

Ewa Krawczyk, Krzysztof Schabowicz*, Adam Sterniuk
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

Przykłady zastosowania metody tomografii ultradźwiękowej w badaniach wtrąceń w elementach betonowych

Examples of application of ultrasonic tomography method in concrete included in concrete elements

ABSTRACT

This paper presents modern non-destructive methods used to study concrete and reinforced concrete elements. Non-Destructive Testing allow for non-invasive assessment of the condition of the examined element. In addition to estimating the strength parameters, material properties, they also enable the detection of possible discontinuities and hidden watters, as well as inclusions, e.g. improperly spaced reinforcing bars. Attention was paid to the ease of testing, the economics of the solution, and the advantages and limitations associated with the choice of non-destructive method. The most widely described method is ultrasonic tomography. An experiment was carried out consisting of measuring three samples of different geometry and different reflectors. The aim of the study was to determine the location and identification of inclusions, reflectors, air voids and discontinuities located in the samples.

Keywords: *ultrasound tomography; non-destructive testing*

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wykorzystanie współczesnych metod nieniszczących stosowanych do badania elementów betonowych i żelbetonowych. Badania NDT (ang. Non-Destructive Testing) pozwalają na bezinwazyjne ocenie stanu badanego elementu. Poza szacowaniem parametrów wytrzymałościowych, właściwości materiałowych, umożliwiają także detekcję ewentualnych nieciągłości i ukrytych wad, a także wtrąceń, np. niewłaściwie rozmieszczonych prętów zbrojeniowych. Zwrócono uwagę na łatwość wykonania badań, ekonomikę danego rozwiązania oraz zalety i ograniczenia związane z wyborem metody nieniszczącej. Najszerzej opisano metodę tomografii ultradźwiękowej. Na tej podstawie przeprowadzono eksperyment polegający na pomiarze trzech próbek o różnej geometrii i różnych reflektorach. Celem przeprowadzanego badania było ustalenie lokalizacji oraz identyfikacja wtrąceń, reflektorów, pustek powietrza i nieciągłości zlokalizowanych w próbkach.

Słowa kluczowe: *tomografia ultradźwiękowa; badania nieniszczące*

1. Wprowadzenie

Powszechnie stosowane w budownictwie konstrukcje betonowe i żelbetowe, muszą spełniać wymagania dotyczące wytrzymałości i trwałości konstrukcji, a co za tym idzie zapewniać bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji w trakcie jej eksploatacji. W tym czasie na konstrukcję największy wpływ mają czynniki fizyczne: duże różnice temperatury, erozja, wymywanie, zmęczenie materiału, przemarzania, wilgoć oraz przeciążenie elementu, oraz chemiczne: korozja, karbonatyzacja, reakcje biologiczno-chemiczne zachodzące w strukturze betonu. Wystąpienie tych czynników może prowadzić do zmian w geometrii, w mikro- i makrostrukturze betonu, powodować pojawienie się nieciągłości oraz zaburzenie równowagi chemicznej w strukturze materiału. Wszystkie te zmiany można zidentyfikować i ocenić przy użyciu nieniszczących metod badania konstrukcji betonowych.

Badania NDT (ang. Non-Destructive Testing) pozwalają na bezinwazyjne ocenie stanu badanego elementu. Poza szacowaniem parametrów wytrzymałościowych, właściwości materiałowych, umożliwiają także detekcję ewentualnych nieciągłości i ukrytych wad, a także wtrąceń, np. niewłaściwie rozmieszczonych prętów zbrojeniowych. Pomimo tego,

że rozwój badań nieniszczących konstrukcji betonowych jest dość powolny, w porównaniu do innych materiałów o bardziej jednorodnej strukturze, obecnie można ocenić nie tylko parametry mechaniczne, ale również właściwości fizyczne, chemiczne lub akustyczne. Popularność tego typu badań wciąż rośnie. Stosunkowo łatwe do przeprowadzenia badania są możliwe do wykonania in-situ. A co najważniejsze dla inwestorów, są to ekonomiczne rozwiązania, pomagające chociażby we wcześniejszym zlokalizowaniu zagrożenia.

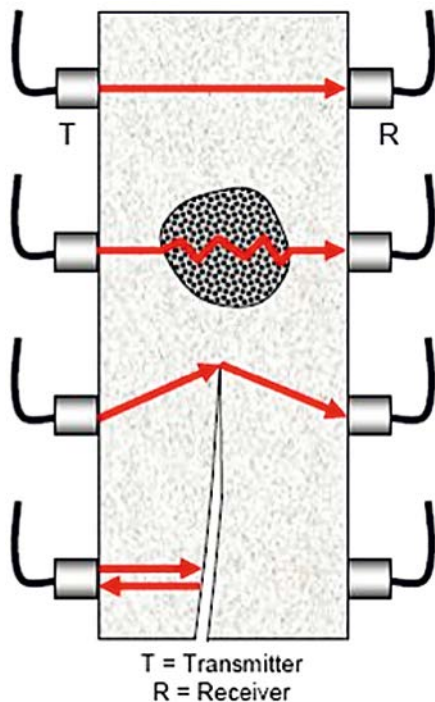
2. Akustyczne metody badania betonu

Metody akustyczne to grupa metod bazujących na propagacji fali dźwiękowej w różnych ośrodkach. Falę akustyczną należy rozpatrywać jako falę sprężystą rozchodzącą się w ośrodku lepkosprężystym.

Metoda echa związana jest z wprowadzeniem przez głowicę do ośrodka sygnału, który odbija się od granicy nieciągłości lub wtrącenia i powraca do dwufunkcyjnej głowicy nadawczo-odbiorczej. Jest to metoda bazująca na zjawisku częściowego lub całkowitego odbicia fali i należy do grupy metod z dostępem jednostronnym. Na podstawie analizy tego zjawiska, można wnioskować o wystąpieniu reflektora (obiektu, wtrącenia, pęcherzy powietrza, innych nieciągłości) w objętości elementu lub na jego powierzchni.

*Autor korespondencyjny. E-mail: krzysztof.schabowicz@pwr.edu.pl

W metodzie przepuszczania badanie polega na przyłożeniu głowicy nadawczej i odbiorczej do badanego elementu, po ówczesnym przygotowaniu powierzchni elementu (Rys. 1). Zastosowanie środka sprężającego zapewnia prawidłowe przyleganie głowicy do elementu i minimalizuje straty sygnału na wyjściu i wejściu. To najstarsza metoda wykorzystująca fale ultradźwiękowe do lokalizacji pęknięć i pustek powietrznych w strukturze próbki. Fala dźwiękowa przechodzi przez badany element, w którym przypuszczamy wystąpienie defektów (wtrąceń, nieciągłości, zbrojenia) w określonym czasie. Porównując prędkość uzyskaną w miejscu bez defektów, możemy ustalić obecność i położenie defektów.



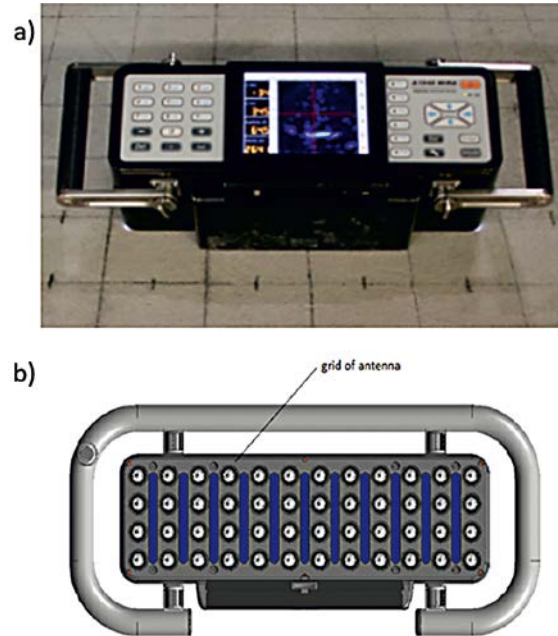
Rys. 1. Idea metody przepuszczania fal ultradźwiękowych, źródło: [12]

Fig. 1. The idea of the method of transmitting ultrasonic waves, source: [12]

Na rysunku 1 zobrazowano ideę badania dla kilku podstawowych przypadków występujących w strukturze elementu. Na pierwszym przejściu widoczny jest najszybszy przebieg fali – będzie to zatem wartość porównawcza dla dalszych badań. Na kolejnych przejściach, fala napotyka na różnego rodzaju przeszkody, wydłużające lub uniemożliwiające dotarcie do głowicy odbiorczej. Na tej podstawie, podczas badania można wnioskować o wystąpieniu wtrąceń lub istotnych nieciągłości wewnątrz struktury obiektu.

W ostatnim czasie bardzo popularna stała się metoda tomografii ultradźwiękowej, w której wykorzystuje się na przykład tomograf ultradźwiękowy A1040 MIRA, co pokazano na rysunku 2. Opis tego urządzenia przedstawiono między innymi w artykule [10], a sposób działania w [11]. Urządzenie to stosowane jest do badań obiektów, które są wykonane z betonu, betonu zbrojonego lub kamienia. Podczas badania wykorzystuje się metodę pomiaru przysłony Ramana, w której badany jest „nacisk” fali ultradźwiękowej w każdym

punkcie półprzestrzeni. Dane zbierane są w tablicy, która jest tworzona w wyniku zbierania par informacji, pochodzących z nadajnika i odbiornika. Każde zobrazowanie otrzymane podczas badania jest rezultatem analizy fal poprzecznych, które są wysyłane i odbierane przez matrycę czterdziestu ośmiu głowic (Rys. 2b).



Rys. 2. Tomograf ultradźwiękowy A1040 MIRA: a) widok od góry, b) widok od spodu, źródło: [11]

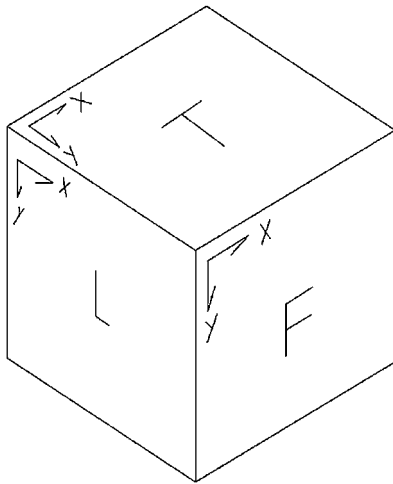
Fig. 2. Ultrasound tomograph A1040 MIRA: a) top view, b) bottom view, source: [11]

Wyniki badań prezentowane są w postaci zobrazowań oraz funkcji sygnału. Istnieje wiele prac opisujących możliwości tej metody, takie jak określanie grubości elementów [1], dobieranie parametrów podczas prowadzonego badania [2], [3] lub wykrywanie wad znajdujących się na różnej głębokości [4]. Poza pracami na temat samej metody dostępne są również pozycje opisujące rekonstrukcję obrazów uzyskanych podczas badania [5]-[9], choć jest ich niewiele.

3. Przykład badania tomografem ultradźwiękowym

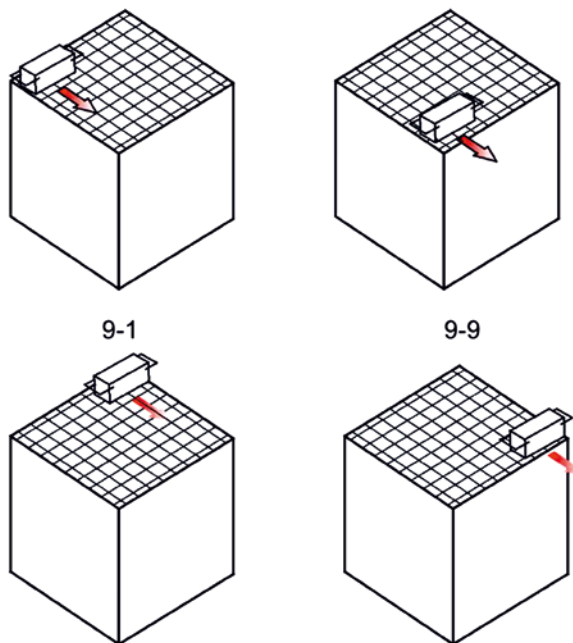
3.1 Wprowadzenie

W ramach eksperymentu przygotowano elementy betonowe o wymiarach 1000x1000x1000mm, 1000x1000x500mm, 1000x500x500mm, 500x500x500mm. Pierwszym etapem eksperymentu było ponumerowanie elementów. Po zabetonowaniu, na każdej ze ścian została naniesiona siatka pomiarowa o skoku 100x100mm. Początek układu współrzędnych przyjęty był podczas badania w górnym lewym rogu. Punkt zerowy układu przyjęto adekwatnie do aktualnego położenia urządzenia. Oś X jest to oś skierowana zgodnie z dłuższym wymiarem tomografu. Zwrot tej osi skierowany jest od strony lewej do prawej. Oś Z zlokalizowana jest w głąb urządzenia, prostopadle do płaszczyzny XY. Na rysunku 3 przedstawiono system oznaczania badanych powierzchni, gdzie: L – strona lewa (left), F – przód (front), T – góra (top), analogicznie powierzchnia prawa i tylna.



Rys. 3. Oznaczenie badanych powierzchni próbek
Fig. 3. Determination of the tested sample surfaces

Akwizycja danych o obiekcie odbywała się poprzez wykonanie skanów na kolejnych pozycjach siatki, jak przedstawiono to na rysunku 4, do momentu „przejścia” przez wszystkie współrzędne.

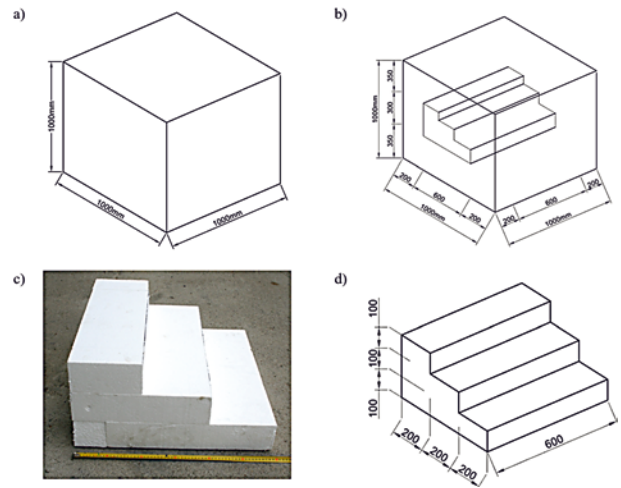


Rys. 4. Schematyczny przebieg badania
Fig. 4. Schematic course of the study

3.2 Elementy próbne

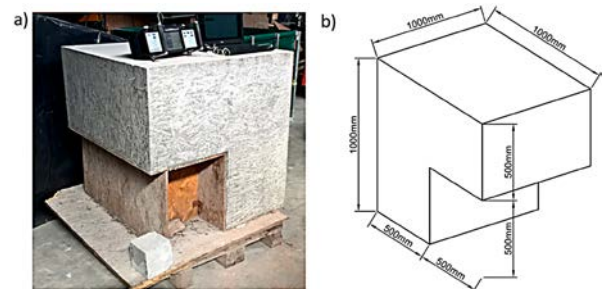
Badania przeprowadzono na trzech elementach próbnym, które oznaczono P19, P20 i P36. Wszystkie badane elementy próbne nie posiadały żadnych powierzchniowych cech charakterystycznych, takich jak odpryski, pęknięcia czy widoczne rysy.

W elemencie betonowym oznaczonym jako P19 umieszczono obiekt schodkowy wykonany z płyt styropianowych. Został on umiejscowiony w połowie wysokości bloku: poziom dolnej krawędzi styropianu na głębokości 350 mm. Wymiary schodków oraz ich lokalizację przedstawiono na rysunku 5.

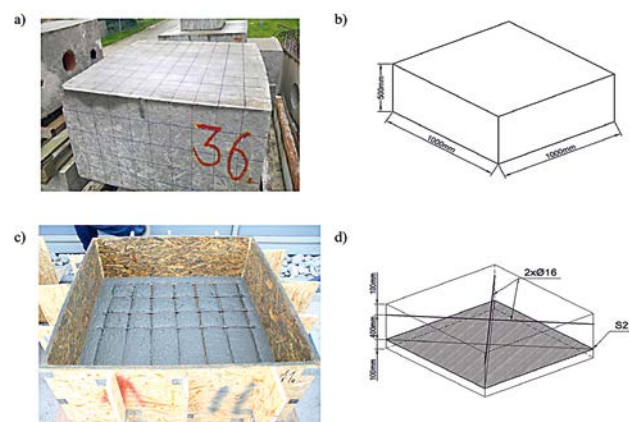


Rys. 5. Element betonowy P19: a) element wraz z wymiarami próbki, b) wymiary próbki wraz z zabetonowanym elementem, c) zabetonowane wtrącenie, d) wymiary zabetonowanego elementu
Fig. 5. Concrete element P19: a) concrete element with dimensions, b) dimensions of the sample with concreted element, c) concreted element, d) dimensions of concreted element

Na rysunku 6 przedstawiono element betonowy P20. Zostało w nim wykonane podcięcie na głębokość oraz szerokość ok. 500 mm. W próbce nie umieszczono żadnych dodatkowych obiektów.



Rys. 6. Element betonowy P20: a) widok po zabetonowaniu, b) wymiary elementu
Fig. 6. Concrete element P20: a) ready sample, b) sample dimensions

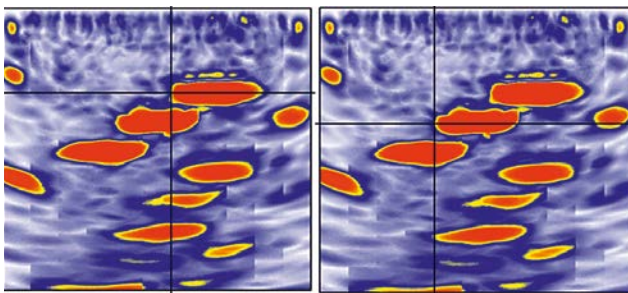


Rys. 7. Element betonowy P36: a) gotowa próbka wraz z wymiarami, b) zabetonowane wtrącenie, c) zbrojenie podczas betonowania, d) schemat zbrojenia
Fig. 7. Concrete element P36: a) ready sample, b) sample dimensions, c) reinforcement during concreting, d) reinforcement scheme

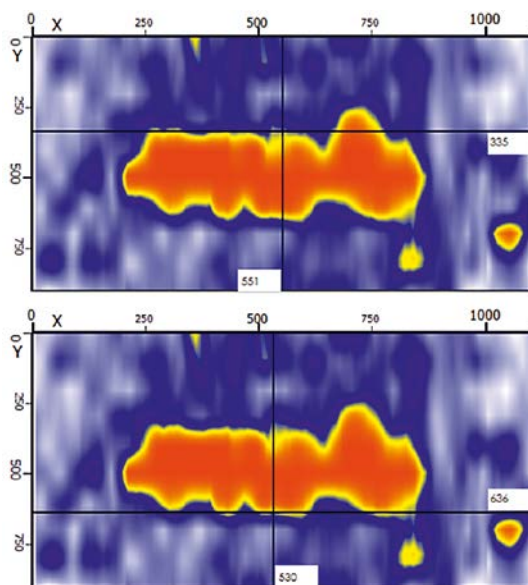
Z kolei dla elementu betonowego P36, pokazanego na rysunku 7, przygotowano układ zbrojenia siatką w warstwie dolnej oraz dwoma skrzyżowanymi prętami w warstwie górnej.

3.3 Wyniki badań i ich analiza

W wyniku wykonania pomiarów dla elementu betonowego P19 otrzymano łącznie 70 obrazów pochodzących z 70 punktów pomiarowych. Na rysunkach 8 - 12 przedstawiono wybrane zobrazowania pokazujące otrzymane rezultaty. Jak widać na otrzymanych rezultatach wymiary wtrącenia otrzymane przy wykorzystaniu tomografu ultradźwiękowego zgadzają się z wymiarami rzeczywistymi wtrącenia. W elemencie P19 z dokładnością do 5mm zostały oszacowane jego wymiary.

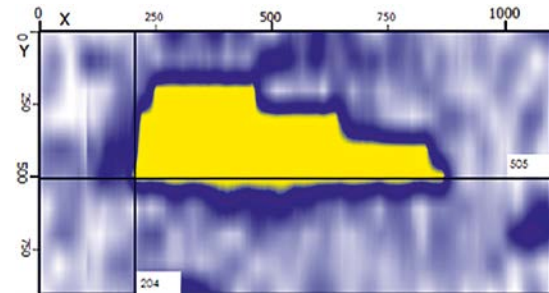


Rys. 8. Zobrazowanie elementu betonowego P19 – widok od prawej
Fig. 8. Concrete element P19 – view from the right

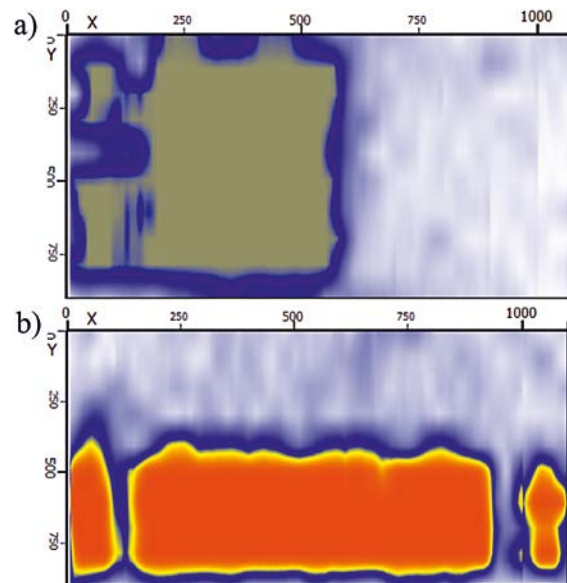


Rys. 9. Element betonowy P19 – widok od tyłu – pomiar wysokości
Fig. 9. Concrete element P19 – rear view – height measurement

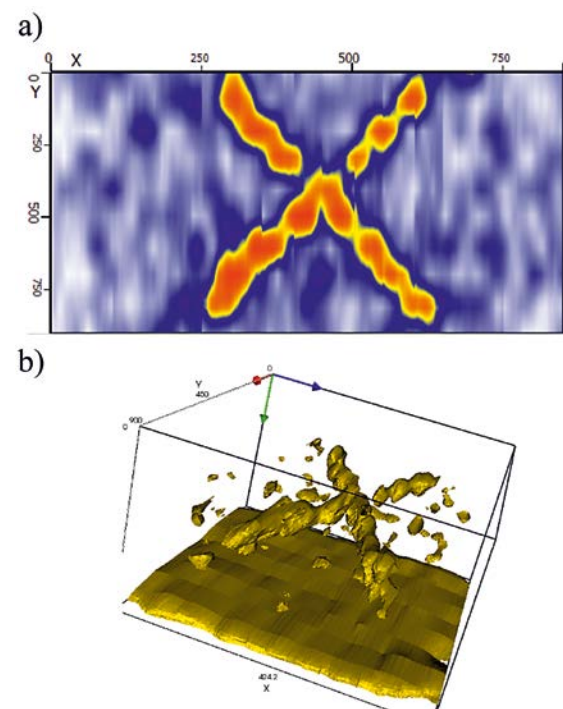
Na rysunku 11 przedstawiono wybrane zobrazowania pokazujące otrzymane rezultaty dla elementu betonowego P20. Można na nich zaobserwować wyraźne wtrącenie w postaci rozległej powierzchni obejmującej około połowę przekroju próbki. Wysokość i szerokość wtrącenia to około 500 mm. Wymiar ten jest zgodny z faktycznym kształtem betonowego próbki P20.



Rys. 10. Element betonowy P19 – widok od lewej
Fig. 10. Concrete element P19 – view from the left



Rys. 11. Element betonowy P20: a) widok od góry, b) widok od prawej
Fig. 11. Concrete element P20: a) top view, b) view from the right



Rys. 12. Element betonowy P36: a) widok od góry, b) widok 3D
Fig. 12. Concrete element P36: a) top view, b) 3D view

Z kolei na rysunku 12 przedstawiono rezultaty otrzymane z badania tomografem ultradźwiękowym elementu betonowego P36. Jak widać z przedstawionych zobrażeń dla bardziej złożonych elementów można określić kształt oraz rozmiar, jaki ma wtrącenie. Analizując sam widok z góry (Rys. 12a), istnieje ryzyko błędnej oceny grubości elementu oraz sposobu jego ułożenia. Dopiero widok 3D pokazuje rozmieszczenie wykrytych elementów względem siebie, co pokazano na rysunku 12b.

4. Wnioski

Badania nieniszczące pozwalają na bezinwazyjne ocenienie stanu badanego elementu. Umożliwiają także detekcję ewentualnych nieciągłości i ukrytych wad, a także wtrąceń, np. niewłaściwie rozmieszczonych prętów zbrojeniowych.

W artykule przedstawiono przykładowe nieniszczące metody akustyczne przydatne w diagnostyce elementów betonowych, omawiając szerzej metodę tomografii ultradźwiękowej. Metoda ta pozwala na przedstawienie otrzymanych wyników w postaci graficznej, co znacznie ułatwia interpretację wyników. Możliwe jest wtedy nie tylko dostrzeżenie miejsc ewentualnego zaburzenia, ale również określenie jego położenia.

W oparciu o przeprowadzone badania, zaprezentowane w tym artykule, można stwierdzić, że wyniki otrzymane za pomocą tomografii ultradźwiękowej pozwalają wykryć wtrącenia w bardzo dobrym stopniu. Badania prowadzone na mniej skomplikowanych elementach betonowych pozwalają z bardzo dobrą dokładnością oszacować możliwe wtrącenia. Przy większych obiektach, jak przykładowo w elemencie betonowym P19, z dokładnością do 5 mm zostały oszacowane jego wymiary. Dla bardziej złożonych elementów, takich jak przykładowo element P36 można określić kształt oraz rozmiar, jaki zajmuje wtrącenie.

Przedstawione wyniki pokazują, jak duże możliwości dają akustyczne badania nieniszczące. Wcześniejsze wykrywanie ewentualnego zagrożenia, brak naruszania konstrukcji, możliwość wykonania pomiarów in-situ, ekonomika i co najważniejsze dokładność wyników dają duże możliwości i zastosowanie w praktyce budowlanej.

5. Literatura/References

- [1] Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G., „Thickness measurements and flaw detection in concrete using ultrasonic echomethod”, *Journal of Nondestructive Testing and Evaluation*, 1997
- [2] Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G., „Ultrasonictomography of metal structure using digital focused antenna arraymethods”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011
- [3] Samokrutov A.A., Kozlov V.N., Shevaldykin V.G., „Ultrasonic testing of concrete objects using dry acoustic contact. Methods, instruments and possibilities”, *The 5th International Conference on Non Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry*, Moskwa, 2006
- [4] Bishko A., „Improvement of imaging at small depths for acoustic tomography of reinforced concrete objects”, *The 6th International Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry*, Mashinostroenie, Moskwa 2007
- [5] Schickert M., Krause M., „Ultrasonic techniques for evaluation of reinforced concrete – structures”, *Non-destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*, 2010
- [6] Schickert M., „Towards SAFT-Imaging in Ultrasonic Inspection of Concrete”, *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil engineering*, 1995
- [7] Śliwowski M., „Zmechanizowane systemy ultradźwiękowe do lokalizacji korozji wżerowej”, *XIV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów*, Zakopane, 2008
- [8] Jian-Hua T., Chin-Lung Ch., Chung-Yue W., Shua-Tao L., „Influence of Rebars on Elastic - Wave Based SAFT Image for Detecting Void in Concrete Structure”, *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Berlin, 2015
- [9] Bazulin E.G., „Determining the Flaw Type from Images Obtained by the C-SAFT Method with Account for Transformations of Wave Types upon Reflections of Ultrasonic Pulses from Irregular Boundaries of a Test Object”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Moskwa, 2010
- [10] De la Hoza A.O., Petersen C.G., Samokrutov A., „Three dimensional imaging of concrete structures using ultrasonic shear waves”
- [11] Oficjalna strona producenta aparatu A1040 MIRA <http://www.acsys.ru/>
- [12] Witryna internetowa firmy Germann <http://germann.org/>