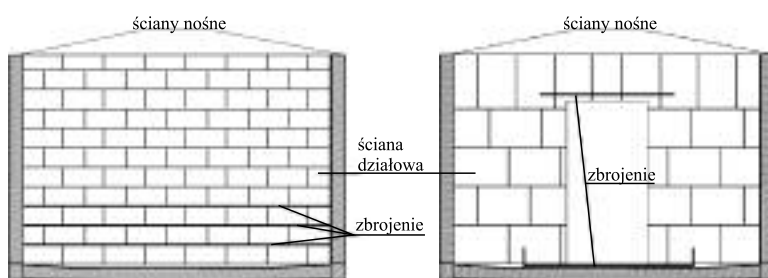


działowe wymagają specjalnego wykonania i wzmocnienia miejsc najbardziej wrażliwych na pękanie, czyli ich dolnej strefy oraz miejsc powyżej otworów drzwiowych i okiennych. Wzmocnienie można wykonać za pomocą zbrojenia układanego w dolnej części ściany pełnej oraz poniżej i powyżej otworów (rysunek 6). Drugim koniecznym warunkiem jest wykonanie warstwy poślizgowej na dolnym stropie (minimum 2 warstwy papy lub przekładka elastyczna z filcu), a trzecim warunkiem – niedopuszczenie do tego, aby strop górny opierał się na ścianie. Można to zapewnić przez właściwą organizację pracy – przegrody działkowe powinny być murywane, począwszy od najwyższej kondygnacji ku dołowi. W przypadku, gdy ściany są lekkie, a podłogi ciężkie, może to być niewystarczające. Warunek ten należy wspomóc szczeliną między ścianą a stropem o takiej szerokości, aby strop po ugięciu całkowitym nie opierał się na ścianie. Szerokość szczeliny zależy w znacznym stopniu od długości stropu i może wynosić nawet 4 cm. Należy ją wypełnić materia-



Rys. 6. Sposoby wzmocnienia ścian działowych bez i z otworem drzwiowym
Fig. 6. Methods of reinforcement of partition walls without and with door opening

łem łatwo odkształcalnym (wełna mineralna, pianka poliuretanowa).

Literatura

- [1] Beeby A. W., Narayanan R. S.: Designer handbook to Eurocode 2. Part 1.1: Design of concrete structures. Thomas Telford House, London, 1995.
- [2] Деркач В.Н. Исследования напряженно-деформированного состояния каменных перегородок при прогибе перекрытия// Промышленное и гражданское строительство. №6.-2013.-С.62-66.
- [3] Drobiec Ł., Kubica J.: Zapobieganie zarysowaniu ścian murowych opartych na stropach żelbetowych. Materiały Budowlane 4 (2006) 21 – 23.

[4] Stawiski B.: Konstrukcje murowe. Naprawy i wzmocnienia. Polcen, Warszawa, 2014.

[5] Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2002 r. nr 75, poz. 690 z późniejszymi zmianami).

[6] Hillerborg A., Modeer M., P. E. and Petersson: Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, Cement and Concrete Research 6 (1976) 773 – 782.

[7] PN-B-03002: 2007 Konstrukcje murowe. Projektowanie i obliczanie.

[8] Brameshuber W., Beer I., Kang B.: Untersuchungen zur Vermeidung von Rißschäden bei nicht tragenden Trennwänden. Mauerwerk 11 (2007) 54.

Przyjęto do druku: 04.09.2015 r.

dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz¹⁾

mgr inż. Dorota Jawor¹⁾

mgr inż. Łukasz Radzik^{1)*}

Analiza nieniszczących metod akustycznych do badania remontowanych konstrukcji betonowych

Analysis of NDT acoustic methods for repairing concrete structures

DOI: 10.15199/33.2015.11.31

(Artykuł przeglądowy)

Streszczenie. W artykule omówiono nieniszczące metody akustyczne przydatne w badaniach konstrukcji betonowych. Zostały one przeanalizowane pod kątem wykorzystania podczas remontu obiektu budowlanego. Zgodnie z ustalonymi kryteriami dokonano oceny każdej metody, porównano je ze sobą i na podstawie przeprowadzonej analizy wytypowano „najlepszą” nieniszczącą metodę akustyczną – metodę tomografii ultradźwiękowej – do badania konstrukcji betonowych na potrzeby remontów.

Słowa kluczowe: remont, badania nieniszczące, metody akustyczne, tomografia ultradźwiękowa.

Abstract. The article discusses the non-destructive acoustic method of concrete structures. They were analyzed for use on the construction site during the renovation of a building. According to the established criteria evaluation is made by each method, they were compare and based on the analysis „the best” non-destructive acoustic method – ultrasonic tomography was chosen as a method for testing repairing concrete structures.

Keywords: repair, non-destructive testing, acoustic methods, ultrasonic tomography.

W celu oceny konieczności i zakresu remontu mogą być przydatne metody nieniszczące [3, 4], a wśród nich metody akustyczne. Niektóre z nich opisano w [1, 2, 6], natomiast ich podłoże teore-

tyczne i zastosowanie praktyczne w [3 – 5]. W artykule zaprezentowano pięć wybranych współczesnych metod akustycznych i określono ich przydatność do badania remontowanych konstrukcji betonowych. Pokróctce przedstawiono te metody, a następnie porównano je w ramach założonych kryteriów. Analiza została przeprowadzona celem uła-

twienia wyboru danej metody akustycznej podczas remontu konstrukcji betonowych.

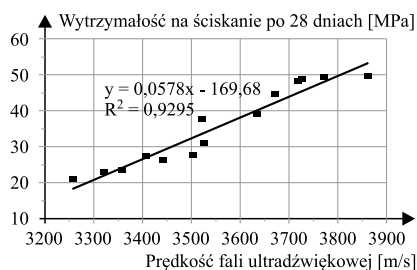
Opis metod

Metoda ultradźwiękowa (metoda przepuszczania i metoda powierzchniowa) polega na pomiarze czasu rozchodzenia się fali podłużnej w osrodku. Zestaw badawczy

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

* Autor do korespondencji:
e-mail: lukasz.radzik@pwr.edu.pl

składa się z miernika oraz z dwóch przetworników: nadajnika i odbiornika. Nadajnik wysyła sygnał – falę podłużną – która propaguje się przez badany element betonowy i jest odbierana w odległości L , przez odbiornik. Głowicami punktowymi może być wzbudzana fala powierzchniowa. Aparatura przetwarza otrzymany sygnał i uzyskuje się czas przejścia sygnału t . Znając odległość L oraz czas przejścia t , można obliczyć prędkość rozchodzenia się fali c w betonie. Przykładowe wyniki badania metodą ultradźwiękową przedstawiono na rysunku 1. W przypadku zastosowania głowicy walcowej konieczne jest użycie środka sprzęgającego pomiędzy przetwornikiem a badaną powierzchnią, w celu zapewnienia należytej transmisji ultradźwięków, natomiast głowic punktowych – nie ma takiej potrzeby [9].

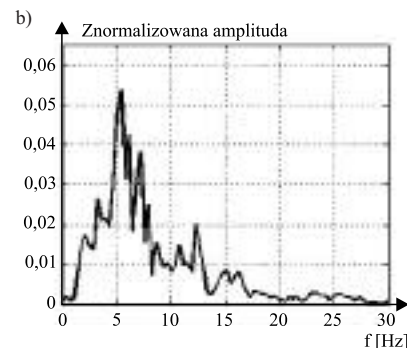
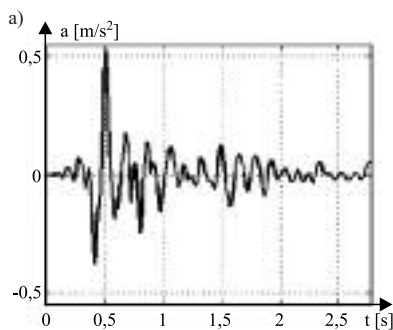


Rys. 1. Przykładowe wyniki zależności korelacyjnej prędkości fali ultradźwiękowej i wytrzymałości na ściskanie

Fig. 1. Exemplary result of relation between ultrasound wave velocity and compressive strength

Metoda odpowiedzi na impuls (ang. *Impulse Response*) wykorzystuje mechaniczny impuls wytworzony za pomocą młotka gumowego jako źródła fal sprężystych rozchodzących się w badanym elemencie. Uderzenie wprowadza element w vibrację, podczas gdy specjalny przetwornik (geofon) znajdujący się w pobliżu miejsca uderzenia mierzy amplitudę drgań. Młotek oraz przetwornik zwykle podłączone są do komputera wyposażonego w specjalne oprogramowanie, które zbiera, przechowuje i przetwarza sygnały. Przykładowe wyniki badań pokazano na rysunku 2. Metoda *Impulse Response* używana jest głównie w defektoskopii, celem zlokalizowania uszkodzonych stref konstrukcji betonowej. Zaleca się weryfikację badania za pomocą innej metody.

Ultradźwiękowa metoda echa (ang. *Ultrasonic Echo*), zwana metodą *pulse echo*, mierzy czas przejścia fal sprężystych, które ulegają odbiciu od wady lub powierzchni ograniczających wewnątrz elementu [8].

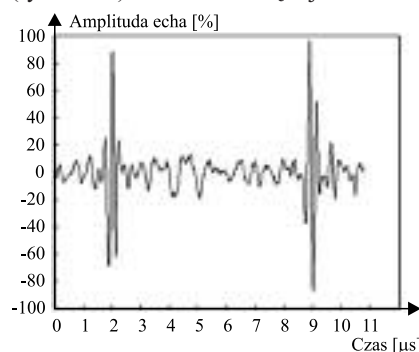


Rys. 2. Metoda odpowiedzi na impuls: a) przyspieszenie przemieszczeń w funkcji czasu; b) wykres dynamiki drgań, wygenerowany za pomocą oprogramowania [1]

Fig. 2. *Impulse Response method: a) acceleration movement as a function of time; b) chart the dynamics of the vibration generated by the software [1]*

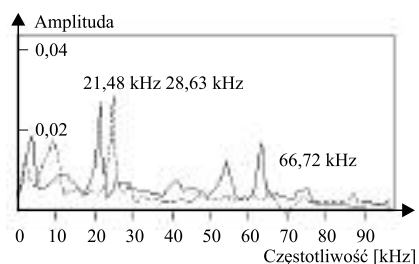
Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki badania. Dużą zaletą tej metody jest możliwość badania konstrukcji w przypadku dostępu tylko z jednej strony (powierzchni) próbki betonowej.

Metoda młoteczkowa (ang. *Impact Echo*) wykorzystuje zjawisko propagacji fal mechanicznych wzbudzanych uderzeniem metalowej kulki w powierzchnię badanego obiektu [3]. Energia rozchodzi się przestrzennie w postaci fal mechanicznych (rysunek 4). Odbite fale są rejestrowane



Rys. 3. Ultradźwiękowa metoda echa: przykładowe wyniki w postaci wykresu intensywności odbicia fali w funkcji czasu [3]

Fig. 3. *Ultrasonic echo method: exemplary result as a chart of frequency in time domain [3]*



Rys. 4. Metoda młoteczkowa: przykładowe wyniki w postaci wykresu transformowanej amplitudy w dziedzinie częstotliwości [3]

Fig. 4. *Impact Echo method: exemplary results presented as a chart of amplitude in frequency domain [3]*

za pomocą piezoelektrycznego przetwornika drgań. Zestaw pomiarowy składa się z kompletu młoteczków – stalowych kulek różnej średnicy (impaktory) oraz komputera z zainstalowanym oprogramowaniem do przetwarzania danych.

Metoda tomografii ultradźwiękowej bazuje na propagacji fali sprężystej w badanym ośrodku. Źródłem wzbudzenia jest zwykle antena wielogłowicowa składająca się z 48 przetworników, która odbiera i przetwarza sygnały ultradźwiękowe. Najbardziej popularnym algorytmem wykorzystywanym do sporządzania obrazów ultradźwiękowych jest algorytm SAFT [6, 7] opierający się na superpozycji mierzonych sygnałów, nakładaniu pikseli i ich rekonstrukcji. Przykładowe wyniki badań metodą tomografii ultradźwiękowej pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Metoda tomografii ultradźwiękowej: przykładowe wyniki w postaci skanu B (przekrój poprzeczny próbki) [4]

Fig. 5. *Ultrasonic tomography: exemplary scan B (cross-section) [4]*

Porównanie metod i ich analiza

W celu dokonania oceny metod akustycznych przydatnych do badania remontowanych konstrukcji betonowych, zaproponowano następujące kryteria umożliwiające ich porównanie: komfort użycia

Tabela 1. Porównanie metod pod względem wybranych pięciu kryteriów

Table 1. Comparison of acoustic methods

Metoda	Komfort użycia zestawu badawczego	Różnorodność zastosowania	Zakres częstotliwości pracy i głębokości pomiaru	Sposób prezentacji wyników	Wady metody
Metoda ultradźwiękowa (głowice walcowe, głowice punktowe)	potrzebny środek sprzęgający przy głowicach walcowych; małe i lekkie urządzenie, prosty sposób przeprowadzania badania	ocena: wytrzymałości betonu, modułu sprężystości, jednorodności, detekcja rys i ubytków, głębokości rys, kontrola jakości betonu	głowice: a) walcowe: 25 – 100 kHz 50 – 3000 mm b) punktowe 40 – 100 kHz	wyświetlenie czasu przejścia na ekranie miernika	wpływ właściwości betonu na wynik, problematyczna interpretacja wyników, w przypadku głowic punktowych krótki zasięg pomiaru
Metoda odpowiedzi na impuls	badanie dużych powierzchni w krótkim czasie; powierzchnia w dowolnym stanie wilgotności	ocena: jednorodności betonu; lokalizacja stref podejrzanych o występowanie defektów	0 – 800 kHz 100 – 500 mm	wykresy amplitudy w funkcji częstotliwości, parametry charakterystyczne, mapy rozkładu wartości charakterystycznych	problematyczna interpretacja wyników; nie daje żadnych informacji o głębokości wykrytych defektów, niska dokładność
Metoda echa	natychmiastowe rezultaty; wystarczający jednostronny dostęp do przeprowadzenia badania; małe urządzenia	pomiar grubości konstrukcji; wykrywanie wtrąceń, raków, porów, rozsegregowania betonu, rys i innych defektów	20 – 300 kHz 25 – 400 mm	A-skan – punktowy pomiar w funkcji czasu	liniowy defekt zorientowany równoległe do sygnału może zostać niezauważony; problematyczna interpretacja A-skanu
Metoda młoteczkowa	małe i lekkie urządzenie; czasochłonne badanie	wykrywanie defektów: rozwarstwienia, raki, pory, rozsegregowanie kruszywa, rysy, pęknięcia, delaminacje	2 – 40 kHz 10 – 800 mm	wykres amplitudy w funkcji częstotliwości	defekty o rozmiarze podobnym lub większym niż długość fali nie są lokalizowane; niezbędne dokładne przygotowanie powierzchni
Metoda tomografii ultradźwiękowej	komfort użycia, czasochłonne badanie	detekcja defektów, pomiar grubości obiektu przy dostępie jednostronnym	50 – 200 kHz 25 – 2500 mm	przejrzyste wizualizacje: widok z góry, przekrój poprzeczny i podłużny, obraz 3D	tomogramy często muszą być interpretowane z wykorzystaniem dodatkowych informacji

zestawu badawczego; różnorodność zastosowania; zakres częstotliwości pracy i głębokości pomiaru; sposób prezentacji wyników; wady metody: cena zestawu badawczego. Porównanie metod pod względem wybranych pięciu kryteriów przedstawiono w tabeli 1. W każdej kategorii przyznano punkty w sześciostopniowej skali oceny. Większa liczba punktów oznacza lepszy wynik. Ceny zestawów badawczych oceniono na podstawie własnych doświadczeń. Przyjęto, że im tańszy zestaw badawczy, tym większa liczba punktów. Zestawienie punktacji metod podano w tabeli 2.

Wnioski

Z przeprowadzonej analizy wynika, że „najlepszą” nieniszczącą metodą akustyczną badania na budowie remontowanych konstrukcji betonowych jest metoda tomografii ultradźwiękowej. Wymaga ona użycia jednego z najdroższych zestawów badawczych, ale w zamian otrzymuje się bardzo przejrzysty sposób prezentacji wyników. Co więcej, metoda ta ma największy zasięg pomiaru, a dokładna lokalizacja różnego rodzaju defektów czyni ją bardzo wszechstronną. Jej główną zaletą jest prostota przeprowadzania badania i lekki zestaw pomiarowy. Możliwość różnego zastosowania wiąże się z koniecznością posiadania odpowied-

Tabela 2. Zestawienie punktacji metod

Table 2. Evaluation of acoustic methods

Charakterystyka	Metoda				
	ultradźwiękowa	odpowiedzi na impuls	echa	młoteczkowa	tomografii ultradźwiękowej
Komfort użycia zestawu badawczego	4	4	5	3	5
Różnorodność zastosowania	3	2	2	3	5
Zakres częstotliwości pracy oraz głębokości pomiaru	2	4	3	5	6
Sposób prezentacji wyników	4	3	3	4	6
Wady metody	4	3	4	3	4
Cena zestawu badawczego	6	3	5	3	2
SUMA PUNKTÓW	23	19	22	21	28

niej wiedzy (literatura naukowa, doświadczeni pracownicy) niezbędnej w celu interpretacji wyników.

Literatura

[1] Malhotra V. M., Carino N. J., Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. CRC Press, 2004.
 [2] Breyse D., Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-of-

-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207-INR. Springer Science & Business Media, 2012.

[3] Drobiec L., Jasiński J., Piekarczyk A. „Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych – metoda młoteczkowa. Cz. 2”, Przegląd Budowlany, t. 78, s. 37 – 42, 2007.

[4] Hoła J., Schabowicz K., „State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends”, Arch. Civ. Mech. Eng., t. 10, nr 3, s. 5 – 18, 2010.

[5] Schabowicz K., „Methodology for Non-Destructive Identification of Thickness of Unilaterally Accessible Concrete Elements by Means of State-of-the-Art Acoustic Techniques”, J. Civ. Eng. Manag., t. 19, nr 3, s. 325 – 334, 2013.

[6] Flohrer C., „2 – Non-destructive testing methods for building diagnosis – state of the art and future trends”, w Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures, t. 2, C. Maierhofer, H.-W. Reinhardt, i G. Dobmann, Red. Woodhead Publishing, 2010, s. 14 – 29.

[7] Schabowicz K., Suworov V. A., „Nondestructive testing of a bottom surface and construction of its profile by ultrasonic tomography”, Russ. J. Nondestruct. Test., t. 50, nr 2, s. 109 – 119, 2014.

[8] „CMH Ltd – Distributors of Testing Equipment and Labware.” [Online]. Dostępne na: <http://www.cmhtest.co.uk/>. [Udostępniono: 15-sie-2015].

[9] Stawiski B., „Ultradźwiękowe badania betonów i zapraw głowicami punktowymi”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2009.

Przyjęto do druku: 03.09.2015 r.