

Diagnostyka ultradźwiękowa mostowej belki prefabrykowanej typu T metodą młoteczkową

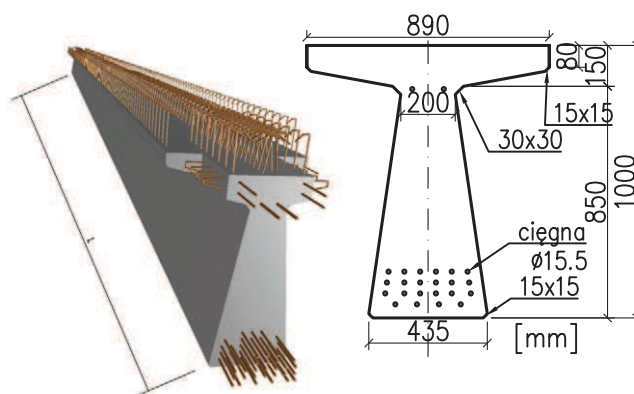
Mgr inż. Aleksandra Mariak, dr hab. inż. Magdalena Rucka, prof. dr hab. inż. Krzysztof Wilde, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska

1. Wprowadzenie

Zastosowanie prefabrykacji w budowie obiektów mostowych pozwala optymalizować zużycie energii i materiałów i tym samym redukować koszty budowanego obiektu. Prefabrykowane belki sprężone mogą występować jako elementy kablobetonowe wykonywane bezpośrednio na placu budowy lub powstawać w zakładzie prefabrykacji jako elementy strunobetonowe [1]. Elementy prefabrykowane wytwarzane w warunkach przemysłowych muszą spełniać wymagania wysokiej trwałości, zapewniać należyte właściwości użytkowe oraz estetyczne. Uszkodzenia w prefabrykowanych belkach mostowych mogą powstawać na etapie produkcji, w trakcie transportu lub ich montażu i mogą mieć charakter trudno dostrzegalnych rys o małych rozwarościach. Niniejszy artykuł poświęcony jest detekcji stref zarysowań mostowej belki strunobetonowej typu T metodą młoteczkową. Badania diagnostyczne, bazujące na zjawisku propagacji fal ultradźwiękowych, są szczególnie atrakcyjne przy diagnostyce elementów konstrukcyjnych już zamontowanych w obiekcie budowlanym ze względu na ich nieinwazyjny charakter.

2. Mostowe belki prefabrykowane typu T

Stosowanie elementów prefabrykowanych stanowi potwierdzenie wysokiego stopnia zaawansowania technologicznego danego kraju [5]. Produkcja wielkogabarytowych elementów prefabrykowanych najczęściej jest wykonywana w wytwórniach stałych. Pierwszy udokumentowany w Polsce projekt prefabrykowanej strunobetonowej belki sprężonej typu T na potrzeby mostowe został zrealizowany w firmie Mosty-Łódź w roku 2002. Pierwotny projekt prefabrykatu został zmodyfikowany w 2005 r. poprzez redukcję liczby cięgien i zwiększenie siły sprężającej. Obecnie produkowane belki T udoskonalono w 2010 r., tak by spełniały wymagania norm europejskich [1].



Rys. 1. Rysunek prefabrykatu, wymiary belki T 24 [2]

W przekroju poprzecznym belki mają kształt litery T (rys. 1). Półka górna ma stałą szerokość wynoszącą 89 cm, a jej grubość jest zmienna i wynosi od 8 cm na krawędzi do 15 cm na połączeniu ze środkiem. Belki typu T rozmieszczone w rozstawie 0,9 m stanowią ustrój nośny w konstrukcjach zespolonych typu beton prefabrykowany/beton na mokro. Projektowane są na obciążenie ruchome kl. A wg PN-85/S-10030 oraz na obciążenie pojazdem specjalnym klasy 150 [2, 3]. Zgodnie z raportem GDDKiA struktura zmian obiektów mostowych w latach 2007-2013 wyraźnie wskazuje na wzrost wykorzystania betonu sprężonego jako głównego materiału konstrukcyjnego obiektów mostowych. W roku 2007 konstrukcje z betonu sprężonego stanowiły 39,5% obiektów mostowych, a w roku 2013 już 57,5% [4]. Biorąc pod uwagę zwiększone wykorzystanie prefabrykacji w budownictwie infrastrukturalnym niewątpliwie ważnym aspektem jest właściwe przygotowanie elementów prefabrykowanych oraz kontrola ich jakości zarówno w wytwórni, jak i bezpośrednio na placu budowy.

2.1. Produkcja elementów prefabrykowanych

Proces wykonania elementów prefabrykowanych składa się, w uproszczeniu, z następujących czynności

technologicznych: przygotowanie formy, zbrojenie, formowanie, dojrzewanie i rozformowanie (rys. 2). W produkcji elementów strunobetonowych występują dodatkowe, specjalistyczne działania, związane z koniecznością wprowadzenia naprężeń sprężających w uformowanym i stwardniałym elemencie betonu. Faza dojrzewania betonu dokonuje się w czterech etapach: wstępne wiązanie betonu w temperaturze pokojowej, podnoszenie temperatury, nagrzew izotermiczny, studzenie elementów. Przy wykonywaniu elementów strunobetonowych wymagane jest osiągnięcie wytrzymałości 28-dniowej przed sprężeniem elementów i rozformowaniem. W fazie rozformowania dochodzi dodatkowo zwolnienie naciągu strun [6].



Rys. 2. Belka T po wyjęciu z formy [2]

2.2. Składowanie i transport

Belki powinny być składowane w pozycji poziomej (rys. 3). Niedopuszczalne jest ustawienie belki w pozycji pochylonej z powodu możliwości przewrócenia i zniszczenia belki. Podczas składowania belka powinna być podparta na krawędziakach drewnianych położonych tak, aby dolna płaszczyzna stopki dolnej przylegała do krawędziaka na całej szerokości półki i tym samym nie wywoływała w prefabrykacie nieprzewidzianych w dokumentacji projektowej



Rys. 3. Składowanie prefabrykatów [3]

momentów zginających. Prefabrykaty powinny być składowane w warunkach wysokiej wilgotności względnej, nie dłużej niż 90 dni od momentu produkcji do momentu wbudowania.

Przy transporcie prefabrykatów należy przestrzegać ściśle określonych zasad. Elementy można transportować po osiągnięciu przez beton co najmniej 80% wytrzymałości projektowej. Podczas przestawiania elementów, ich transportu i montażu (rys. 4) niedopuszczalne są uderzenia i wstrząsy mogące spowodować mechaniczne uszkodzenia krawędzi. Podczas przenoszenia prefabrykat powinien być zawieszony na wystających z niego hakach przewidzianych w dokumentacji projektowej (por. np. [7]). Często przyczyną uszkodzeń belek sprężonych bywa transport i składowanie niezgodne z podanymi powyżej wymaganiami oraz niewłaściwy montaż.



Rys. 4. Montaż ustroju nośnego [2]

2.3. Kontrola jakości

Kontrola prefabrykowanych belek strunobetonowych odbywa się w wytwórni. Polega ona na sprawdzeniu rodzaju i gatunku materiałów użytych do wyprodukowania belki oraz gotowych prefabrykatów na podstawie dokumentacji belek (atesty, protokoły odbioru itp.) na zgodność z normami przedmiotowymi i dokumentacją projektową. Na placu budowy kontroli podlegają: ogólny wygląd prefabrykatu oraz wartości odchyłek wymiarów, które porównywane są z ich dopuszczalnymi wartościami. Powierzchnia elementów prefabrykowanych powinna być gładka, a nierówności oraz ubytki nie powinny przekraczać podanych odchyłek. Pęknięcia i rysy na powierzchni elementów z betonu sprężonego są niedopuszczalne. Pustki, raki i wykuszyny w elementach prefabrykowanych są dopuszczalne w granicach podanych w normach PN-91/S-10042 [8] i PN-S-10040:1999 [9] dla elementów żelbetowych. Wytrzymałość betonu w prefabrykacie powinna odpowiadać założonej w dokumentacji projektowej klasie betonu. Beton prefabrykatów musi spełniać wymagania STWiORB [7].

3. Metoda młoteczkowa

Metoda młoteczkowa (ang. IE – Impact Echo) należy do nieniszczących metod diagnostycznych umożliwiających szybką ocenę jakości betonu, bez mechanicznej

ingerencji w strukturę badanego materiału [10-14]. Metoda młoteczkowa wykorzystuje zjawisko rozchodzenia się fal sprężystych wzbudzanych mechanicznie na powierzchni badanego ciała. Wygenerowane fale propagują wewnątrz betonu i ulegają odbiciu od ewentualnych wewnętrznych wad lub jego zewnętrznych powierzchni. Na podstawie analizy zarejestrowanych przyspieszeń przetransformowanych do dziedziny częstotliwości jest możliwa ocena jednorodności betonu i lokalizacja położenia ewentualnych wewnętrznych nieciągłości struktury.

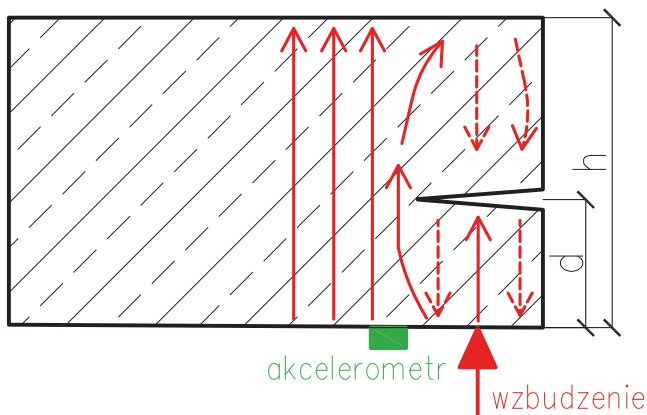
Schemat działania metody młoteczkowej pokazano na rysunku 5. Przy pomiarze jednostronnym analiza spektrum częstotliwościowego sygnału pozwala na lokalizację potencjalnych uszkodzeń przy założeniu znajomości prędkości propagacji fali podłużnej. Zależność pomiędzy częstotliwością odbicia f_h od tzw. dna próbki a prędkością fali podłużnej c_p jest następująca:

$$f_h = \frac{\beta c_p}{2h} \quad (1)$$

gdzie h oznacza droga przejścia fali. Współczynnik β używany jest do korekcji prędkości fali i zazwyczaj przyjmuje się go jako 0,96 [14]. Jeżeli w badanej strukturze w pewnej lokalizacji pojawia się uszkodzenie, na wykresie częstotliwościowym powstaje nowy pik o częstotliwości f_d :

$$f_d = \frac{\beta c_p}{2d} \quad (2)$$

na podstawie którego można wyznaczyć głębokość położenia uszkodzenia d .



Rys. 5. Schemat poglądowy metody młoteczkowej

4. Diagnostyka belki strunobetonowej wiaduktu drogowego

4.1. Obiekt badań

Przedmiotem badań był jednoprzęsłowy wiadukt drogowy nad autostradą obwodnicą Torunia (rys. 6). Ustrój nośny stanowią sprężone belki strunobetonowe

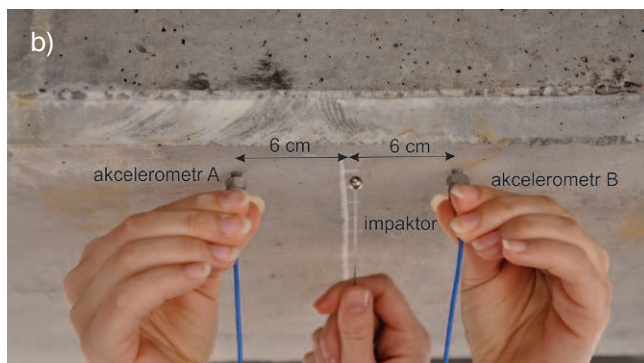
typu T o długości 24 m. W trakcie procesu budowlanego na środku belki pojawiły się zarysowania i pęknięcia. Pomiar diagnostyczny dotyczył określenia jednorodności betonu oraz rozmiaru występowania strefy zarysowanej w belce strunobetonowej. Belka T była badana na odcinku długości 210 cm. W strefie tej, na zewnętrznej powierzchni belki widoczne były rysy (rys. 6) [15].



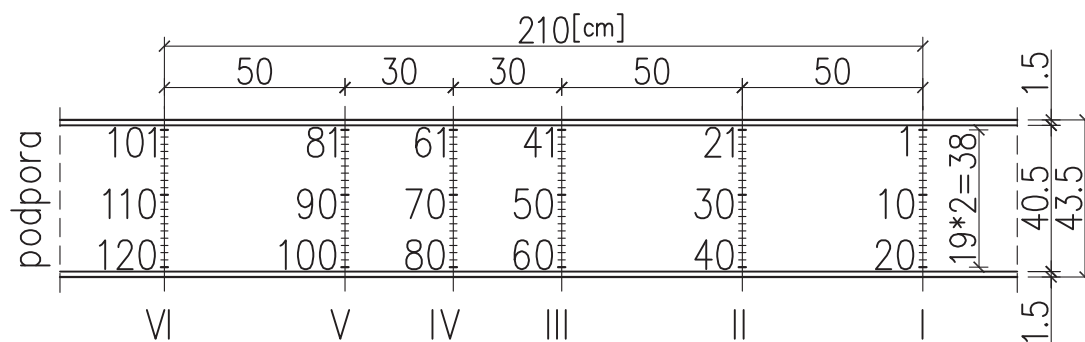
Rys. 6. Widok obiektu z zaznaczonym fragmentem belki podlegającym badaniu

4.2. Badania in situ

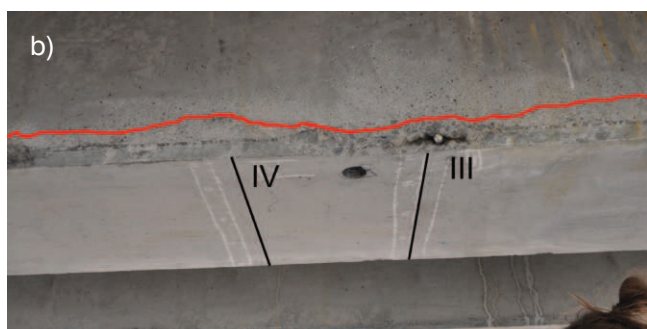
Pomiary ultradźwiękowe wykonano z zastosowaniem metody badania jednostronnego polegającej na wzbudzeniu fali i pomiarze sygnałów w tym samym miejscu konstrukcji. Do wzbudzania fal sprężystych zastosowano impaktor mechaniczny o średnicy głowicy równej



Rys. 7. a) stanowisko pomiarowe; b) położenie punktu wymuszenia względem punktów pomiarowych



Rys. 8. Ustawienie do pomiaru jednorodności betonu w belce: punkty pomiarowe (1 do 120) ułożone wzdłuż linii pomiarowych I do VI



Rys. 9. Belka strunobetonowa od spodu: a) punkty pomiarowe (1 do 20) rozłożone wzdłuż linii I; b) punkty pomiarowe (41 do 60) rozłożone wzdłuż linii III oraz punkty (61 do 80) rozłożone wzdłuż linii IV; c) punkty pomiarowe (81 do 100) rozłożone wzdłuż linii V

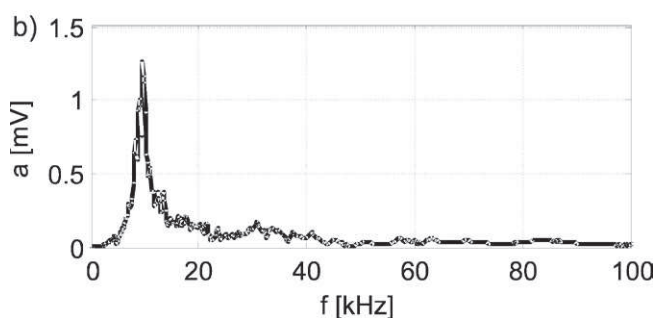
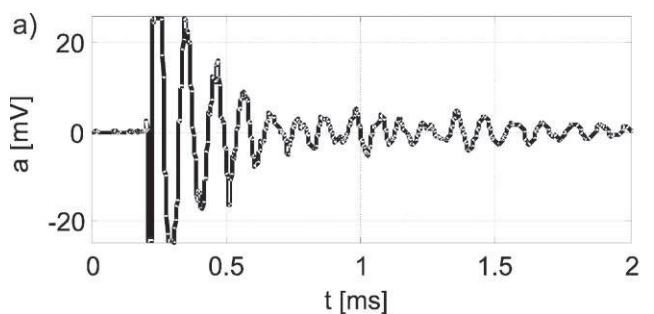
5 mm umożliwiającą generację fal sprężystych o częstotliwości do 58 kHz. Do odbioru fali użyto dwa akcelerometry wysokoczęstotliwościowe PCB Piezotronics M352A60 usytuowane symetrycznie względem linii wzbudzenia. Odległość akcelerometrów od linii wzbudzenia

fal wynosiła 6 cm (rys. 7). Sygnał pomiarowy był rejestrowany z częstotliwością próbkowania 1 MHz za pomocą oscyloskopu ScopeDAQ12.

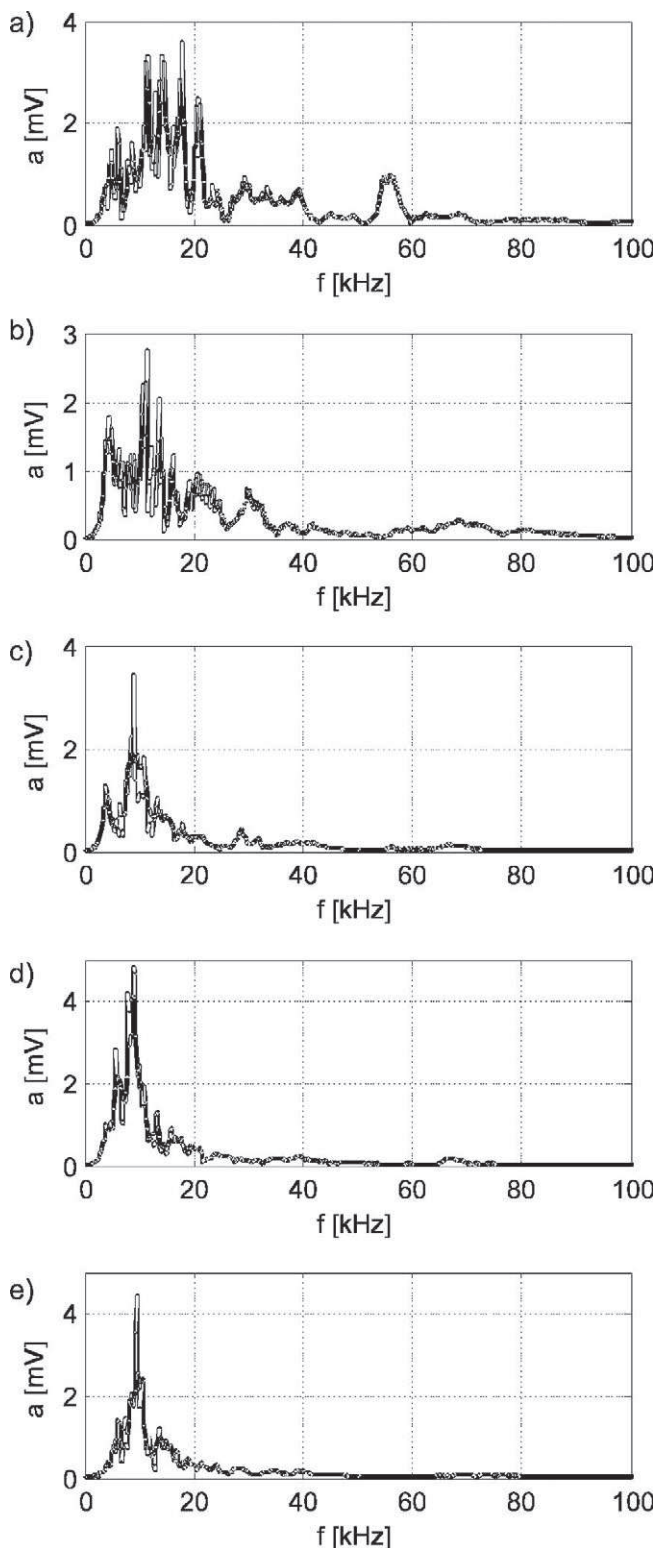
Na belce strunobetonowej wybrano 6 przekrojów, w których wykonano pomiary propagacji fal sprężystych. Łączna liczba punktów pomiarowych wyniosła 120 (rys. 8). Przekrój VI znajdował się 278 cm od podpory. Przekroje I i VI znajdowały się na początku i końcu strefy zarysowania, zaś przekroje III, IV i V w części środkowej, w której rysa biegnąca poziomo do spodu belki była wyraźnie widoczna (rys. 9).

4.3. Wyniki badań

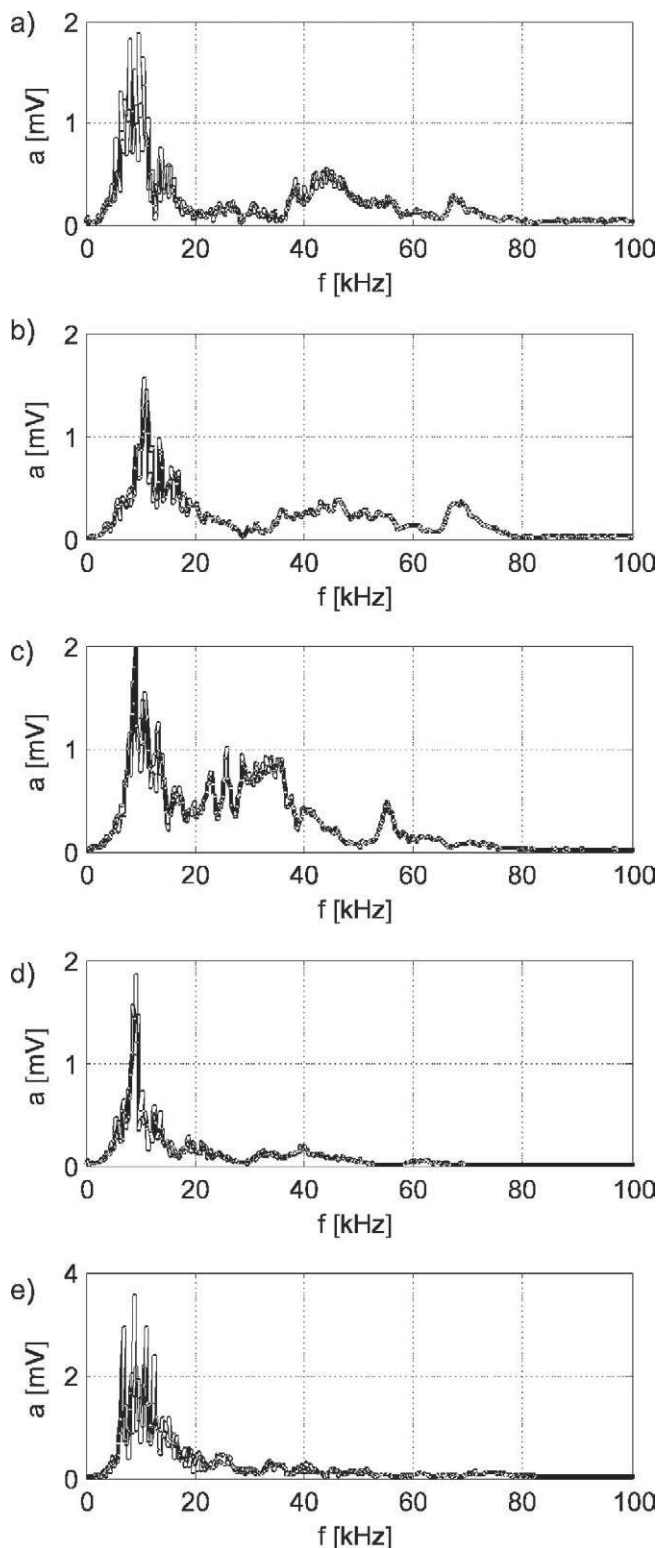
Prędkość fali podłużnej w betonie belki T zbadano z wykorzystaniem pomiaru przejścia fali ultradźwiękowej przez szerokość belki (43 cm). Na podstawie uśrednienia z 5 pomiarów czas przejścia przez belkę wynosił 82 μ s, co odpowiada prędkości fali $c_p = 5244$ m/s. Przykładowy sygnał propagującej fali zarejestrowany w punkcie nr 2 oraz jego transformatę Fouriera przedstawiono na rysunku 10. Spektra częstotliwościowe dla wszystkich punktów pomiarowych leżących na linii I,



Rys. 10 Transformata Fouriera sygnału pomiarowego w przekroju I: punkt nr 2



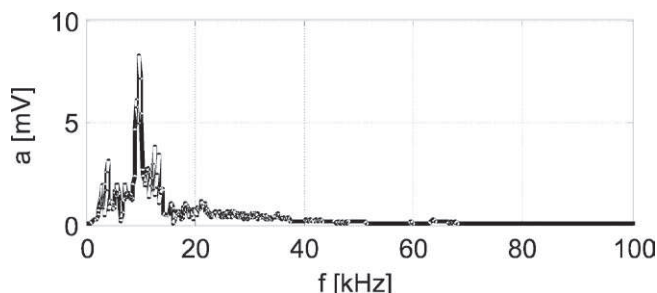
Rys. 11 Transformaty Fouriera sygnałów pomiarowych w przekroju III: a) punkt nr 41; b) punkt nr 42; c) punkt nr 43; d) punkt nr 44; punkt nr 51



Rys. 12 Transformaty Fouriera sygnałów pomiarowych w przekroju IV: a) punkt nr 61; b) punkt nr 62; c) punkt nr 63; d) punkt nr 64; punkt nr 71

zarówno na brzegu belki, jak i w jej środku wykazywały jeden wyraźny pik o częstotliwości ok. 10 kHz, co odpowiada odbiciu fali na dystansie ok. 25 cm. Rysunek 11 pokazuje wyniki propagującej fali w domenie częstotliwości dla punktów pomiarowych nr 41, 42,

43, 44 oraz 51, znajdujących się wzdłuż linii pomiarowej III. Widoczne jest, iż wykresy w punktach pomiarowych znajdujących się w pobliżu brzegów belki zawierają relatywnie szerokie spektrum odpowiedzi w przedziale od około 5 kHz do 20 kHz (punkty nr 41, 42). Dodatkowo



Rys. 13 Transformata Fouriera sygnału pomiarowego w przekroju I: punkt nr 2

dla punktów na brzegach widoczne są niezerowe amplitudy dla częstotliwości 55 kHz i 68 kHz, odpowiadających odbiciu fali na głębokości odpowiednio 4,6 cm i 3,7 cm. W przypadku punktów położonych w środku belki (punkt nr 51) spektrum odpowiedzi ma jeden wyraźny pik. Na podstawie uzyskanych wykresów można stwierdzić, iż obserwowane uszkodzenie nie ma charakteru powierzchniowego, lecz propaguje w belce na głębokości ok. 4 cm.

Podobne zależności pomiędzy występowaniem rysy a zobrazowaniem sygnałów w dziedzinie częstotliwości można zaobserwować dla punktów położonych wzdłuż linii IV (rys. 12). Na wysokości linii pomiarowej IV szacunkowa głębokość rysy wynosi ok. 6 cm.

Na rysunku 13 widoczna jest odpowiedź spektralna propagującej fali zarejestrowana w punkcie nr 82 położonym wzdłuż linii pomiarowej V. Na spektrum widoczny jest jeden wyraźny pik przy częstotliwości ok. 10 kHz. Relatywnie wąskie spektrum w zakresie bazowej częstotliwości oraz brak wyższych składowych wskazują, iż rysa w przekroju V ma zasięg mniejszy niż 2 cm.

5. Podsumowanie

Zastosowana ultradźwiękowa metoda młoteczkowa do diagnostyki mostowej belki strunobetonowej typu T umożliwiła określenie strefy zarysowania belki za pomocą nieniszczących badań wykonanych bezpośrednio na obiekcie.

Badania in situ wykazały, iż rysy widoczne na bocznych ściankach powodują znaczne zmiany w spektrach częstotliwościowych w punktach pomiarowych znajdujących się w pobliżu krawędzi belki, na której, widoczne były zarysowania. Odpowiedź częstotliwościowa w punktach pomiarowych znajdujących się w środkowej strefie belki miała, dla większości pomiarów, charakter jednego wyraźnego piku. Oznacza to, że fala sprężysta, w tych miejscach pomiarowych, propagowała bez przechodzenia przez strefy uszkodzone. Badania wykazały, iż widoczne na bocznej ściance belki rysy miały szacunkową głębokość wynoszącą około 6-8 cm. Należy jednak pamiętać, że dokładność uzyskiwana z nieniszczącej diagnostyki ultradźwiękowej jest obciążona błędami pomiarowymi. Zastosowana metoda diagnostyki

nie umożliwia precyzyjnego wyznaczenia rozwartości rysy po jej długości (propagacji rysy do wnętrza belki), ale umożliwia szacunkową lokalizację stref, w których degradacja mechaniczna betonu wpływa na charakter spektrów częstotliwościowych zarejestrowanych sygnałów propagujących fal.

Przeprowadzone badania nie wykazały występowania wewnątrz belki strunobetonowej znaczących pustek powietrznych, które powodowałyby widoczne zaburzenia propagacji fal sprężystych w strefie 40 cm od spodu średnika belki. Uzyskana prędkość propagacji fali sprężystej o wartości 5243.9 m/s wskazała na bardzo dobrą jakość betonu. Podobne charakterystyki spektrów częstotliwościowych w strefach oddalonych od widocznych rys, świadczą o jednorodności betonu.

Przeprowadzone badania nie umożliwiają stwierdzenia, co było przyczyną powstania rys. Zdaniem autorów badań wykryte strefy zarysowania nie miały znaczącego wpływu na nośność badanej belki i całego ustroju nośnego mostu, a zalecane prace naprawcze powinny obejmować zabezpieczenie rys poprzez iniekcję ciśnieniową żywicami.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cieśla J., Biskup M., Gałat A., Skawiński M., Prefabrykowane belki mostowe z betonu sprężonego w Polsce – historia i stan obecny *Przegląd Budowlany* 4: 19-26, 2013
- [2] www.pw-comfort.com.pl
- [3] www.sibet.com.pl
- [4] www.gddkia.gov.pl
- [5] Adamczewski G., Nicał A., Wielkowiedmiarowe prefabrykowane elementy z betonu. *Inżynier Budownictwa* 3: 46-53, 2012
- [6] Cieszyński K., *Procesy podstawowe w produkcji prefabrykatów betonowych*. PWN, Warszawa 1987
- [7] Specyfikacja Techniczna Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych M.13.03.04: Belki prefabrykowane, sprężone, typu T. Budowa Drogi Głównej Południowej na odcinku od DW933 – ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju do węzła autostrady A1 w Mszanie – etap II. Mosty Katowice Sp. z o. o. 2011
- [8] PN-91/S-10042 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie
- [9] PN-S-10040:1999 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Wymagania i badania
- [10] Hoła J., Stawski B., Badania przydatności metody ultradźwiękowej do szybkiej oceny jakości konstrukcji wykonanych z betonu. 32 Krajowa Konferencja badań Nieniszczących, Międzyzdroje 2003, s. 111-114
- [11] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych-metoda ultradźwiękowa (cz. I). *Przegląd Budowlany* 9: 29-36, 2007
- [12] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych-metoda młoteczkowa (cz. II). *Przegląd Budowlany* 10: 37-42, 2007
- [13] Rucka M., Wilde K., Non-destructive diagnostics of concrete cantilever beam and slab by impact echo method. *Diagnostyka* 3 (55): 63-68, 2010
- [14] Sansalone M.J., Street W.B. *Impact Echo. Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997
- [15] Mariak A., Rucka M., Wilde K., Ultrasonic diagnostics of concrete T-beams used in bridge structures. *Proceedings of the 4th German-Polish PhD Symposium: Current Scientific Challenges in Concrete and Steel Structures, Material Technology and Structural Fire Protection*, July 02-05, 2014, Kaiserslautern, pp. 105-113