



METODY DIAGNOSTYKI ULTRADŹWIEKOWEJ I ICH ZASTOSOWANIA W BETONOWYCH OBIEKTACH MOSTOWYCH

MAGDALENA RUCKA, *mrucka@pg.gda.pl*

KRZYSZTOF WILDE

Katedra Mechaniki Budowli, Politechnika Gdańska

Streszczenie: Celem pracy jest przedstawienie zalet metod diagnostyki ultradźwiękowej zastosowanych do oceny stanu technicznego betonowych elementów w konstrukcjach obiektów mostowych. W artykule została omówiona metoda przepuszczania, która wymaga obustronnego dostępu do badanego elementu oraz metoda młoteczkowa, w której badania są realizowane przy założeniu ograniczenia dostępu do elementu tylko do jednej jego strony. Realizacje badań diagnostycznych zostały zaprezentowane na przykładzie badań wspornika betonowego poprzeczniczy mostu łukowego w ciągu obwodnicy Nowego Dworu Gdańskiego oraz sprężonej belki strunobetonowej typu T stanowiącej ustrój nośny wiaduktu drogowego mostu nad Autostradą Obwodnicą Torunia.

Słowa kluczowe: diagnostyka nieniszcząca, propagacja fal sprężystych, metoda młoteczkowa, konstrukcje betonowe, konstrukcje mostowe.

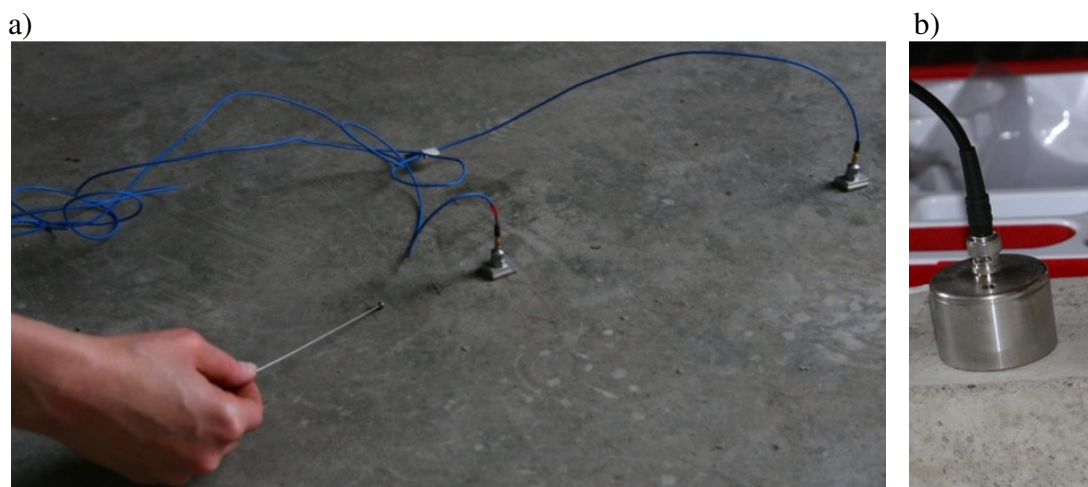
1. Wstęp

Powszechnie stosowane metody diagnostyczne betonowych elementów konstrukcyjnych obiektów mostowych bazują na oględzinach wizualnych i bezpośrednich metodach badań fizycznych, które wykorzystują podstawowe przyrządy pomiarowe takie jak suwmiarki, dalmierze laserowe, śruby mikrometryczne, kątomierze, piony, poziomice, wzorniki rozwarłośc rys, szczelinomierze, teodolity oraz lupy Brinella. Do bezpośrednich metod diagnostycznych zalicza się także metody penetracyjne (wstrzykiwanie cieczy penetrującej rysy i pęknięcia na powierzchni elementu), metody sklerometryczne (wyznaczenie wytrzymałości betonu na ściskanie) oraz polowe metody pull-out (wyznaczanie wytrzymałości betonu na ściskanie) i pull-off (wyznaczanie wytrzymałości betonu na rozciąganie). Powyższe metody stanowią uzupełnienie laboratoryjnych badań próbek pobranych z konstrukcji.

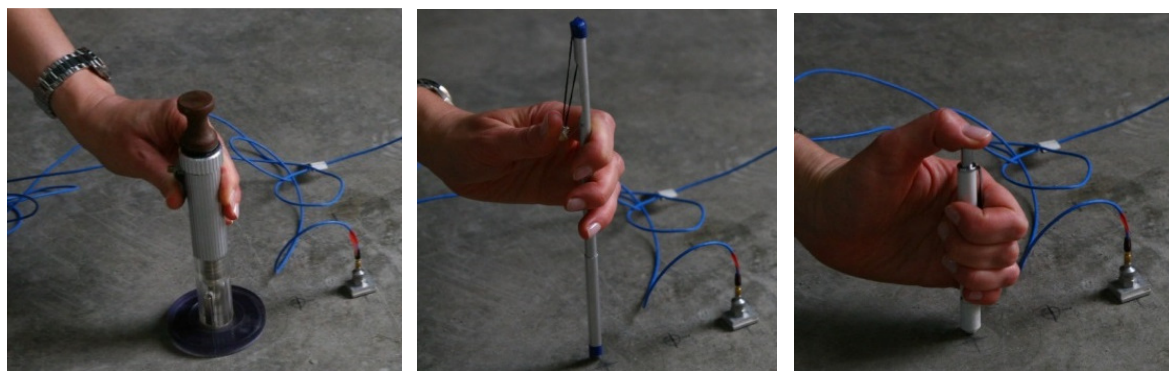
W ostatnich dwóch dekadach w procedurach utrzymania betonowej infrastruktury komunikacyjnej na praktycznym znaczeniu zyskały nieniszczące metody diagnostyki. Ich podstawową zaletą jest nieinwazyjność, czyli brak konieczności mechanicznego uszkodzenia elementów konstrukcyjnych na potrzeby realizacji badań. Do najpopularniejszych technik nieniszczących należą metody akustyczne, radiologiczne, termograficzne i elektromagnetyczne. Szczególnie dynamiczny rozwój związany jest z użyciem metod wykorzystujących propagację fal sprężystych [1–8]. Zaletą metod ultradźwiękowych jest łatwość ich zastosowania na rzeczywistej konstrukcji, relatywnie niewielki koszt oraz relatywnie wysoka efektywność w odpowiedzi na pytanie czy w elemencie znajduje się strefa uszkodzona i gdzie jest ona zlokalizowana. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie zastosowania dwóch technik diagnostycznych wykorzystujących zjawisko propagacji fal ultradźwiękowych na rzeczywistych obiektach mostowych.

2. Podstawy teoretyczne diagnostyki ultradźwiękowej

Fale sprężyste są to zaburzenia stanu naprężeń, które rozchodzą się w ośrodku sprężystym. Mogą one propagować jako fale podłużne, poprzeczne oraz powierzchniowe. Fale sprężyste można wzbudzać w formie impulsu za pomocą impaktora mechanicznego lub za pomocą głowic ultradźwiękowych (rys. 1). Impaktor mechaniczny kulkowy ma zazwyczaj postać stalowej kuleczki średnicy 3–20 mm, zamocowanej do sprężystego pręta. Zaletą impaktora kulkowego jest prostota jego budowy oraz niewielki koszt. W takim układzie pomiarowym do odbioru fali mogą służyć akcelerometry wysokoczęstotliwościowe. Wadą tego rozwiązania jest trudność uzyskania powtarzalnej charakterystyki siły wymuszającej fale sprężyste przy wielokrotnych próbach uderzeń. Rozwiązanie tego problemu można uzyskać stosując impaktory będące przedmiotem wynalazków opracowanych na Politechnice Gdańskiej. Na rys. 2 zaprezentowano prototypowe wykonania autorskich impaktorów: mechaniczno-magnetycznego [9], ciągnowego [10] oraz piezoelektrycznego [11].



Rys. 1. Wzbudzenie fal sprężystych: a) impaktor kulkowy; b) głowica ultradźwiękowa



Rys. 2. Autorskie impaktory (od lewej): mechaniczno-magnetyczny, ciągnowy, piezoelektryczny

Podstawowym parametrem wykorzystywanym w diagnostyce jest zależność pomiędzy prędkością propagacji fal sprężystych a właściwościami materiałowymi danego ośrodka. Prędkość propagacji fali można uzyskać mierząc czas przejścia pomiędzy dwoma czujnikami umieszczonym w zadanej odległości. Informacja uzyskana w takim pomiarze (tzw. metoda przepuszczania) jest podstawowym i najprostszym wskaźnikiem diagnostycznym, dającym jednak w praktycznych zastosowaniach zadawalające rezultaty wykrywania rozproszonych zmian (defektów) w objętości badanej konstrukcji.

Metodą umożliwiającą precyzyjniejsze wykrywanie lokalnych uszkodzeń jest metoda młoteczkowa (ang. *impact echo*). W metodzie tej badane są odbicia propagujących fal od wewnętrznych uszkodzeń w formie np. rys czy pęknięć. Zasada działania metody młoteczkowej pokazana jest na rys. 3. Pomiar propagującej fali realizowany jest w tym samym miejscu konstrukcji, co wzbudzenie. Takie podejście nosi nazwę pomiaru jednostronnego. Procedura wykrywania uszkodzeń bazuje na analizie sygnałów w dziedzinie częstotliwości. Jeżeli w konstrukcji nie ma uszkodzeń (rys. 3a), zarejestrowany przebieg zdominowany jest przez falę o jednej częstotliwości f_h , zwanej częstotliwością odbicia od przeciwległej powierzchni zewnętrznej:

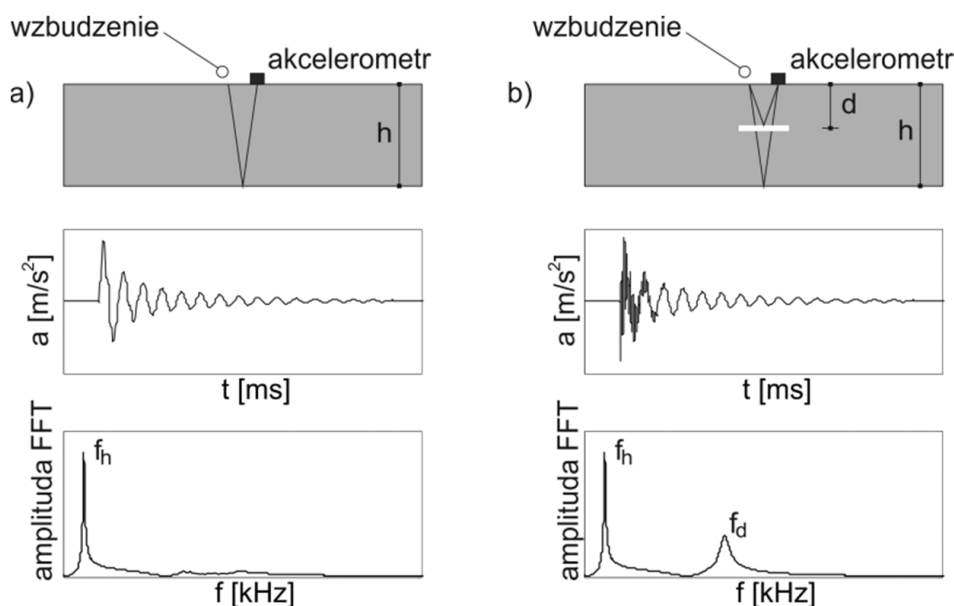
$$f_h = \beta c_p l(2h), \quad (1)$$

gdzie: h jest grubością konstrukcji, c_p oznacza prędkość propagacji fali podłużnej, zaś β jest współczynnikiem zależnym od rodzaju konstrukcji [1].

Jeżeli w badanej konstrukcji znajduje się uszkodzenie, wówczas fala ulega odbiciu zarówno od uszkodzenia jak i przeciwległej powierzchni zewnętrznej (rys. 3b). W takim przypadku na spektrum częstotliwościowym można zaobserwować dwa maksima, jedno o częstotliwości f_h , a drugie o częstotliwości f_d :

$$f_d = \beta c_p l(2d). \quad (2)$$

Ze wzoru (2) można wyznaczyć d czyli głębokość położenia wykrytego uszkodzenia.



Rys. 3. Zasada działania metody młoteczkowej: a) konstrukcja nieuszkodzona; b) konstrukcja z defektem wewnętrznym

3. Diagnostyka uszkodzeń wsporników poprzecznic mostu łukowego

Przedmiotem badań był łukowy wiadukt drogowy w Nowym Dworze Gdańskim nad drogą krajową nr 7 (rys. 4) [7]. Po wykonywaniu, zgodnie z projektem, prac sprężania betonowych wsporników poprzecznic, na bocznych powierzchniach kilku wsporników pojawiły się ubytki powierzchniowe oraz rysy (rys. 5). W celu określenia jednorodności materiału wsporników przeprowadzono badania diagnostyczne z użyciem propagacji fal ultradźwiękowych metodą

przepuszczania. Następnie konstrukcja została poddana procesowi naprawy w formie iniekcji sklejającej popękane strefy wsporników. Badania diagnostyczne przeprowadzono w dwóch etapach: „stan 1” – przed wzmocnieniem oraz „stan 2” – po iniekcji wsporników żywicą epoksydową.



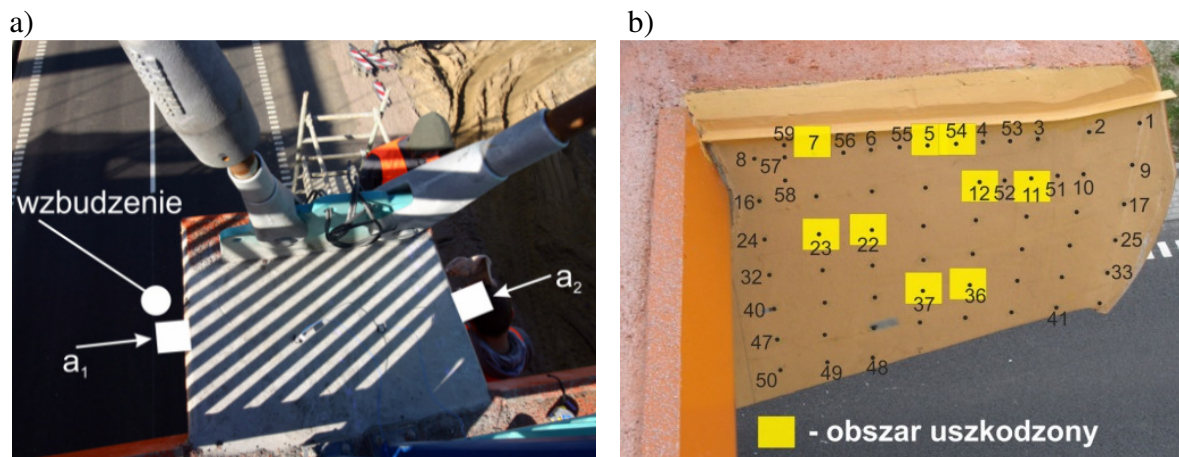
Rys. 4. Most w Nowym Dworze Gdańskim oraz badany wspornik poprzeczny



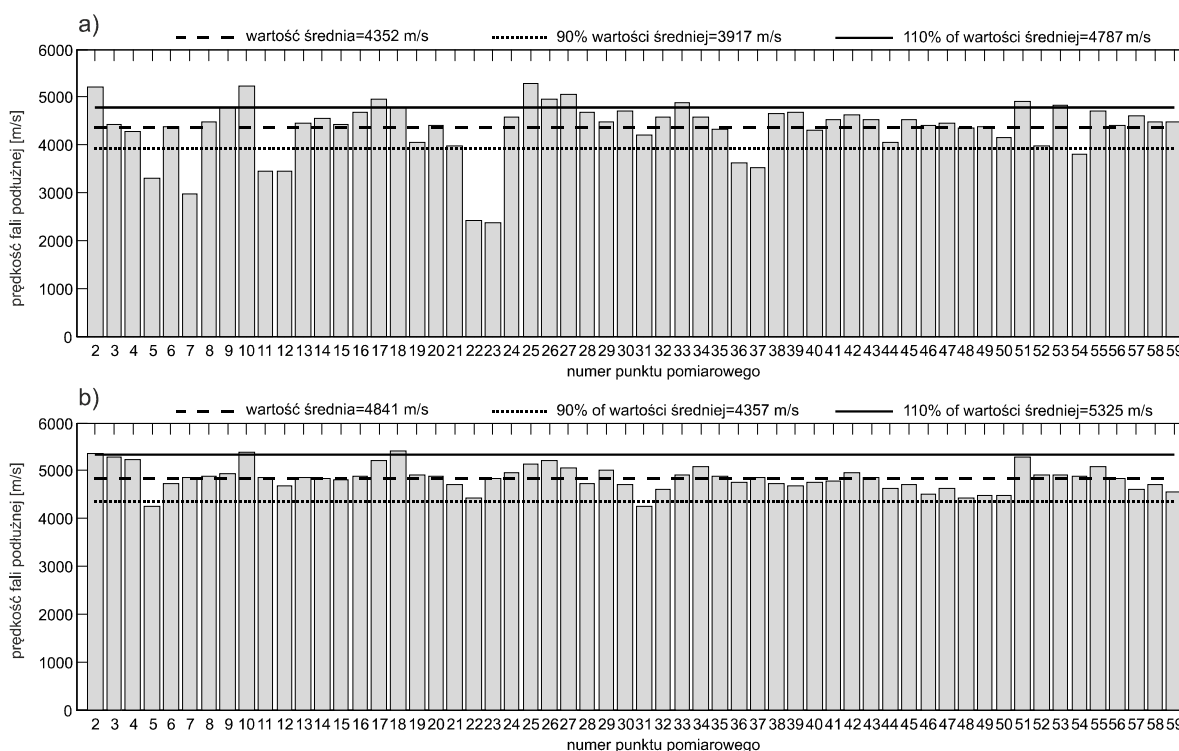
Rys. 5. Wsporniki poprzeczne z uszkodzeniami po sprężeniu kablami

Do pomiarów przebiegów propagujących fal zastosowano dwa akcelerometry wysokoczęstotliwościowe oraz oscyloskop cyfrowy. Wykonano tzw. badanie dwustronne, w którym akcelerometry umieszczono po przeciwległych stronach wspornika, w odległości 0.986 m (rys. 6a). Fale wzbudzono za pomocą impaktora o średnicy 5 mm, co umożliwiło wzbudzenie fal o częstotliwościach do 58.2 kHz. Pomiary wykonano w 59 punktach rozłożonych na powierzchni wspornika (rys. 6b).

Do szczegółowej oceny jednorodności wsporników zastosowano rozkład prędkości propagującej fali. Rozkład prędkości dla przykładowego wspornika pokazano na rys. 7. Prędkość propagacji fali w „stanie 1” (rys. 7a) charakteryzuje się stosunkowo dużą niejednorodnością. Średnia wartość prędkości fali podłużnej wynosiła 4352 m/s. W wyniku badań, jako potencjalne strefy uszkodzeń, zostały wytypowane obszary wokół punktów pomiarowych, dla których zarejestrowana wartość prędkości fali była mniejsza niż 90% wartości średniej. Punkty te (5, 7, 11, 12, 22, 23, 36, 37, 54) zostały zaznaczone na rys. 6b. Wyniki pomiarów po wykonaniu iniekcji zaprezentowane są na rys. 7b. Prędkości propagacji fali wzrosły, i w każdym z punktów zawierały się w zakresie od 88–110% wartości średniej.



Rys. 6. Wspornik poprzeczniczy podczas badań in situ: a) sposób ustawienia czujników podczas pomiaru dwustronnego; b) rozmieszczenie punktów pomiarowych z zaznaczonymi obszarami uszkodzeń zidentyfikowanymi w wyniku badań ultradźwiękowych



Rys. 7. Rozkład prędkości propagacji fal sprężystych dla przykładowego wspornika poprzeczniczy: a) „stan 1” (przed naprawą); b) „stan 2” (po iniekcji)

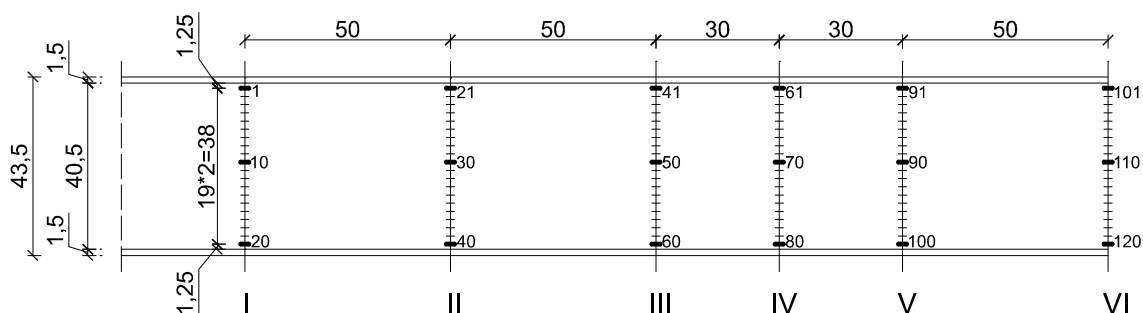
4. Diagnostyka uszkodzeń prefabrykowanej belki mostowej

Badany obiekt to sprężone belki strunobetonowe typu T stanowiące ustrój nośny wiaduktu drogowego nad Autostradą Obwodnicą Torunia (rys. 8a) [8]. W trakcie procesu wznoszenia wiaduktu na środnikach belek pojawiły się pęknięcia i zarysowania (rys. 8b).



Rys. 8. Widok obiektu oraz uszkodzony fragment belki podlegający diagnostyce ultradźwiękowej

Celem pomiarów diagnostycznych było określenie jednorodności betonu oraz rozmiaru występowania strefy zarysowanej w belce strunobetonowej. Pomiarów wykonano na odcinku belki o długości 210 cm. Na odcinku tym wybrano 6 przekrojów (oznaczonych od I do VI na rys. 9), w każdym z przekrojów pomiary wykonywano w 20 punktach. Do wzbudzania fal sprężystych zastosowano impaktor mechaniczny o średnicy głowicy równej 5 mm. Do odbioru fali użyto dwóch akcelerometrów usytuowanych symetrycznie względem linii wzbudzania. Odległość akcelerometrów od linii wzbudzania fali wynosiła 6 cm. Sygnał pomiarowy był rejestrowany za pomocą oscyloskopu cyfrowego z częstotliwością próbkowania 1 MHz. Stanowisko pomiarowe i położenie punktów pomiarowych pokazane jest na rys. 10.



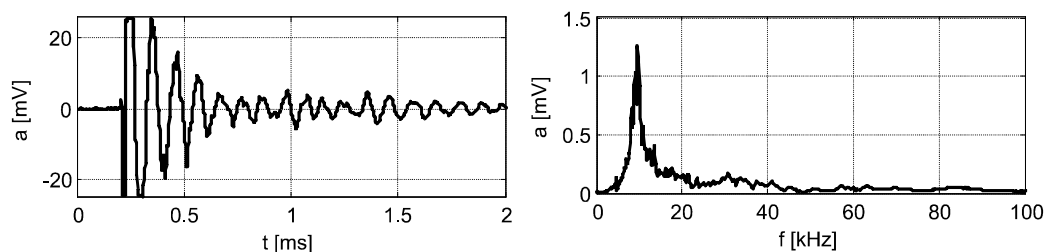
Rys. 9. Badany fragment belki strunobetonowej z wybranymi przekrojami (od I do VI) oraz punktami pomiarowymi (od 1 do 120)



Rys. 10. Stanowisko pomiarowe, położenie punktów pomiarowych względem wymuszenia

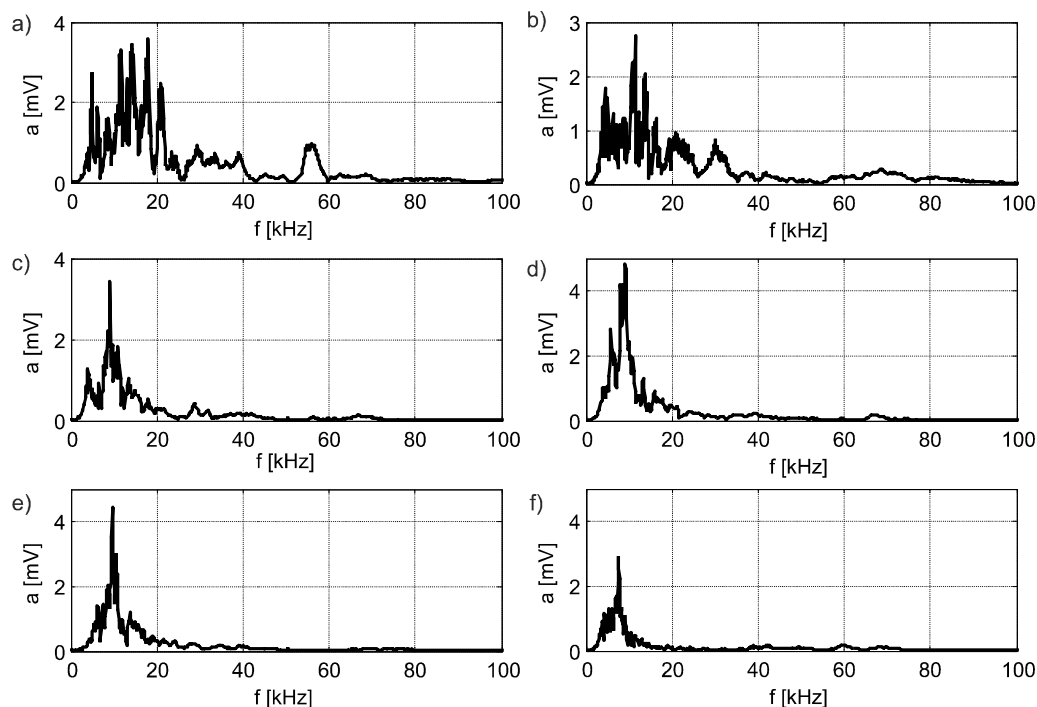
Na rysunkach 11 oraz 12 pokazano wyniki propagujących fal zarejestrowane w przekrojach pomiarowych I oraz III. Przekrój I znajdował się na początku strefy zarysowania, zaś przekrój III w jej środku, gdzie rysa biegnąca poziomo w środku belki była wyraźnie widoczna. Przykładowy sygnał propagującej fali zarejestrowany w punkcie nr 2 prezentuje rys. 11.

Spektrum częstotliwościowe dla wszystkich punktów leżących na linii I (numery punktów od 1 do 20) wskazywały obecność tylko jednego piku o częstotliwości ok. 11 kHz. Częstotliwość ta dla pomierzonej prędkości fali podłużnej równej 5244 m/s odpowiada odbiciu fali na odległości ok. 25 cm.



Rys. 11. Przebieg czasowy oraz transformata Fouriera sygnału pomiarowego w przekroju I (punkt nr 2)

Spektra częstotliwościowe dla punktów pomiarowych rozłożonych wzdłuż linii pomiarowej III (punkty nr 41, 42, 43, 44, 51, 60) pokazane są na rys. 12. Można zaobserwować, że spektra dla punktów pomiarowych znajdujących się w pobliżu powierzchni belki, na której rysa była widoczna, posiadają relatywnie szerokie pasmo odpowiedzi w przedziale od około 5 kHz do 20 kHz (punkty nr 41, 42). Ponadto widoczne są piki przy częstotliwościach 55 kHz i 68 kHz, odpowiadających odbiciu fali na głębokości odpowiednio 4,6 cm i 3,7 cm. Dla punktów położonych w środku belki (punkt nr 51) oraz przy drugiej jej powierzchni (punkt 60) spektrum zarejestrowanej fali ma jeden wyraźny pik, co wskazuje na brak uszkodzeń.



Rys. 12. Transformaty Fouriera sygnałów pomiarowych zarejestrowanych w przekroju III: a) punkt nr 41; b) punkt nr 42; c) punkt nr 43; d) punkt nr 44; e) punkt nr 51; f) punkt nr 60

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono zastosowanie metod ultradźwiękowych do badań diagnostycznych dwóch obiektów mostowych. Opisano dwie techniki pomiarowe. Pierwsza z nich, tzw. metoda

przepuszczania, bazuje na czasie przejścia propagacji fali ultradźwiękowej przez konstrukcję, natomiast druga, tzw. metoda młoteczkowa, wykorzystuje zjawisko powstawania wyższych częstotliwości w sygnałach fal propagujących w uszkodzonych fragmentach konstrukcji.

Technikę przepuszczania wykorzystującą zależność pomiędzy prędkością propagacji fal sprężystych a właściwościami materiałowymi danego ośrodka wykorzystano w diagnostyce nieniszczącej wsporników poprzecznic. Wyniki badań umożliwiły identyfikację stref uszkodzeń w objętości wspornika. Pomiary powtórzone na konstrukcji poddanej procesowi naprawy wykazały wzrost prędkości propagującej fali w uszkodzonych strefach wspornika.

Metoda młoteczkowa zastosowana do diagnostyki belki strunobetonowej typu T umożliwiła określenie strefy zarysowania belki. Badania *in situ* wykazały, że rysy widoczne na bocznych powierzchniach powodują znaczne zmiany w spektrach częstotliwościowych zarejestrowanych w punktach pomiarowych znajdujących się w pobliżu krawędzi belki, na której były widoczne zarysowania. W wyniku badań ustalono, że obserwowane uszkodzenie nie ma charakteru powierzchniowego, lecz propaguje w belce na głębokości do ok. 4 cm.

Literatura

1. Sansalone M.J., Street W.B. Impact Echo. Nondestructive Evaluation of Concrete and Masory, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997.
2. Hoła J., Sadowski Ł., Schabowicz K. Nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with acoustic methods, *Automation in Construction*, 2011, vol. 20, 799–807.
3. Załęgowski K., Piotrowski K., Garbacz A. Diagnostyka konstrukcji betonowych metodą ultradźwiękową pośrednią, *Przegląd Spawalnictwa*, 2014, nr 11 (86), 7–10.
4. Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A. Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych – metoda ultradźwiękowa (cz. I), *Przegląd Budowlany*, 2007, nr 9, 29–36.
5. Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A. Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych – metoda młoteczkowa (cz. II), *Przegląd Budowlany*, 2007, nr 10, 37–42.
6. Rucka M., Wilde K. Experimental study on ultrasonic monitoring of splitting failure in reinforced concrete, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2013, vol. 32, 372–383.
7. Rucka M., Wilde K. Non-destructive diagnostics of concrete cantilever beam and slab by impact echo method, *Diagnostyka*, 2010, vol. 55, 63–68.
8. Mariak M., Rucka M., Wilde K. Diagnostyka ultradźwiękowa mostowej belki prefabrykowanej typu T metodą młoteczkową, *Przegląd Budowlany*, 2014, nr 11, 32–37.
9. Wilde K., Rucka M., Lilla E., Żelazkiewicz J. Impaktor mechaniczno-magnetyczny. Zgłoszenie patentowe PL, 19.03.2014, P.407577.
10. Wilde K., Rucka M., Żelazkiewicz J. Impaktor ciągnowy. Zgłoszenie patentowe PL, 19.03.2014, P.407578.
11. Wilde K., Rucka M., Meronk B., Hirs M. Impaktor piezoelektryczny. Zgłoszenie patentowe PL, 19.03.2014, P.407580.

METHODS OF ULTRASONIC DIAGNOSTICS AND THEIR APPLICATION IN CONCRETE BRIDGE STRUCTURES

Abstract: The aim of the paper is to present benefits of two non-destructive ultrasonic methods for diagnostics of concrete elements of bridge structures. The first method called the transmission technique requires two-sided access to the tested element while the second procedure, called the impact echo method, can be applied when only one side of the element can be approached. These two ultrasonic techniques have been applied to the cantilevers to the bypass bridge of Nowy Dwór Gdański and bridge over the highway bypass of Toruń.

Keywords: non-destructive diagnostics, elastic wave propagation, impact-echo method, concrete structures, bridge structures.