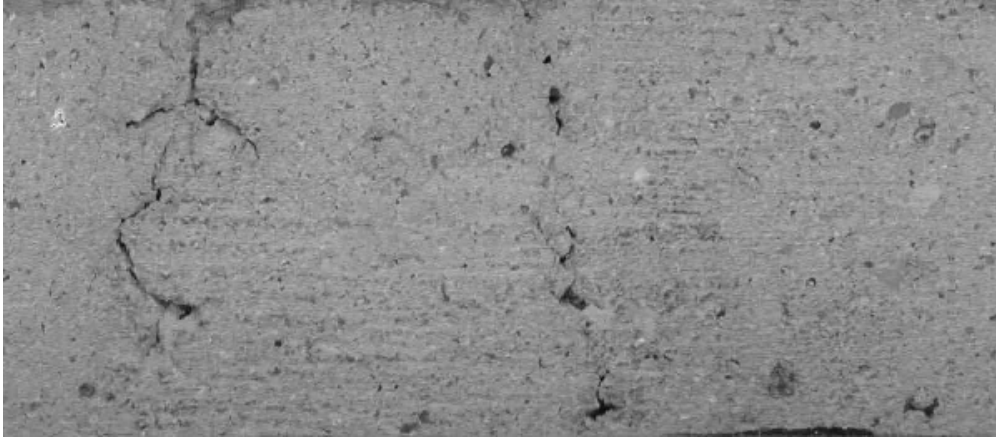


Fig. 5. Unwrapped image of a side surface of a brick micro-core.
Original image resolution 1pixel = 20 micrometers.

If the position of drilled holes is not dictated by technical reasons as e.g. sensor mounting, the micro-cores can be drilled out at close distance to each other as it is shown in Fig. 6.

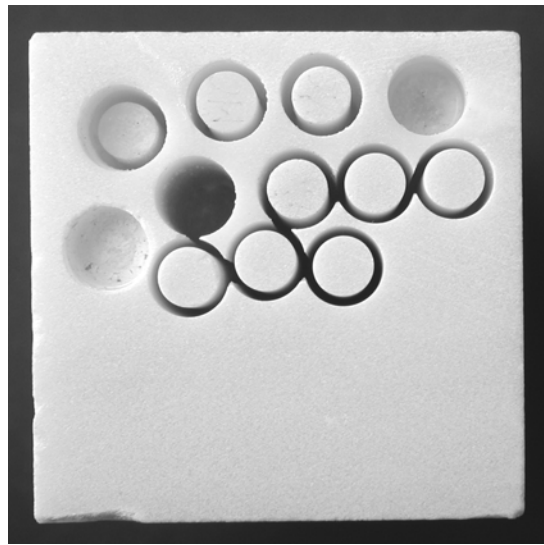


Fig. 6. Micro-cores in a marble sample.
Lateral dimension of the specimen are 50 mm x 50 mm.

An exemplary method of longitudinal wave velocity measurement in a micro-core of Cervaiolle marble with length of 25.8 mm is presented in Fig. 7. Ultrasonic heads of 2 MHz frequency were used. The heads are pressed against the specimen through coupling layers. The specimen is held at measurement position without supporting it

by frictional forces only. The measured velocity of the longitudinal wave is 5290 m/s. This is in agreement with the data obtained for this material on larger specimens with dimensions 100 mm x 50 mm x 50 mm. This velocity measured in Building Research Establishment (UK) in EU Project “MCDUR” [7] equals to 4990-5380 m/s.



Fig. 7. Measurement of longitudinal wave in a microcore of Cervaiolle Marble (collaboration P. Gutkiewicz).

OUTLINE OF “GOOD PRACTICE” PROCEDURE OF HISTORICAL MONUMENTS TESTING

As holes in historical monuments are drilled really frequently therefore changing a method of nowadays drilling into micro-core drilling enables intentional collecting and storing of samples as a part of conservator documentation of a monument. These

cores might be used for research at any time when such a need arises. Thus despite of a fact that drilling is a destructive operation itself adopting the hollow drilling of micro-cores as a general rule results in literally no additional damages in structure and might be regarded as non-destructive test in most practical situations.

Having in mind this advantage a sequence of research steps was developed which serves a purpose of gaining of a maximum knowledge based on micro-core investigations. Such a sequence of measurements, non-destructive from monuments perspective, constitutes one of the best research practice available nowadays. Consecutive ten steps of this “good practise” named Compact Diagnostic Test (CoDiT) are:

- Step 1. Draw a line to permanently mark the vertical plane of a hole to be drilled.
- Step 2. Measure the velocity of propagation of surface wave (Rayleigh wave) along marked the vertical line and perpendicularly to it [8].
- Step 3. Drill a hole with a core drill bit, preferably during installation works, with possible simultaneous measurement of drilling resistance (DRMS) [4] and take out a micro-core.
- Step 4. Flatten the core base which resulted after its breaking off and copy the vertical line marking (from Step 1) on it.
- Step 5. Measure the core dimensions and weight the core.
- Step 6. Record an image of a side wall of the core and analyse micro-cracks, pores and material inhomogeneities.
- Step 7. Measure the velocity of propagation of the longitudinal wave along the core.
- Step 8. Perform three-point bending test of the core in plane marked as vertical. Two half-cores will come into being.
- Step 9. Perform uniaxial compression test using one half-core (see Step 8).
- Step 10. Perform diametral compression test of the other half-core along originally vertical plane (comp. Step 1 and Step 8).

Destructive tests of Steps 9 and 10 can be modified as necessary. This is especially recommended when number of micro-cores available for testing is greater than the required for basic measurements. In such a case

- a uniaxial cyclic compression of the one half-core and
- a creep test of the other half-core

might be of a special interest.

The suggested Compact Diagnostics Test (CoDiT) is not expressed in standards for strength testing of neither rock nor building materials and thus at the stage of its further elaboration comparison tests using widely accepted methods and specimens of generally used size will need to be performed.

SUMMARY

The "good practice" outlined above needs a lot of measurement works yet and correlating of obtained results with results of other testing methods by the time it can be recognized as the fully developed research procedure. However it can already be expected that CoDiT method should allow to evaluate mechanical properties of historical material such as velocities of longitudinal and surface ultrasonic waves, modulus of elasticity, tensile, compressive and bending strength, material density, cohesion and possible statistical data regarding its internal structure.

All these data can be obtained without any additional interference in historical substance of the structure if CoDiT method is used during installation works universally executed in monuments. Hence the CoDiT method can be very often in practise the non-destructive research method of historical structures.

A pilot study of microcores taken out from samples of marbles from Carrara quarries are being initiated. These are microcores of Gioia marble and Cervaiolle marble for which basic mechanical properties, namely longitudinal wave velocity and surface wave velocity, uniaxial compressive strength and modulus of elasticity were measured in "MCDUR" Project [7].

BIBLIOGRAPHY

- 1 Macchi G., General Metodology. The Combined Use of Experimental and Numerical Techniques Inside a Single Study. In: P. Roca (ed.), *Structural Analysis of Historical Constructions*, Barcelona, Spain, Nov. 8-10, 1995, 1-14, CIMNE Barcelona.
- 2 Nappi A., Non-Destructive Techniques and System Identification Applied to Historical Constructions. In: P. Roca, J.L. González, E. Oñate, P.B. Lourenço, *Structural Analysis of Historical Constructions II*, Barcelona, Spain, Nov. 4-6, 1998, 125-147, CIMNE Barcelona.
- 3 Rossi P.P., Rossi C., Surveillance and Monitoring of Ancient Structures: Recent Developments. In: P. Roca, J.L. González, E. Oñate, P.B. Lourenço, *Structural Analysis of Historical Constructions II*, Barcelona, Spain, Nov. 4-6, 1998, 163-178, CIMNE Barcelona.
- 4 Delgado Rodrigues J., Costa D., (2004). A New Method for Data Correlation in Drill Resistance, Test for the Effect of Drill Bit Wear. *International Journal for Restoration – Internazionale Zeitschrift für Bauinstandsetzen*, 10(3), pp. 1—18.
- 5 Dreyer W., The Strength Properties of Rocks, *Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 1, No. 2*, Trans Tech Publications, 1973 (2nd ed.).
- 6 <http://www.uxr.com/borescopes.asp>
- 7 Effect of the weathering on stone materials: assessment of their mechanical durability, *EU Research Project G6RD-CT2000-00266, and NAS Integration Project: Acoutherm (GRD3-2001-60001)*, (<http://www.icvbc.cnr.it/mcdur/>)
- 8 Skłodowski M., (2005). Application of ultrasonic Rayleigh wave to testing of masonry materials. In: Modena, Lourenço & Roca (eds.), *Structural Analysis of Historical Constructions* (pp.395-400), London, Taylor & Francis Group.

Marek Skłodowski

**KOMPAKTOWY TEST DIAGNOSTYCZNY:
ZARYS PROCEDURY BADANIA
BUDOWLI HISTORYCZNYCH**



INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI
POLSKIEJ AKADEMII NAUK
WARSZAWA 2006

STRESZCZENIE

Raport przedstawia nową koncepcję badania własności mechanicznych zabytkowych materiałów stosowanych w budowlach historycznych. Proponowany prawie nieniszczący (QNNT) sposób badań jest częściowo adaptacją metod pomiarowych znanych z mechaniki górotworu i mechaniki betonu wykorzystanych tym razem do badania mikrordzeni pobieranych z zabytkowych budowli. Rozważania wskazują, że wraz z pomiarami wytrzymałości możliwe jest wykorzystanie tego samego mikrordzenia do pomiaru prędkości fal ultradźwiękowych i analizy mikrostruktury materiału. Metoda nie wprowadza dodatkowego zniszczenia zabytkowych obiektów ponieważ mikrordzenie mogą pochodzić z otworów wierconych w codziennej eksploatacji historycznych budowli. Tym samym metoda badania mikrordzeni stanowi potrzebne uzupełnienie dotychczasowych metod pomiarowych.

UZASADNIENIE POTRZEB

Zagadnienia konserwacji budowli historycznych wiążą się ściśle z oceną ich stanu technicznego i występowania ewentualnych zagrożeń dalszego istnienia konstrukcji. Dlatego na pierwszy plan wysuwają się potrzeby pomiaru bądź identyfikacji własności materiałów konstrukcji. Wynika to zazwyczaj z braku dostatecznej dokumentacji konstrukcyjnej budowli połączonego z degradacją materiałów narażonych od stuleci na oddziaływania mechaniczne i środowiskowe [1].

Najistotniejsze wielkości mechaniczne, takie jak sztywność elementów konstrukcji, wytrzymałość na ściskanie, rozkłady naprężeń i rzeczywiste deformacje (osiadania, rozwarcia szczelin, pochylenia ścian i filarów) muszą być zmierzone dla kalibracji modeli numerycznych i oceny zachowania konstrukcji, jej bezpieczeństwa i skuteczności przedsięwziętych działań zabezpieczających

WSPÓLNY MIANOWNIK DZISIEJSZYCH METOD

Opracowano wiele różnych metod pomiarowych dla potrzeb badania budowli historycznych. Wszystkie te metody, ze względu na zabytkowy charakter badanych obiektów, cechuje znaczna dbałość o zachowanie w stanie nienaruszonym konstrukcji i jej elementów. Jednakże niemal wszystkie te metody mają jedną wspólną cechę. Jest nią wiercenie otworów.

Wiercenie otworów towarzyszy zakładaniu wszelkich czujników do monitorowania deformacji [2, 3], takich jak inklinometry, czujniki przemieszczeń (indukcyjne, światłowodowe), występuje przy montażu geofonów, pomiarach naprężeń przy użyciu mieszków sprężystych (*flat-jack*) [3] oraz mocowaniu reperów sieci geodezyjnej. Otwory są także wiercone podczas montażu instalacji oświetleniowych, nagłaśniających, telewizyjnych sytemów dozoru i przeciwpożarowych systemów alarmowych, a także podczas pomiaru kohezji materiałów murów poprzez pomiar oporu wiercenia (metoda DRMS [4]).

We wszystkich tych sytuacjach zabytkowy materiał ulega sproszkowaniu w procesie wiercenia i zostaje bezpowrotnie utracony. Jest to zasadnicza wada wszystkich obecnych metod. Celem proponowanej procedury badawczej jest wyeliminowanie tego niszczenia materiału aby móc wykorzystać go do dalszych badań.

MIKROWIERCENIE RDZENIOWE

Wykorzystanie do badań materiału z setek otworów wierconych ze względów technicznych w historycznych konstrukcjach byłoby cennym źródłem informacji o ich własnościach mechanicznych. Możliwym rozwiązaniem problemu jest koncepcja opracowania techniki wiercenia mikrordzeniowego w murowanych obiektach zabytkowych, która pojawiła się w Pracowni Systemów Wizyjnych i Pomiarowych IPPT PAN.

Wiercenie otworów wiertłami rurowymi (koronkami) jest powszechnie stosowane w górnictwie i mechanice górotworu [4]. W przypadku zabytkowych konstrukcji stosowanie takich samych wiertel o znacznej średnicy nie może być zaakceptowane. Należy zastosować znacznie mniejsze wiertła o średnicy kilku milimetrów, co pozwoli na pobranie niewielkiej porcji materiału konstrukcji pozostawiając otwór spełniający te same zadania funkcjonalne jak otwór do montażu czujnika wiercony tradycyjnie. Takie mikrordzenie wywiercone z piaskowca i cegły pokazane są na Fig. 1 wraz z rdzeniem skalnym z kopalni pokazanym dla porównania.

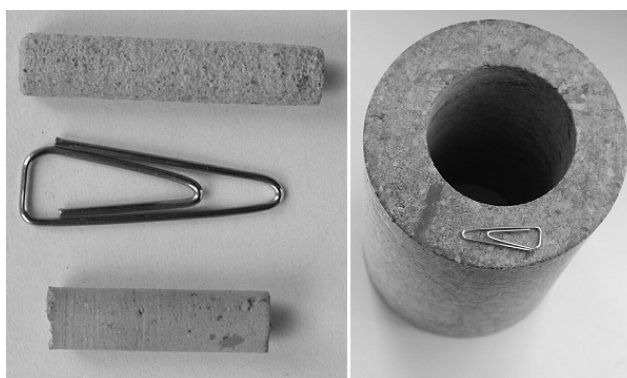


Fig. 1. Mikrordzenie pobrane z piaskowca i cegły oraz rdzeń skalny z kopalni.

Zamiast zniszczyć cenny materiał przy okazji zakładania instalacji lub czujnika, możliwe jest wykorzystanie pobranych mikrordzeni do laboratoryjnych badań własności mechanicznych materiałów konstrukcji, a następnie również do analiz fizyko-chemicznych.

Najważniejsze do wykonania pomiary obejmują pomiar stałych sprężystości i wytrzymałości na ściskanie. Jednak spektrum możliwych pomiarów jest znacznie szersze jeśli tylko zostanie zachowana właściwa staranność podczas planowania badań. W dalszej części raportu przedstawiono proponowane badanie historycznych materiałów konstrukcyjnych pobranych jako mikrordzenie z zabytkowych budowli.

PRZYKŁADOWE PROCEDURY POBIERANIA I BADANIA MIKRORDZENI

Jako pierwszy sposób rozważmy proste wiercenie rdzeniowe pokazane na Fig. 2. Wiercenie małym wiertłem rurowym rozpoczynamy od powierzchni zabytkowego materiału i wiercimy tak głęboko, aby otrzymać rdzeń o żądanej smukłości. Wiercenie długich mikrordzeni, pokazanych na Fig. 1, jest operacją powolną i trudną w związku z problemem odprowadzenia ciepła i wiórów. Jednak głębokie wiercenie otwiera szczególną perspektywę badawczą, albowiem długie

mikrordzenie o smukłości około 3 mogą znaleźć zastosowanie w badaniach wytrzymałości na zginanie oraz do analizy morfologicznej materiału.

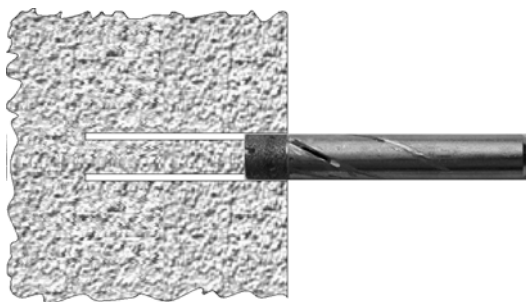


Fig. 2. Schemat wiercenia mikrordzeni.

Najczęściej jednak wystarcza głębokość wiercenia nie przekraczająca 10 mm z uwagi na niewielką średnicę mikrordzeni, wynoszącą zazwyczaj od 6 do 8 mm. Podyktowane jest to potrzebą zachowania niewielkiej smukłości próbek dobranej odpowiednio dla potrzeb przeprowadzenia prób wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz trudnościami w uzyskaniu długich mikrordzeni.

Krótkie mikrordzenie można wykorzystać do pomiaru prędkości propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej, gęstości materiału, wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie lub próby ściskania wzdłuż średnicy (tzw. próby brazylijskiej) dla oceny wytrzymałości na rozciąganie

Takie same badania można wykonać używając krótkich mikrordzeni pobieranych z głębi ściany budowli. W takim przypadku pierwszą fazę wiercenia należy wykonać zwykłym wiertłem do żądanej głębokości d_1 , a następnie, jak to pokazano na Fig. 3, należy pogłębić otwór wiertłem rurowym uzyskując w ten sposób rdzeń o długości d_2-d_1 z głębszej warstwy materiału. Dalsze wiercenie dla uzyskania otworu odpowiedniego dla celów montażowych wykonywane jest ponownie zwykłym wiertłem.

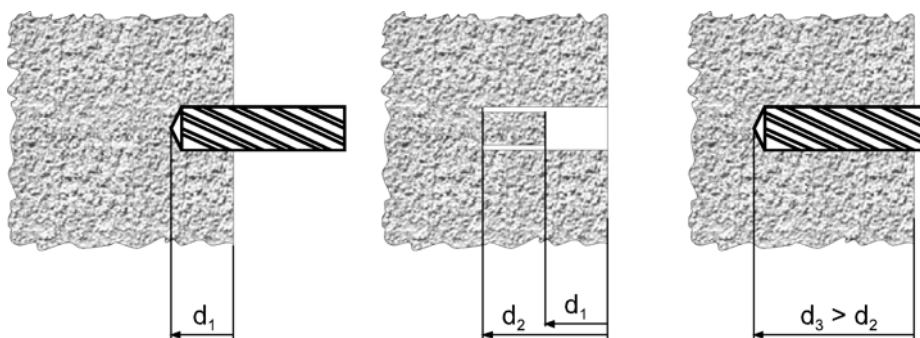


Fig. 3. Sposób pobierania rdzeni z głębi materiału.

Dla zilustrowania możliwości badań mikrordzeni pokazano przykłady zastosowania metod wizji komputerowej i pomiarów ultradźwiękowych.

Aparatura do prostych badań morfologicznych mikrordzeni składa się z kamery CCD, obrotowego stolika do mocowania próbek napędzanego silnikiem krokowym, sterownika silnika i komputera. Obraz bocznej powierzchni mikrordzenia rejestrowany jest w każdym z N położenia kątowych stolika. W przypadku przedstawianych niżej obrazów było to $N = 200$ położenia. Jeden z zarejestrowanych obrazów pokazano na Fig. 4.



Fig. 4. Mikrordzeń na obrotowym stoliku napędzanym silnikiem krokowym (wstępna wersja).

Opracowane urządzenie pomiarowe dostarcza analogicznych informacji do badań boroskopowych i jest wiele razy tańsze od handlowych boroskopów [6], zwłaszcza w przypadku rejestracji obrazów kolorowych. Różnica wyników możliwych do uzyskania obydwoma metodami polega na znacznie większej rozdzielczości proponowanej metody i na tym, że obrazy boroskopowe ukazują boczną powierzchnię otworu pozostałego po wyjęciu rdzenia, a proponowana metoda pokazuje powierzchnię boczną rdzenia. Tak więc obraz z boroskopu i obraz bocznej powierzchni mikrordzenia przedstawiają nieco różne fragmenty materiału, odległe od siebie o grubość ścianki wiertła rurowego wynoszącą mniej niż 1 milimetr. Jednakże dla otworów o większej głębokości inspekcja przy użyciu boroskopów lub wywiercenie rdzeni o dużych średnicach wydaje się być jedynym rozwiązaniem.

Przykładowy obraz bocznej powierzchni rdzenia pokazany jest na Fig. 5 dla mikrordzenia o średnicy $D=6.4$ mm wywierconego z cegły.

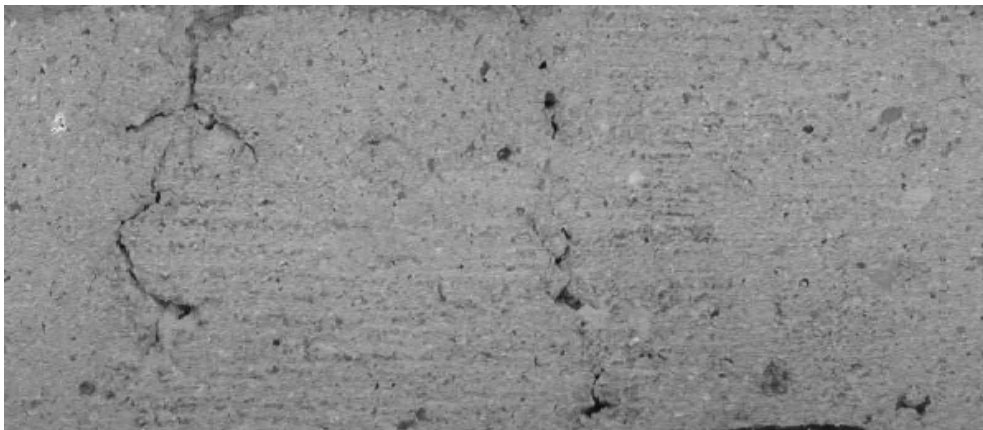


Fig. 5. Obraz rozwiniętej bocznej powierzchni ceglanego mikrordzenia.
Oryginalna rozdzielczość obrazu 1 piksel = 20 mikrometrów.

Jeśli położenie wierconych otworów nie jest podyktowane względami technicznymi jak np. montowaniem czujników, to mikrordzenie można wiercić w bliskiej odległości od siebie jak to pokazano na Fig. 6.

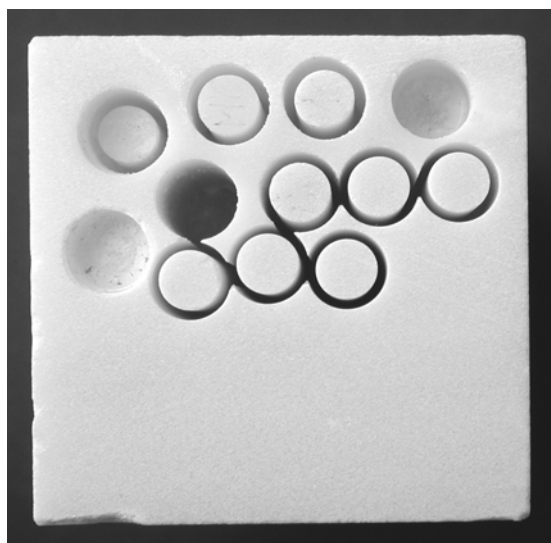


Fig. 6. Mikrordzenie w próbce marmuru.
Wymiary poprzeczne próbki 50 mm x 50 mm.

Na rysunku Fig. 7 przedstawiono przykładowy sposób pomiaru prędkości fali podłużnej w mikrordzeniu o długości 25.8 mm z marmuru Cervaiolle. Użyto głowic ultradźwiękowych o częstotliwości 2 MHz. Głowice dociskane są do próbki poprzez warstwy sprzęgające. Próbka utrzymywana jest w położeniu pomiarowym bez

podpierania, jedynie dzięki siłom tarcia. Zmierzona prędkość fali podłużnej wynosi 5290 m/s. Jest ona zgodna z danymi dla tego materiału uzyskanymi na większych próbkach o wymiarach 100 mm x 50 mm x 50 mm. Prędkość ta zmierzona w Building Research Establishment (UK) w ramach Projektu UE „MCDUR” [7] wynosi 4990-5380 m/s.

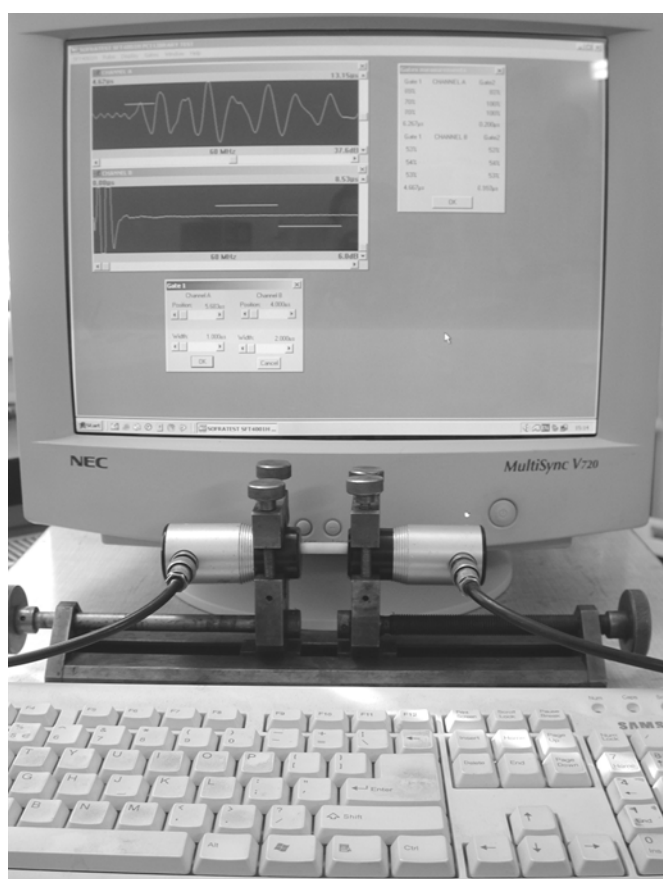


Fig. 7. Pomiar fali podłużnej w mikrordzeniu marmuru Cervaiolle (współpraca P. Gutkiewicz).

ZARYS PROCEDURY „DOBREJ PRAKTYKI” BADANIA ZABYTKÓW HISTORYCZNYCH

Ponieważ otwory w konstrukcjach historycznych wiercone są bardzo często, to zmiana sposobu wiercenia na mikrordzeniowe umożliwia świadome gromadzenie i przechowywanie pobranych próbek jako elementu dokumentacji konserwatorskiej zabytku. Rdzenie te mogłyby być w każdym momencie wykorzystane do badań w

razie zaistnienia takiej potrzeby. Tak więc pomimo tego, że sam proces wiercenia jest metodą niszczącą, to przyjęcie jako generalnej zasady wiercenia mikrordzeniowego nie powoduje żadnych dodatkowych zniszczeń w konstrukcji - może więc być w praktyce badaniem nieniszczącym. Mając na uwadze tą zaletę opracowano sekwencję kroków badawczych służących uzyskaniu maksimum wiedzy na podstawie badania mikrordzenia. Taka sekwencja pomiarów - nieniszczących dodatkowo zabytku - stanowi jedną z najlepszych obecnie możliwych praktyk badawczych. Kolejne dziesięć kroków tej „dobrej praktyki”, nazwanej kompaktowym testem diagnostycznym (CoDiT, od Compact Diagnostic Test) jest następujące:

- Krok 1. Narysować linię, aby trwale zaznaczyć płaszczyznę pionową prostopadłą do osi przyszłego otworu.
- Krok 2. Zmierzyć prędkość propagacji fali powierzchniowej (Rayleigha) wzdłuż zaznaczonej linii i prostopadle do niej [8].
- Krok 3. Wywiercić otwór wiertłem rurowym, jednocześnie mierząc ewentualnie opór wiercenia (DRMS) [4], najlepiej podczas prowadzenia prac montażowych i pobrać mikrordzeń.
- Krok 4. Wyrównać podstawę rdzenia powstałą po jego odłamaniu i skopiować na niej oznaczenie płaszczyzny pionowej narysowane w Kroku 1.
- Krok 5. Zmierzyć i zważyć rdzeń.
- Krok 6. Zarejestrować obraz bocznej powierzchni rdzenia i przeanalizować występowanie mikropęknięć, porów i niejednorodności materiału.
- Krok 7. Zmierzyć prędkość propagacji fali podłużnej wzdłuż rdzenia.
- Krok 8. Wykonać próbę trójpunktowego zginania rdzenia siłami działającymi w płaszczyźnie oznaczonej jako „pionowa”. W rezultacie powstaną dwa pół-rdzenie.
- Krok 9. Wykonać próbę ściskania jednej z połówek mikrordzenia (por. Krok 8).
- Krok 10. Wykonać próbę brazylijską na drugiej z połówek mikrordzenia ściskając ją wzdłuż średnicy zaznaczonej początkowo jako pionowa (por. Krok 1 i Krok 8).

Badania niszczące z Kroków 9 i 10 mogą być modyfikowane zależnie od potrzeb. Jest to szczególnie zalecane, gdy liczba mikrordzeni dostępnych do badań jest większa niż potrzebna do wykonania pomiarów podstawowych. Wtedy szczególnie interesujące mogą być:

- badania ściskania jednej połowy mikrordzenia przy obciążeniach cyklicznych oraz
- próba pełzania wykonana na drugiej jego połowie.

Proponowany kompaktowy test diagnostyczny CoDiT nie jest ujęty w normach badania wytrzymałości materiałów skalnych ani budowlanych i tym samym w fazie jego dalszego opracowywania wymagać będzie przeprowadzenia badań porównawczych powszechnie uznanymi metodami na próbkach o ogólnie stosowanych wymiarach.

PODSUMOWANIE

Naszkieowana powyżej „dobra praktyka” badań wymaga jeszcze wielu prac pomiarowych i skorelowania uzyskanych wyników z wynikami innych metod zanim będzie mogła być uznana za w pełni dojrzałą metodę badawczą. Jednak już obecnie można oczekiwać, że metoda CoDiT powinna umożliwić ocenę takich własności mechanicznych zabytkowego materiału jak: prędkość propagacji fali podłużnej i powierzchniowej, moduł Younga, wytrzymałość na rozciąganie, zginanie i ściskanie, gęstość materiału, kohezja i ewentualne dane statystyczne dotyczące jego wewnętrznej struktury.

Wszystkie te dane mogą być uzyskane bez dodatkowej ingerencji w zabytkową substancję konstrukcji dzięki metodzie CoDiT zastosowanej przy okazji prac montażowych powszechnie wykonywanych w zabytkach. Tak więc, „dobra praktyka” według metody CoDiT może być w rzeczywistości bardzo często metodą nieniszczących badań zabytkowych konstrukcji.

Podjęto badania pilotażowe na mikrordzeniach pobranych z marmurów pochodzących ze złóż kararyjskich. Są to mikrordzenie z marmuru Gioia i marmuru Cervaiolle, dla których w Projekcie „MCDUR” [7] zmierzone zostały podstawowe wielkości mechaniczne, takie jak prędkość fali podłużnej i prędkość fali powierzchniowej, wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie i moduł sprężystości.

LITERATURA

- 1 Macchi G., General Metodology. The Combined Use of Experimental and Numerical Techniques Inside a Single Study. In: P. Roca (ed.), *Structural Analysis of Historical Constructions*, Barcelona, Spain, Nov. 8-10, 1995, 1-14, CIMNE Barcelona.
- 2 Nappi A., Non-Destructive Techniques and System Identification Applied to Historical Constructions. In: P. Roca, J.L. González, E. Oñate, P.B. Lourenço, *Structural Analysis of Historical Constructions II*, Barcelona, Spain, Nov. 4-6, 1998, 125-147, CIMNE Barcelona.
- 3 Rossi P.P., Rossi C., Surveillance and Monitoring of Ancient Structures: Recent Developments. In: P. Roca, J.L. González, E. Oñate, P.B. Lourenço, *Structural Analysis of Historical Constructions II*, Barcelona, Spain, Nov. 4-6, 1998, 163-178, CIMNE Barcelona.
- 4 Delgado Rodrigues J., Costa D., (2004). A New Method for Data Correlation in Drill Resistance, Test for the Effect of Drill Bit Wear. *International Journal for Restoration – Internazionale Zeitschrift für Bauinstandsetzen*, 10(3), pp. 1—18.
- 5 Dreyer W., The Strength Properties of Rocks, *Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 1, No. 2*, Trans Tech Publications, 1973 (2nd ed.).
- 6 <http://www.uxr.com/borescopes.asp>
- 7 Effect of the weathering on stone materials: assessment of their mechanical durability, *EU Research Project G6RD-CT2000-00266, and NAS Integration Project: Acoutherm (GRD3-2001-60001)*, (<http://www.icvbc.cnr.it/mcdur/>)
- 8 Skłodowski M., (2005). Application of ultrasonic Rayleigh wave to testing of masonry materials. In: Modena, Lourenço & Roca (eds.), *Structural Analysis of Historical Constructions* (pp.395-400), London, Taylor & Francis Group.