

Tomasz Gorzelańczyk*, Tomasz Łakomy, Krzysztof Schabowicz

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Budownictwa Ogólnego,
Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Wykorzystanie metod nieniszczących do lokalizacji i identyfikacji wad betonu w obiektach inżynierskich w ciągu nowobudowanego odcinka drogi ekspresowej

The use of non-destructive methods for locating and identifying concrete defects in engineering structures along a newly constructed section of the expressway

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań lokalizacji i identyfikacji wad elementów betonowych obiektów inżynierskich wykonanych w ciągu nowobudowanego odcinka drogi ekspresowej. W badaniach wykorzystano metody nieniszczące, tj. metodę IR (ang. impulse-response) oraz metodę tomografii ultradźwiękowej. W pracy przedstawiono rezultaty badań dla jednego wybranego przez autorów korpusu przyczółku. Badania potwierdziły skuteczność użytych metod. Zlokalizowano i opisano obecność pojedynczych anomalii, które zostały zinterpretowane jako raki, czyli drobne pustki powietrzne w betonie, wynikające z niedostatecznego zagęszczenia.

Słowa kluczowe: beton; obiekty inżynierskie; wady; metody nieniszczące; metoda impulse-response; metoda tomografii ultradźwiękowej.

ABSTRACT

The article presents the results of research on the location and identification of defects in concrete elements of engineering structures constructed along a newly constructed section of an expressway. The research used non-destructive methods, i.e. the IR (impulse-response) method and the ultrasonic tomography method. The paper presents the results of research for one abutment body selected by the authors. The research confirmed the effectiveness of the methods used. The presence of individual anomalies was located and described, which were interpreted as cancers, i.e. small air voids in concrete resulting from insufficient compaction.

Keywords: concrete; engineering objects; defects; non-destructive methods; impulse-response method; ultrasonic tomography method.

1. Wstęp

Współczesna inżynieria drogowa opiera się w dużej mierze na masowych konstrukcjach żelbetowych, takich jak filary i przyczółki wiaduktów. Z uwagi na ich znaczenie nośne oraz eksponowane warunki pracy (narażenie na wodę, zmienne temperatury, ruchy gruntu i oddziaływanie soli odladzających), ich jakość wykonania musi spełniać wysokie standardy. Jednym z najczęstszych defektów technologicznych pogarszających jakość i trwałość takich obiektów są raki w betonie – lokalne ubytki powietrzne i puste przestrzenie. Powstają w wyniku niejednorodności mieszanki, niewłaściwego układania lub zagęszczania betonu.

Z literatury wynika, że do lokalizacji i identyfikacji takich wad w betonowych elementach, szczególnie dostępnych jednostronnie, predysponowane są metody nieniszczące. Przydatne mogą być do tego celu najnowsze nieniszczące

metody akustyczne, na przykład impulse response [1] i tomografia ultradźwiękowa [2, 3], które obecnie coraz powszechniej stosowane w diagnostyce masowych konstrukcji wykonanych z betonu [4–8]. O przydatności metody tomografii ultradźwiękowej do identyfikacji wad i rys w dostępnych jednostronnie elementach wykonanych z betonu zapewniają autorzy pracy [6–9]. Z kolei autorzy pracy [10] polecają do tego celu metodę impulse response.

Na podstawie własnych doświadczeń autorzy uważają, że nieniszczące metody akustyczne, impulse response i tomografii ultradźwiękowej, zastosowane kompleksowo uzupełniają się.

2. Opis metod i aparatury wykorzystanej w badaniach

Istotą metody impulse response jest pomiar parametrów charakteryzujących reakcję sprężystą badanego betonu na działanie krótkotrwałego mechanicznego impulsu, który

*Autor korespondencyjny.

E-mail: tomasz.gorzelanzyk@pwr.edu.pl

wywołuje w nim chwilowe vibracje. Impuls ten jest wzbudzany za pomocą punktowego uderzenia w badaną powierzchnię specjalnie oprzyrządowanym młotkiem pomiarowym, który posiada wbudowaną głowicę umożliwiającą rejestrację wielkości siły uderzenia w funkcji czasu. W skład zestawu pomiarowego wchodzi także szerokopasmowy czujnik przemieszczeń (geofon), umożliwiający rejestrację w funkcji czasu amplitudy drgań wzbudzonej powierzchni betonu (prędkości rejestrowanych drgań). Obie wielkości są przekształcane za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (FFT), która pozwala na wyrażenie rejestrowanych przebiegów czasowych w funkcji częstotliwości. Jako podstawowy parametr oceny przyjmuje się tak zwaną „Dynamic Mobility” lub w skrócie „Mobility” (zmiennosc dynamiki drgań), która jest definiowana jako stosunek prędkości drgań do wartości siły, która je wywołała.

Metoda tomografii ultradźwiękowej bazuje na wzbudzeniu fali sprężystej w badanym elemencie. Wzbudnikiem jest wielogłowicowa antena, posiadająca wbudowanych kilkadziesiąt zintegrowanych głowic ultradźwiękowych, która służy również do odbierania i przetwarzania sygnałów ultradźwiękowych. Głowice generują impulsy ultradźwiękowe o częstotliwości 50 kHz. Maksymalny zasięg, w rozumieniu grubości badanego elementu wynosi 2500 mm. Specjalistyczne oprogramowanie pozwala na odtworzenie obrazu 3D struktury wewnętrznej. Tomograf posiada zintegrowaną głowicę tj. Antena Array, która zawiera 48 elementów (12 bloków z 4 elementów w każdym). Nominalna częstotliwość pracy głowicy to 50 kHz [2,11].

3. Opis badań

Badaniom z wykorzystaniem metod impulse response i tomografii ultradźwiękowej poddano powierzchnię boczną korpusu przyczółku. Widok miejsca pomiarowego pokazano



kolorem niebieskim zaznaczono obszar badania przyrządem impulse response 2m x 2m, kolorem żółtym obszar badania tomografem ultradźwiękowym 1m x 1m

na rys. 1. W przypadku badań z wykorzystaniem metody impulse response przygotowano pole pomiarowe o siatce 7x7 z punktami pomiarowymi co 300 mm. Jeżeli chodzi o badania z wykorzystaniem tomografu ultradźwiękowego, to miejsce pomiarowe miało powierzchnię około 1 m² i wymiary około 1,0 m x 1,0 m. Miejsce to składało się z trzech pionowych pasm, a w każdym paśmie znajdowało się 7 miejsc, w których dokonywano pomiaru tomografem ultradźwiękowym. Łącznie w każdym miejscu pomiarowym wykonano po 21 odczytów.

4. Wyniki badań i ich analiza

4.1 Metoda impulse response

Oceny parametrów pomierzonych w metodzie impulse response dokonano na zasadzie porównawczej tj. poszczególne pomierzone wartości odnoszono do wartości uśrednionych lub do wartości pomierzonych na obszarach bez wad.

W odniesieniu do przedmiotowego przyczółku (konstrukcja masywna), poniższe wartości parametrów mogą wskazywać na występowanie wad w betonie:

- Average Mobility powyżej $15 \div 20 (10^{-7} \text{ m/sN})$,
- Mobility Slop powyżej 4÷6 jedn.

W tabeli 1 zamieszczono rezultaty uzyskane metodą impulse response badanego przyczółku, tj. parametry Average Mobility oraz Mobility Slop. Pokazano także mapy rozkładu wartości tych parametrów na badanej powierzchni.

Analizując rezultaty zamieszczone w tabeli 1 stwierdzono, że parametry Average Mobility i Mobility Slope – wskazujące na możliwość wystąpienia m.in. takich wad jak raki (drobne pustki powietrzne w betonie). Na 49 wykonanych pomiarów, miejsca możliwego wystąpienia tego typu wady stwierdzono jedynie w 3-4 miejscach pomiarowych, które zaznaczono w tabeli 1 kolorem czerwonym i pomarańczowym.



Rys. 1. Widok miejsca pomiarowego - powierzchnia boczna korpusu przyczółku.

Fig. 1. View of the measurement site - side surface of the abutment body.

Tab. 1. Rezultaty badań betonowego przyczółku uzyskane metodą impulse response.

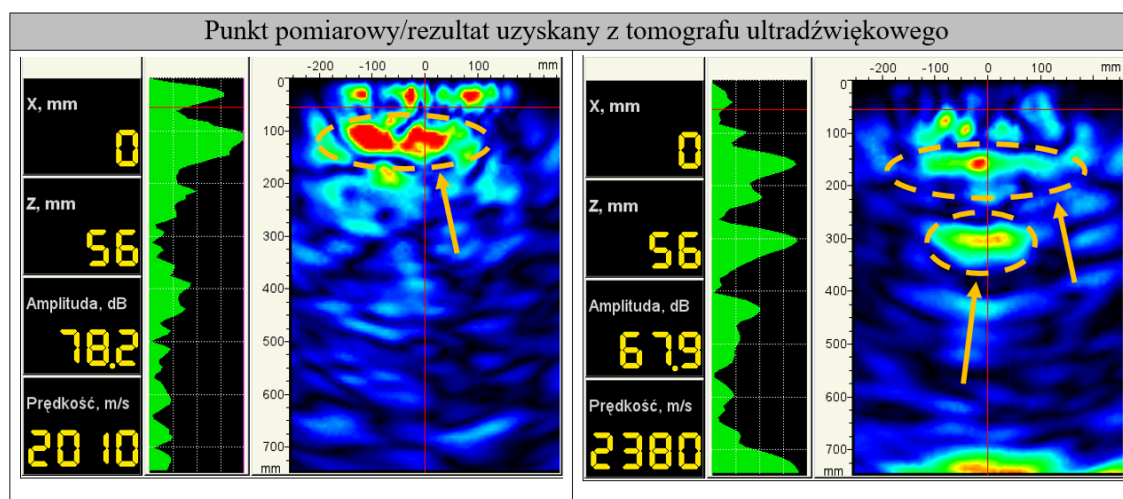
Tab. 1. Concrete abutment test results obtained using the impulse response method.

Average Mobility [m/s.N]		Kolumna						
		1	2	3	4	5	6	7
Wiersz	7	11,9	8,9	9,3	11,1	11,0	10,3	15,1
	6	14,1	8,6	14,3	21,2	29,0	31,2	33,4
	5	9,9	10,0	14,5	15,4	12,7	22,7	21,0
	4	12,6	12,2	12,5	12,8	11,7	12,2	19,6
	3	7,5	10,4	10,0	14,2	12,7	10,5	20,1
	2	11,5	9,7	10,5	8,5	11,2	16,7	17,4
	1	10,5	12,4	9,1	9,7	9,1	12,2	11,9
Mobility Slope [-]		Kolumna						
		1	2	3	4	5	6	7
Wiersz	7	4,1	1,5	1,3	2,5	2,1	0,9	0,8
	6	2,2	2,0	2,2	6,3	5,2	5,4	3,4
	5	1,1	1,6	2,1	2,3	3,0	2,2	3,3
	4	1,5	2,4	2,2	2,4	1,4	2,1	3,3
	3	1,3	3,9	2,0	0,3	1,4	1,4	2,1
	2	2,0	2,0	1,7	2,6	2,6	3,5	2,3
	1	2,0	2,1	2,2	1,2	1,7	1,4	1,2

Legenda:
Kolor czerwony – wartość mierzonego parametru wyraźnie powyżej granicznej wartości akceptowalnej - wysokie prawdopodobieństwo występowania anomalii w betonie,
Kolor pomarańczowy – wartość mierzonego parametru zbliżona do granicznej wartości akceptowalnej - niskie prawdopodobieństwo występowania anomalii w betonie.

Tab. 2. Rezultaty badań betonowego przyczółku uzyskane z wykorzystaniem tomografu ultradźwiękowego.

Tab. 2. Results of tests on a concrete abutment obtained using an ultrasonic tomograph.



4.2 Metoda tomografii ultradźwiękowej

W tabeli 2 zamieszczono rezultaty badań otrzymane z wykorzystaniem tomografu ultradźwiękowego w postaci obrazowań. Z uwagi na ograniczenia objętości publikacji wybrano dwa obrazowania na których przykładowo pokazano występowanie wady.

Na podstawie analizy poszczególnych obrazowań uzyskanych z badań tomografem ultradźwiękowym w miejscu pomiarowym stwierdzono, że w kilku punktach pomiarowych znajdują się wady betonu. Miejsca te zaznaczono kolorem pomarańczowym na obrazowaniach. Wady widoczne są w punkcie

pomiarowym na głębokości około 120 mm (zobrazowanie po lewej stronie w tabeli 2) oraz w na głębokości 150 mm oraz 300 mm (zobrazowanie po prawej stronie w tabeli 2). Analizując zmienność amplitudy fali, nie zauważono znacznej zmiany po głębokości badanego elementu betonowego. Dlatego zauważone wady należy interpretować jako miejsca, w których występują pustki powietrzne związane z niedostatecznym zagęszczeniem mieszanki betonowej podczas betonowania.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone w pracy badania wykazały przydatność użytych metod, tj. impulse response oraz tomografii ultradźwiękowej do lokalizacji i identyfikacji wad betonu w elementach masowych jakim są betonowe przyczółki wiaduktów drogowych. I tak, badania metodą impulse response nie wykazały rozległych i intensywnych wad w betonie, wykazały natomiast obecność pojedynczych anomalii, które można utożsamiać z rakami (drobnymi pustkami powietrznymi w betonie wywołanymi jego niedogęszczeniem) oraz lokalnie obniżoną przyczepnością wykonanych napraw powierzchniowych. Z kolei badania metodą tomografii ultradźwiękowej również nie wykazały istotnych wad betonu oraz potwierdziły występowanie drobnych pustek powietrznych, będących wynikiem niedostatecznego zagęszczenia mieszanki betonowej podczas betonowania. Badania tą metodą pozwoliły ustalić, że zlokalizowane podczas badań pustki powietrzne znajdują się na głębokościach od 120 do 300 mm.

6. Literatura

- [1] ASTM C1740 – 10. 2010. Standard Practice for Evaluating the Condition of Concrete Plates Using the Impulse-Response Method.
- [2] Informacje ze strony internetowej: <https://pcb.com.pl/products/tomograf-ultradzwiekowy-%D0%B01040-mira/> dostęp w dniu 17.06.2025 r.
- [3] Schabowicz, K. (2014). Ultrasonic tomography–The latest nondestructive technique for testing concrete members–Description, test methodology, application example. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(2), 295-303.
- [4] Beutel R.; Reinhardt H.; Grosse C.; Glaubitt A.; Krause M.; Maierhofer C.; Algernon D.; Wiggengerhauser H.; Schickert M. 2008. Comparative performance tests and validation of NDT methods for concrete testing, *Journal of Nondestructive Evaluation* 27 (1-3): 59-65.
- [5] Bungey J., Millard S., Gratham M. Testing of concrete in structures, Taylor & Francis, London, 2006.
- [6] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A. Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych. T. 1, Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 2010.
- [7] Gorzelańczyk T.; Hoła J.; Sadowski Ł.; Schabowicz K. 2013. Methodology of nondestructive identification of defective concrete zones in unilaterally accessible massive members, *Journal of Civil Engineering and Management*, 19:6, 775-786. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2013.812577>
- [8] Schabowicz K.; Modern acoustic techniques for testing concrete structures accessible from one side only, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, DOI: 10.1016/j.acme.2014.10.001
- [9] Krawczyk E., Schabowicz K., Sterniuk A., 219, Przykłady zastosowania metody tomografii ultradźwiękowej w badaniach wtrąceń w elementach betonowych, *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*. 2019, nr 3, s. 15-19.
- [10] Ottosen N.; Ristinmaa M.; Davis A. 2004. Theoretical interpretation of impulse response tests of embedded concrete structures, *Journal of Engineering Mechanics* 130 (9): 1062-1071.
- [11] Informacje ze strony internetowej: <https://acs-international.com/product/a1040-mira/>, dostęp w dniu 17.06.2025 r.