

Łukasz Drobiec*

Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice

Badania nieniszczące wykorzystywane w praktyce budowlanej

Non-destructive tests used in civil engineering

ABSTRACT

Non-destructive testing is increasingly used in the construction and adaptation of existing buildings. In addition to methods that have been known for a long time (eg the sclerometric method), we currently use acoustics, radar, electromagnetic methods, and research on concrete mixes. The work discusses the basic non-destructive methods placed on buildings in Poland. The possibilities of diagnostic devices available on the market are presented. The results of research conducted using various methods and devices are presented.

Keywords: *destructive testing; sclerometric method; electromagnetic method; ultrasound method; acoustics method*

STRESZCZENIE

Badania nieniszczące coraz częściej wykorzystuje się podczas wznoszenia oraz adaptacji obiektów istniejących. Oprócz metod znanych od dawna (np. metoda sklerometryczna) stosuje się obecnie metody młoteczkowe, radarowe, elektromagnetyczne, oraz prowadzi się badania mieszanek betonowych. W pracy omówiono podstawowe metody nieniszczące stosowane przy analizie istniejących obiektów w kraju. Przedstawiono możliwości urządzeń diagnostycznych dostępnych na rynku. Zaprezentowano wyniki badań prowadzonych przy pomocy różnych metod i urządzeń.

Słowa kluczowe: *badania niszczące; metoda sklerometryczna; metoda elektromagnetyczna; metoda ultradźwiękowa; metoda młoteczkowa*

1. Wstęp

Metody nieniszczące służące do diagnostyki konstrukcji są jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin budownictwa [1, 2, 3]. W kraju i na świecie prowadzi się szereg prac badawczych związanych z tą tematyką. Obecnie intensywnie rozwija się metody akustyczne [3, 4, 5] oraz prowadzi się badania nad wykorzystaniem sztucznej inteligencji i sieci neuronowych w diagnostyce konstrukcji [6, 7, 8]. Wiele prac dotyczy wykorzystania metod niszczących do detekcji uszkodzeń elementów, a w szczególności zarysowań w konstrukcjach żelbetonowych [5, 8, 9, 10]. W praktyce budowlanej metody nieniszczące nie są jednak jeszcze stosowane tak szeroko. Badania z ich wykorzystaniem prowadzi się głównie w istniejących konstrukcjach w celu identyfikacji parametrów wytrzymałościowych i geometrii, najczęściej na etapie oceny stanu technicznego lub ramach prac poprzedzających przebudowę, czy rozbudowę. Rzadziej prace diagnostyczne prowadzi się na etapie wznoszenia obiektów.

W konstrukcjach drewnianych i murowych metod nieniszczących z reguły nie stosuje się. W konstrukcjach stalowych metody nieniszczące są najczęściej stosowane do określania grubości elementów oraz jakości spoin. Metody diagnostyczne są natomiast w praktyce najczęściej wykorzystywane w konstrukcjach żelbetonowych. W pracy omówiono podstawowe badania nieniszczące stosowane w praktyce budowlanej do diagnostyki obiektów żelbetonowych.

2. Określanie wytrzymałości betonu

Wytrzymałość na ściskanie betonu jest podstawową informacją, którą należy uzyskać, kiedy dokonuje się sprawdzenia zgodności wykonanej konstrukcji z rozwiązaniami projektowymi, w sytuacji awaryjnej, przystępując do wszelkich prac związanych ze zmianą sposobu użytkowania, modernizacją,

przebudową i rozbudową obiektu [9, 10, 11, 12]. Do określania wytrzymałości betonu w istniejącej konstrukcji najczęściej obecnie stosuje się metodę sklerometryczną oraz metodę ultradźwiękową. Sklerometria należy do metod badania twardości, czyli odporności materiału na odkształcenia spowodowane siłami skupionymi i zaliczana jest do powszechnych sposobów kontroli jakości betonu [12]. W przyrządach sklerometrycznych analizuje się odpowiedź na dynamiczne uderzenie węgelnika z określoną energią. Dynamiczna twardość betonu jest proporcjonalna do wysokości, na jaką odskakuje bijak uderzający ze znaną energią w kulkę lub we węgelnik kuliście zakończony. W badaniach sklerometrami, twardość dynamiczną wyraża się jako funkcję liczby odbicia L, co w zastosowaniach praktycznych (przy stałych parametrach przyrządu) pozwala bezpośrednio znaleźć empiryczną zależność między wytrzymałością betonu f , a liczbą odbicia L. Ultradźwiękowa metoda określania wytrzymałości betonu wykorzystuje zjawisko rozchodzenia się fali akustycznej (impulsu fali) o częstotliwości większej od górnej granicy słyszalności ucha ludzkiego tj. > 20 kHz. Analizuje się tu zależność między wytrzymałością betonu i prędkością fali ultradźwiękowej.

W wypadku nieniszczących badań wytrzymałości betonu należy pamiętać, że w normie europejskiej PN-EN 206-1:2014-4 w pkt. 8.4 jednoznacznie stwierdzono, że jeśli producent powiadomił o niezgodności betonu lub jeśli wynik badań zgodności nie spełniają wymagań mogą być wymagane badania uzupełniające, zgodne z PN-EN 12504-1:2011 przeprowadzone na rdzeniach pobranych z konstrukcji lub elementów albo kombinacja badań przeprowadzonych na rdzeniach z badaniami nieniszczącymi konstrukcji lub elementów np. Zgodnie z PN-EN 12504-2:2013-03, PN-EN 12504-4:2005. Z zapisów normy wynika więc, że wytrzymałość betonu można wyznaczyć na próbkach wyciętych z konstrukcji, ale dodatkowo można przeprowadzić badania

*Autor korespondencyjny. E-mail: lukasz.drobiec@polsl.pl

nieniszczące konstrukcji metodą sklerometryczną lub ultradźwiękową. Stwierdzenie to wyklucza ocenę wytrzymałości betonu tylko na podstawie badań nieniszczących, które może być realizowane w kombinacji z badaniami niszczącymi [9, 10, 12]. Pomimo tych obostrzeń metody nieniszczące przy określaniu wytrzymałości betonu są często stosowane, choć nie zawsze dokonuje się kalibracji wyników przy pomocy kontrolnych badań odwiertów rdzeniowych. Powszechność stosowania metod nieniszczących jest zapewne związana z dobrą dostępnością urządzeń diagnostycznych w postaci sklerometrów Schmidta lub betonoskopów.

3. Określanie parametrów zbrojenia

Określenie parametrów stali zbrojeniowej jest drugą z podstawowych czynności prowadzonych w ramach diagnostyki istniejących konstrukcji. Gdy projektowana naprawa lub wzmocnienie wymagają obliczeniowego sprawdzenia nośności konstrukcji żelbetowej należy oprócz wytrzymałości betonu określić geometrię położenia zbrojenia w elemencie oraz parametry mechaniczne i odkształceniowe tego zbrojenia [10, 13, 14, 15, 16]. Geometrię prętów zbrojeniowych można uzyskać metodą tradycyjną, wykonując odkrywkę, bądź przy pomocy nieniszczących metod diagnostycznych. Metody nieniszczące są przydatne szczególnie w wypadku, gdy powierzchnia lub liczba elementów koniecznych do zbadania jest znaczna. Metody nieniszczące pozwalają na wyznaczenie średnicy i położenia prętów zbrojeniowych, przy ich pomocy nie można jednak określić klasy i gatunku stali zbrojenia. Dlatego zawsze należy wykonać kontrolne odkrywkę.

W przeciwieństwie do opisanych wyżej metod służących do określania wytrzymałości betonu nieniszczące metody lokalizacji zbrojenia nie są objęte krajowymi ani europejskimi wytycznymi normowymi. Najczęściej stosowanymi obecnie nieniszczącymi metodami służącymi do detekcji zbrojenia są metody elektromagnetyczna i radarowa. Elektromagnetyczne metody badań lokalizacji zbrojenia w elementach żelbetowych polegają najczęściej na analizie zmiany pola magnetycznego w pobliżu prętów zbrojeniowych. Sposoby wzbudzania pola magnetycznego oraz analizy i interpretacji otrzymanych wyników różnią się nieco w dostępnych obecnie urządzeniach pomiarowych, lecz większość z nich działa według powszechnie znanych zasad, które szczegółowo opisano w pracach [10 i 13].

Metoda radarowa polega na emitowaniu fal elektromagnetycznych o częstotliwości z zakresu od krótkich do ultrakrótkich fal radiowych i rejestracji fal odbitych od warstw charakteryzujących się zmiennymi właściwościami dielektrycznymi. Podstawy teorii fal elektromagnetycznych stworzył James Clerk Maxwell w roku 1864 [10, 13]. Teoria ta długo nie była jednak wykorzystywana w praktyce. Techniki GPR do badań żelbetowych konstrukcji zaczęto powszechnie stosować dopiero w latach 80 dwudziestego wieku. Wtedy to udoskonalano zarówno technikę pomiaru, jak i metody interpretacji wyników. W połowie lat osiemdziesiątych powstał pierwszy komputerowy system pomiarowy GPR, który oferował możliwość zapisu danych w postaci cyfrowej. Obecnie dostępnych jest wiele systemów

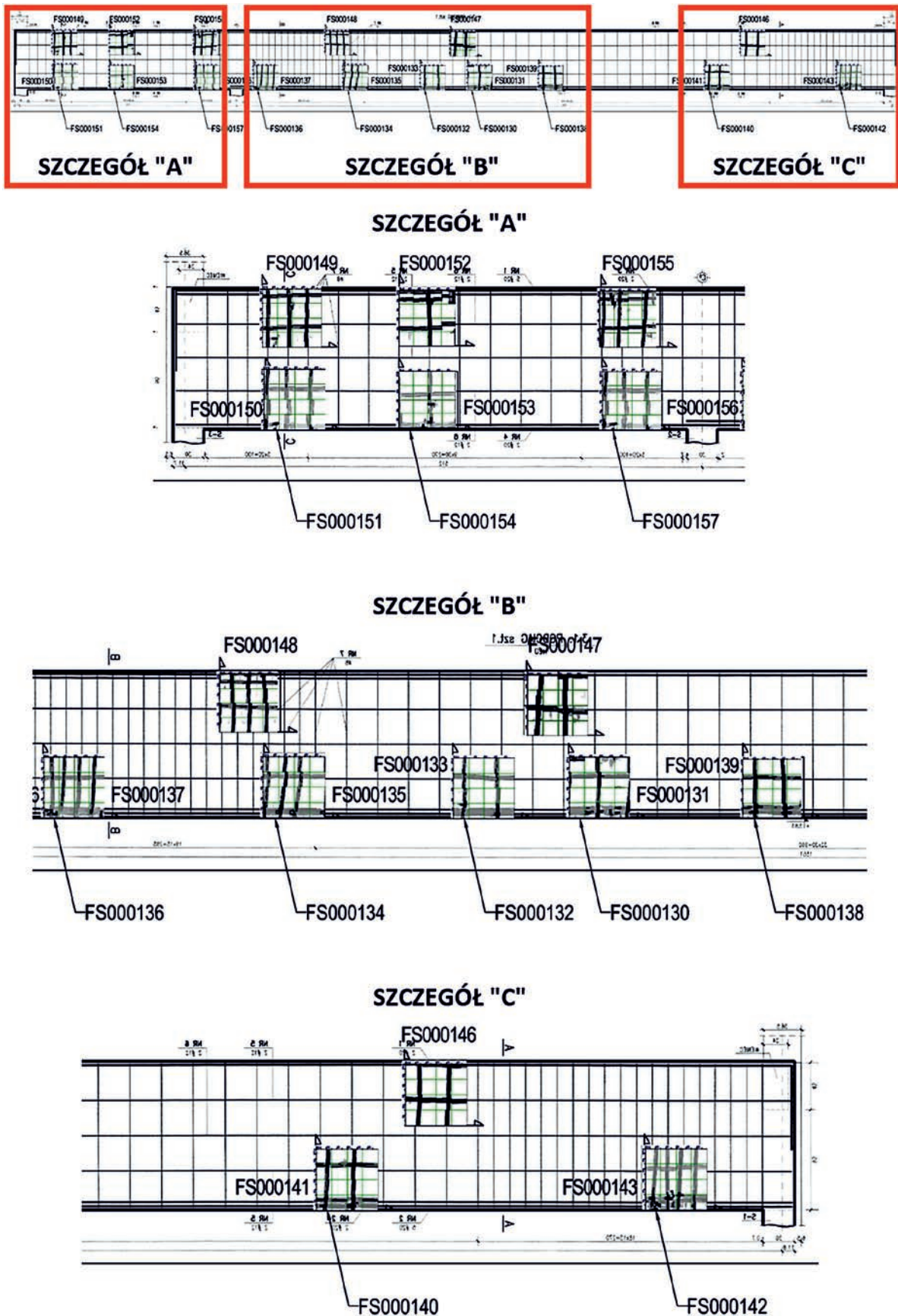
pomiarowych o zróżnicowanym zakresie pomiaru i różnym stopniu interpretacji wyników [10, 13, 17].

Dokładność badań elektromagnetycznych zależy przede wszystkim od głębokości położenia prętów zbrojeniowych, rozstawu prętów i ich usytuowania względem kierunku skanowania, rodzaju zastosowanego zbrojenia oraz jakości powierzchni betonu [10, 13]. Wpływ na dokładność badań mają również zaimplementowany typ analizy spektralnej oraz procedury kompensacji błędów pomiaru. Głębokość położenia prętów w sposób istotny wpływa na dokładność pomiaru średnicy, a nawet dokładność samej lokalizacji prętów. Maksymalna głębokość wykrywania zbrojenia zależy od średnicy prętów zbrojeniowych. W wypadku stosowanych w budownictwie typowych średnic $6 \div 25$ mm, w zależności od zastosowanego urządzenia, największa głębokość, na której można wykryć zbrojenie to $100 \div 200$ mm. Oczywiście im pręty zbrojeniowe są położone bliżej skanowanej powierzchni tym pomiar jest dokładniejszy. Akceptowalną dokładność pomiaru średnicy zbrojenia uzyskuje się przy położeniu prętów do głębokości około 60 mm.

W typowych konstrukcjach żelbetowych (belki, płyty, słupy), przy normowych otulinach, zakres dokładności urządzeń elektromagnetycznych pozwala na wykonanie badań o dobrej dokładności pomiaru. Na rys. 1 pokazano przykład badania dwuprzęsłowego żelbetowego podciągu z przęsłami nierównomiernymi o rozpiętościach 5 i 20 mm. Wysokość elementu wynosiła 120 cm.

Zasięg działania metody radarowej zależy od struktury betonu, rodzaju anten i wielkości wzbudzanych częstotliwości impulsu. W typowych urządzeniach zakres ten wynosi do 750 mm. Kontrast obrazu uzyskiwany w badaniach metodą radarową uzależniony jest od względnej różnicy pomiędzy stałymi dielektrycznymi graniczącymi ze sobą materiałów. Ze względu na znaczne różnice w wartościach tych stałych dla betonu i stali z reguły nie ma problemu z interpretacją uzyskanego obrazu. Wynikiem badań lokalizacji zbrojenia, prowadzonych metodą radarową, są tzw. falogramy, czyli zapis wszystkich odbitych sygnałów zarejestrowanych podczas profilowania (przejazdu sondy pomiarowej po powierzchni elementu). Obrazem zbrojenia na falogramie jest zniekształcenie przebiegu warstw w postaci hiperboli z ramionami skierowanymi ku dołowi falogramu. Wierzchołek hiperboli informuje o położeniu pręta zbrojeniowego. Urządzenia nie podają w sposób jawny średnicy zbrojenia. Istnieje jednak prosty sposób wyznaczenia średnicy prętów krzyżujących się w konstrukcji. Wykonuje się wówczas skan konstrukcji w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach nad obiema z krzyżujących się prętów, a następnie dokonuje się pomiaru wielkości betonowej otuliny, a różnica pomiędzy wielkościami otulin krzyżujących się prętów to średnica pręta znajdującego się bliżej powierzchni badanego elementu (rys. 2).

Nowoczesne systemy pomiarowe dokonują automatycznej analizy falogramów, łączą falogramy wykonane obok siebie w jeden obraz i przedstawiają wizualizację zbrojenia w konstrukcji. Przy pomocy dodatkowego oprogramowania komputerowego możliwe jest często wykonanie przestrzennego obrazu konstrukcji ze zbrojeniem.



Rys. 1. Przykład badań zgodności zbrojenia z projektem metodą elektromagnetyczną. Uzyskane urządzeniem PS 200 skany naniesiono na projekt żelbetowego podciągu.

Fig. 1. An example of tests for compliance of reinforcement with a project using an electromagnetic method. Obtained by the PS 200 device, the scans were applied to the project of the reinforced beam.

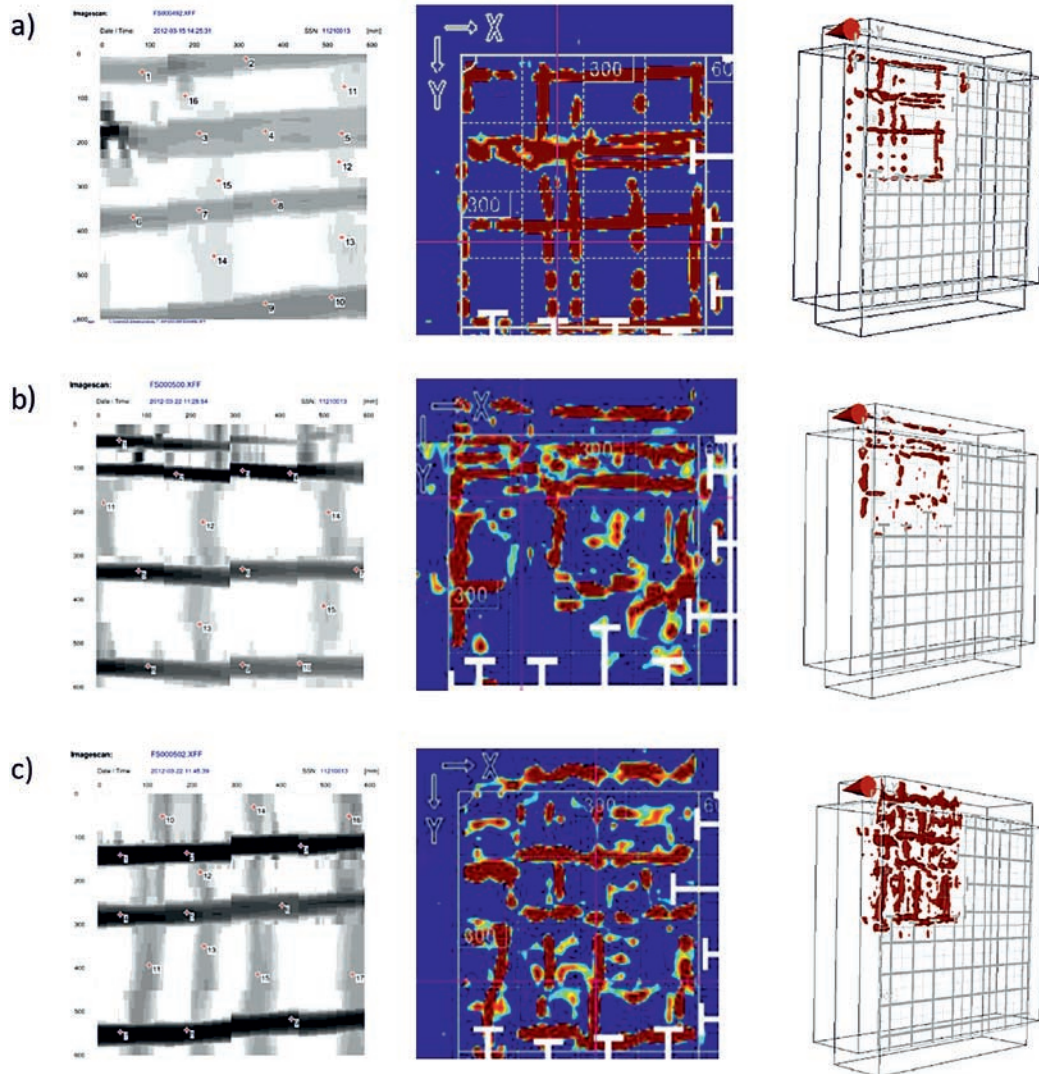
Na rys. 3 pokazano porównanie wyników badań elektromagnetycznych i radarowych. Badania prowadzono na ścianach żelbetowego silosu o wysokości 42,0 m ppt. i średnicy 17,0 m (przykłady z tych badań opisano poniżej – przykład P1 i P2). Grubość ścian silosu wynosiła 35 cm, a zbrojenie umieszczano zarówno od strony zewnętrznej, jak i od strony wewnętrznej ścian. Badania prowadzono przy użyciu elektromagnetycznego skanera PS 200 oraz radarowego skanera PX 1000. Badania wykonywano od zewnątrz silosu, wykonując skany każdym z urządzeń w tym samym miejscu i na tej samej powierzchni. Prezentowane obrazy zbrojenia pochodzą z programów komputerowych dołączanych do urządzeń. Porównując uzyskane wyniki należy stwierdzić, że w metodzie elektromagnetycznej zbrojenie wykrywane jest bardzo dokładnie (przynajmniej do pewnej głębokości). W badaniach radarowych oprócz zbrojenia wykrywane są również uszkodzenia wewnętrzne (raki, większe pęknięcia). W opisywanych badaniach występowały znaczne uszkodzenia struktury wewnętrznej w płaszczyźnie zbrojenia,

które powstały prawdopodobnie na skutek zbyt wczesnego podrywania deskowania ślizgowego. Uszkodzenia te na skanach (środkowa kolumna - rys. 3) widoczne są w postaci nieregularnych obiektów o rozmytych krawędziach.



Rys. 2. Określenie średnicy zbrojenia na falogramie – lewa strona badanie w kierunku prostopadłym do pręta górnego, prawa w kierunku prostopadłym do pręta dolnego.

Fig. 2. Determination of the reinforcement diameter in the waveform - left side of the test in the direction perpendicular to the upper bar, right in the direction perpendicular to the lower bar.



Rys. 3. Porównanie wyników badań metodą elektromagnetyczną i radarową w trzech różnych miejscach (a), (b) i (c). Lewy skan wykonany urządzeniem PS 200, środkowy przy pomocy PX 1000, prawy - obraz 3D zbrojenia ze skanu urządzeniem PX 1000.

Fig. 3. Comparison of electromagnetic and radar test results in three different locations (a), (b) and (c). Left scan made with PS 200 device, middle with PX 1000, right - 3D image of the reinforcement with PX 1000 scan with device.

4. Lokalizacja wad wewnętrznych

Wewnętrzne wady betonu (raki, pustki) wykrywa się w praktyce przy użyciu metod ultradźwiękowej, młoteczkowej (tzw. Impact Echo) i radarowej [10, 18, 19, 20]. W badaniach ultradźwiękowych do lokalizacji wewnętrznych wad struktury konstrukcji z betonu można wyróżnić trzy metody: metodę echa, która opiera się na analizie fal odbitych od ośrodków o różnej impedancji akustycznej, metodę przepuszczania (cienia), w której rozpatruje się osłabienie energii impulsu fali ultradźwiękowej przechodzącej przez obszar zawierający nieciągłości struktury betonu oraz metodę TOFD (ang. time-of-flight diffraction), w której wykorzystuje się zjawisko dyfrakcji i rozpraszania fal ultradźwiękowych na krawędziach nieciągłości materiału. Metoda młoteczkowa jest odpowiednikiem metody echa stosowanej w diagnostyce konstrukcji z betonu prowadzonej metodą ultradźwiękową. W metodzie Impact-Echo wykorzystuje się jednak analizę obrazu widma częstotliwościowego fal odbitych. W metodzie radarowej również wykorzystuje się zjawisko odbicia i dyfrakcji fal, lecz są to fale elektromagnetyczne. Wiązka energii fali uderzając o powierzchnię na granicy dwóch ośrodków o różnych stałych dielektrycznych ulega w części odbiciu, natomiast reszta tej energii penetruje ośrodek, który znajduje się poza tą granicą.

Najbardziej z opisanych wyżej metod używana jest obecnie metoda młoteczkowa, głównie ze względu na dużą pracochłonność i czasochłonność. Nowoczesne urządzenie diagnostyczne działające według metody radarowej i ultradźwiękowej dają możliwość uzyskania obrazu przekroju elementu lub wnętrza elementu (obraz 3D), nawet w czasie rzeczywistym.

5. Podsumowanie

Praktyczne wykorzystanie nieniszczących metod badawczych do diagnostyki konstrukcji żelbetowych ogranicza się najczęściej od określania wytrzymałości betonu metodami sklerometryczną oraz ultradźwiękową, lokalizacji zbrojenia metodami elektromagnetyczną i radarową oraz lokalizacji wad wewnętrznych w konstrukcji metodami ultradźwiękową i radarową. Zastosowanie powyższych metod wynika przede wszystkim z dostępności urządzeń badawczych na rynku. Nie bez znaczenia jest również szybkość i łatwość prowadzenia badań oraz interpretacji uzyskanych wyników. Nowe metody diagnostyki będą zapewne powoli wykorzystywane w praktyce, lecz wymaga to jednak ich komercjalizacji.

6. Literatura/References

- [1] L. Runkiewicz, „Tendencje rozwojowe badań nieniszczących w budownictwie”. 32 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących. Międzyzdroje 2003, s. 87-101.
- [2] J. Hoła, K. Schabowicz, „State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 10 (3)/2010, s. 5-18.
- [3] L. Runkiewicz, J. Sieczkowski, „Propozycja zdefiniowania opracowań technicznych dotyczących diagnostyki obiektów budowlanych”. *Przegląd Budowlany*, 6/2018, s. 14-15.
- [4] K. Schabowicz, „Modern acoustic techniques for testing concrete structures accessible from one side only”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15(4)/2015, 1149-1159.
- [5] M. Rucka, „Damage detection in beams using wavelet transform on higher vibration modes”, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 49(2)/2011, 399-417.
- [6] J. Hoła, K. Schabowicz, „New technique of nondestructive assessment of concrete strength using artificial intelligence”, *NDT & E International* 38 (4)/2005, 251-259.
- [7] J. Hoła, K. Schabowicz, „Application of artificial neural networks to determine concrete compressive strength based on non-destructive tests”, *Journal of civil Engineering and Management* 11 (1)/2005, 23-32.
- [8] M. Rucka, K. Wilde, „Neuro-wavelet damage detection technique in beam, plate and shell structures with experimental validation”, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 48/2010, 579-604.
- [9] W. Starosolski, Ł. Drobiec, R. Jasiński, T. Jaśniok, M. Jaśniok, A. Piekarczyk, „Diagnostyka konstrukcji żelbetowych”. Konferencja Naukowo – Techniczna Problemy Rzeczoznawstwa Budowlanego – Warsztat Pracy Miedzyszyn-2010, str. 151÷166.
- [10] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, „Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Tom 1. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali”. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2010 (dodruk 2013).
- [11] L. Brunarski, „Określenie wytrzymałości betonu na podstawie diagnostycznych badań konstrukcji”, XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 8 - 11 marca 2006 r., s. 39 - 54.
- [12] R. Jasiński, „Określenie wytrzymałości betonu w konstrukcji”. XXIX Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk, 26-29 marca 2014 r., tom II, s. 1-110,
- [13] Ł. Drobiec, „Określenie parametrów stali zbrojeniowej w konstrukcji”. XXIX Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk, 26-29 marca 2014 r., tom I, s. 181-256.,
- [14] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, „Lokalizacja wad konstrukcji i stali zbrojeniowej – metody”, XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 8 - 11 marca 2006, t. I, s. 133-208,
- [15] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, „Metody lokalizacji stali zbrojeniowej w konstrukcjach żelbetowych. Metoda elektromagnetyczna (cz. II)”. *Przegląd Budowlany*, nr 12/2007, s. 31 - 37.
- [16] L. Runkiewicz, „Badania konstrukcji żelbetowych”, Biuro Gamma, Warszawa 2002.
- [17] J. Lachowicz, M. Rucka, „Application of GPR method in diagnostics of reinforced concrete structures”, *Diagnostyka* 16/2015.
- [18] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, „Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych – metoda ultradźwiękowa (cz. 1)”. *Przegląd Budowlany*, nr 9/2007, s. 29 - 36.
- [19] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, „Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych – metoda młoteczkowa (cz. 2)”. *Przegląd Budowlany*, nr 10/2007, s. 37 - 42.
- [20] A. Piekarczyk, „Lokalizacja wad struktury betonu w konstrukcji”. XXIX Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk, 26-29 marca 2014 r., tom II, s. 1-81