

Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych

– metoda młoteczkowa (cz. II)

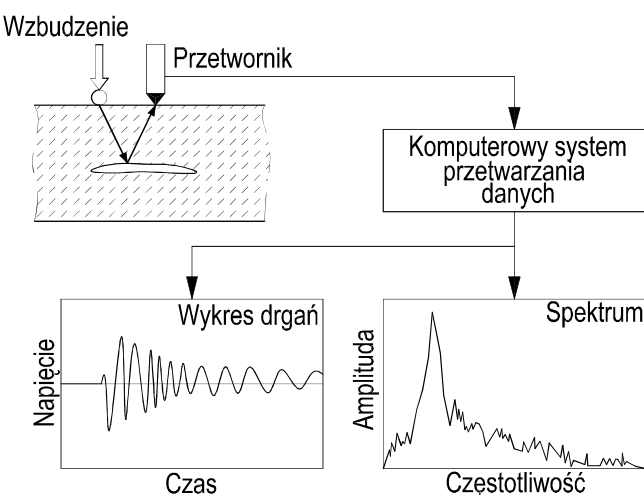
Dr inż. Łukasz Drobiec, dr inż. Radosław Jasiński, dr inż. Adam Piekarczyk,
Politechnika Śląska, Gliwice

Metoda młoteczkowa jest jedną z odmian nieniszczących impulsowych metod diagnostycznych konstrukcji betonowych. Jest to metoda nowsza od metody ultradźwiękowej, dlatego mniej rozpowszechniona i znana, szczególnie w naszym kraju.

W artykule przedstawiono podstawy funkcjonowania metody młoteczkowej oraz wybrane przykłady jej zastosowań.

1. Wprowadzenie

W nieniszczących badaniach diagnostycznych obiektów betonowych wykorzystuje się w zasadzie dwie odmiany metod impulsowych, czyli metodę ultradźwiękową [17] oraz metodę młoteczkową. Metoda młoteczkowa jest odpowiednikiem metody echa używanej w diagnostyce budowlanej z zastosowaniem ultradźwięków.



Rys. 1. Ideowy schemat pomiaru metodą Impact-Echo [1]

W pierwszej połowie lat 80. ubiegłego stulecia w U.S. National Bureau of Standards opracowano podstawy teoretyczne i skonstruowano aparaturę

diagnostyczną bazującą na wykorzystaniu zjawiska rozchodzenia się oraz odbicia fal mechanicznych w ciałach stałych. Metodzie nadano nazwę Impact-Echo (IE), sygnalizując w ten sposób ideę jej funkcjonowania. Rozwojem metody IE zajmowali się później naukowcy z Cornell University w USA [1], [2], [3].

Za pomocą metody IE można dokonywać pomiarów grubości obiektów betonowych przy dostępie jednostronnym [4], [5], [6], [7], lokalizować nieciągłości i rozwarstwienia [5], [6], [7], [8], [9], [10], wykrywać wady w iniekcji kanałów kablowych w konstrukcjach sprężonych [4], [5], [6], [7], [11], [12], [13] oraz szacować głębokości zarysowań [14].

Badania metodą IE można prowadzić na płytach, belkach, słupach o przekroju prostokątnym i kołowym [15] oraz na elementach o przekroju pierścieniowym (rury betonowe, tunele, szyby i zbiorniki).

2. Podstawy teoretyczne metody młoteczkowej

Opisywana metoda wykorzystuje zjawisko propagacji fal mechanicznych w ciałach stałych wzbudzanych, inaczej niż w metodzie ultradźwiękowej, poprzez uderzenie w powierzchnię badanego obiektu specjalnego rodzaju młoteczka – stąd określenie metody młoteczkowej.

Lokalizacja nieciągłości struktury betonu opiera się na metodzie echa fal odbitych na granicy ośrodków o różnej akustycznej oporności falowej, najczęściej granicy beton – powietrze. Fale odbite powracające do powierzchni, na której doszło do ich wzbudzenia zostają zarejestrowane i przetworzone oraz zobrażone w postaci spektrum częstotliwościowego. W metodzie IE poddaje się analizie przede wszystkim uzyskane spektrum częstotliwościowe echa fal odbitych, czyli inaczej niż zwykle ma to miejsce w metodzie ultradźwiękowej, gdzie analizuje się zmiany prędkości (czasu) propagacji fal.

Uproszczony schemat funkcjonowania metody IE przedstawia rysunek 1 (wg [1]).

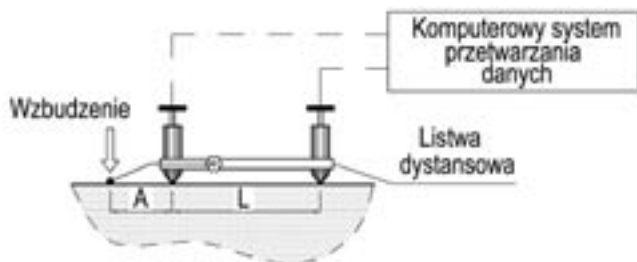
Wzbudzenie fal uzyskane poprzez uderzenie o powierzchnię badanego obiektu młoteczka (stalowej kulki o odpowiednio dobranej średnicy), generuje fale mechaniczne o pewnej częstotliwości, które rozchodzą się w postaci drgań podłużnych L, poprzecznych T oraz powierzchniowych fal Rayleigha. Fale ulegają odbiciu od wewnętrznych nieciągłości struktury oraz, w niektórych przypadkach, od dna badanego obiektu. Drgania powierzchni elementu wywołane powrotem fal odbitych rejestrowane są przez specjalny, umieszczony blisko miejsca wzbudzenia fal mechanicznych, przetwornik piezoelektryczny o wysokiej czułości. Wartości amplitud zarejestrowanych drgań (zmian napięcia prądu w przetworniku) w funkcji czasu poddawane są transformacji do postaci spektrum częstotliwościowego i przedstawiane w postaci wykresu na ekranie komputera lub na wydruku.

Odbicie fal mechanicznych od wewnętrznych wad lub dna badanej konstrukcji prowadzi do powstania charakterystycznych pików wartości amplitud na wykresie spektrum.

Diagnostyka konstrukcji betonowych przy użyciu metody IE wymaga określenia prędkości rozchodzenia się fal mechanicznych w badanym obiekcie. Wykorzystuje się trzy sposoby wyznaczania wartości C_L . Najczęściej dokonuje się bezpośredniego pomiaru czasu przejścia czoła fali podłużnej po badanej powierzchni obiektu. Mierzy się czas potrzebny na przejście czoła fali pomiędzy dwoma przetwornikami piezoelektrycznymi umieszczonymi w ustalonym rozstawie L (najczęściej 300 mm) – rys. 2. Prędkość propagacji fali podłużnej oblicza się jako iloraz odległości dzielącej odbiorniki i różnicy czasu pomiędzy odbiornikami zarejestrowanej przed czołem fali podłużnej.

$$C_L = \frac{L}{t_2 - t_1}$$

gdzie: L – rozstaw przetworników piezoelektrycznych, t_2, t_1 – czas rejestracji sygnału przez odbiornik 2 i 1. Odległość miejsca wzbudzenia od pierwszego czujnika ustala się tak, aby droga przebyta przez falę podłużnej (o największej prędkości) od podążających za nią fal poprzecznych i Rayleigha. Wystarczającym dystansem jest zwykle 150 mm.



Rys. 2. Sposób bezpośredniego pomiaru prędkości propagacji fali podłużnej

Prędkość propagacji fal podłużnych można również oszacować na podstawie bezpośredniego pomiaru prędkości powierzchniowych fal Rayleigha. Błąd pomiaru w tym przypadku może okazać się jednak większy niż przy pomiarze prędkości czoła fali podłużnej. W celu określenia prędkości fali podłużnej na podstawie pomiaru fali powierzchniowej, niezbędna jest znajomość współczynnika Poissona. Przy współczynniku $\nu = 0,18$ zachodzi zależność $C_L = 1,76 C_R$. Sposób określenia prędkości fali powierzchniowej jest identyczny jak przy pomiarze prędkości podłużnej. Dystans między czujnikami ustala się zwykle na 200 mm, natomiast odległość punktu wzbudzenia od pierwszego odbiornika fal wynosi 50 mm.

Prędkość fal podłużnych można określić również wykonując badania obiektu o znanej grubości (w miejscu nie zawierającym żadnych wewnętrznych nieciągłości). Na podstawie znajomości częstotliwości, przy której uzyskano maksymalną wartość amplitudy, prędkość propagacji fal podłużnych można wówczas wyznaczyć ze wzoru:

$$C_L = \frac{2f_T T}{\beta}$$

gdzie: f_T – częstotliwość odpowiedzi elementu o grubości T ,

T – znana grubość obiektu,

β – współczynnik kształtu elementu.

3. Aparatura pomiarowa

W skład produkowanych zestawów urządzeń badawczych wchodzi zwykle komplet młoteczków w postaci kulek o różnej średnicy, wykonanych z utwardzonej stali i umieszczonych na końcu sprężystych ramion, komputer przenośny z zainstalowanym specjalistycznym oprogramowaniem, analogowo-cyfrowe urządzenie dyskretyzujące sygnał (napięcie–czas), odpowiednie okablowanie oraz przetworniki piezoelektryczne. Fotografie kompletów aparatury badawczej pokazano na rysunku 3.

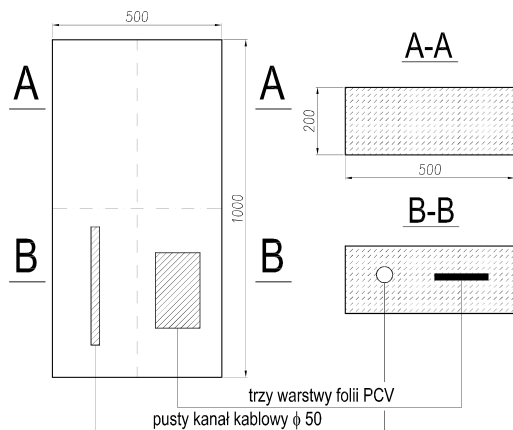


Rys. 3. Przykłady zestawów urządzeń wykorzystywanych w metodzie młoteczkowej IE [M-1], [M-2]

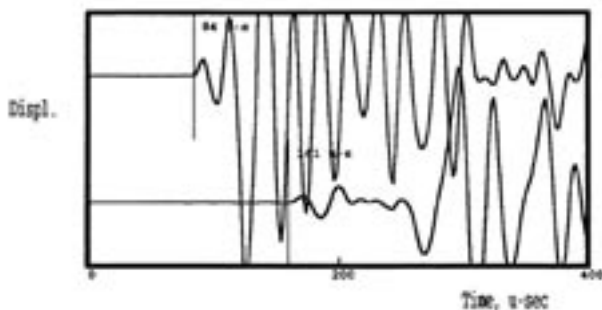
Na rysunku 4 przedstawiono różne typy przetworników piezoelektrycznych, które zamieniają drgania powierzchni obiektu wywołane powracającymi falami



Rys. 4. Wykorzystywane w metodzie IE przetworniki piezoelektryczne



Rys. 5. Model płyty z symulowanymi wadami betonu



Rys. 6. Wynik pomiaru prędkości fali podłużnej w płycie

odbitymi, na prąd elektryczny o napięciu proporcjonalnym do wartości amplitudy zarejestrowanych drgań. Przetwornik cylindryczny (rys. 4a) może być wykorzystywany w wąskich i trudno dostępnych przestrzeniach. Pistoletowy przetwornik pokazany na rysunku 4b nadaje się przede wszystkim do badań powierzchni płaskich. Dwugłowicowy przetwornik o rozstawie czujników 300 mm służy do określania prędkości propagacji czoła fali podłużnej metodą bezpośrednią. Kryształ piezoelektryczny zlokalizowany jest w wierzchołku głowicy czujnika. Przetwornik zawiera wbudowany przedwzmacniacz sygnału zasilany z baterii znajdujących się w jego obudowie.

4. Wybrane przykłady badań prowadzonych metodą Impact-Echo

Poniżej opisano wyniki badań wykonanych metodą młoteczkową IE na specjalnie w tym celu wykonanych

modelach [5], [6], [7] oraz rzeczywistych obiektach budowlanych.

4.1. Badania grubości płyty przy dostępie jednostronnym

Pomiar grubości przy dostępie jednostronnym wykonano na modelu płyty o nominalnej grubości 200 mm wykonanej z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie $f_{c,cube} = 33,5$ MPa. W płycie pokazanej na rysunku 10 zasymulowano pustki oraz rozwarstwienia betonu. Badanie grubości przeprowadzono oczywiście na obszarze modelu bez symulowanych nieciągłości. W pierwszej kolejności wyznaczono prędkość propagacji fal podłużnych w płycie. Użyto metody bezpośredniego pomiaru czasu przejścia czoła fali pomiędzy dwoma rozmieszczonymi w odległości 300 mm czujnikami. Na rysunku 6 pokazano uzyskane wykresy drgań. Różnica czasu pomiędzy rejestracją fali podłużnej przez czujniki wyniosła $t_2 - t_1 = 161 - 84 = 77 \mu s$. Na tej podstawie obliczono prędkość fali podłużnej:

$$C_L = \frac{L}{t_2 - t_1} = \frac{0,3}{77 \cdot 10^{-6}} = 3896 \text{ m/s}$$

Na rysunku 7 pokazano spektrum częstotliwościowe echa wzbudzonej fali.

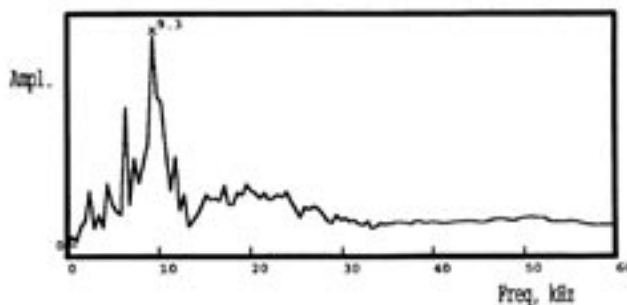
Wartość maksymalną na wykresie spektrum uzyskano przy częstotliwości $f_T = 9,3$ kHz, co dla wcześniej określonej prędkości fali C_L i przy współczynniku kształtu $\beta = 0,96$ pozwala na obliczenie grubości płyty:

$$T = \frac{\beta C_L}{2 f_T} = \frac{0,96 \cdot 3896}{2 \cdot 9,3} = 201 \text{ mm}$$

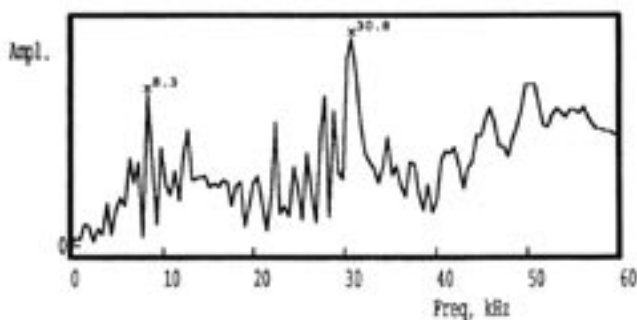
4.2. Lokalizacja nieciągłości w betonie

W modelu płyty przedstawionym na rysunku 5 zabetonowano pusty kanał kablowy średnicy 50 mm, który pełnił rolę pustki w betonie oraz kilka warstw folii PCV symulującej rozwarstwienie betonu. Górna krawędź kanału kablowego była położona 60 mm od górnej powierzchni płyty, natomiast folię ułożono na głębokości 90 mm. Dla znanej prędkości rozchodzenia się fali podłużnej spodziewano się wystąpienia ekstremów na wykresie spektrum częstotliwościowego przy częstotliwościach $f_T = 31,2$ kHz i $f_T = 20,8$ kHz. Z tego względu przyjęto do wzbudzenia drgań młoteczek o średnicy 8 mm, dla którego maksymalna użyteczna częstotliwość wygenerowanych fal wynosi 36,4 kHz.

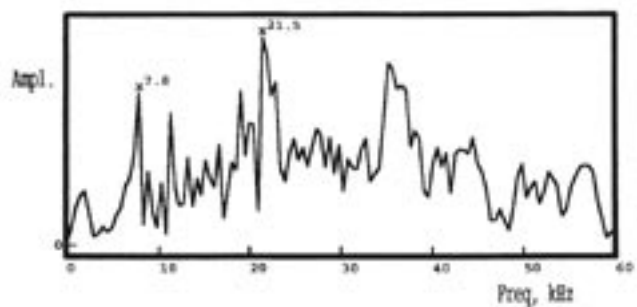
Wykresy spektrum częstotliwościowego uzyskane przy lokalizacji pustki powietrznej oraz detekcji rozwarstwienia betonu pokazano na rysunkach 8 i 9. Wykresy te różnią się zasadniczo od spektrum poka-



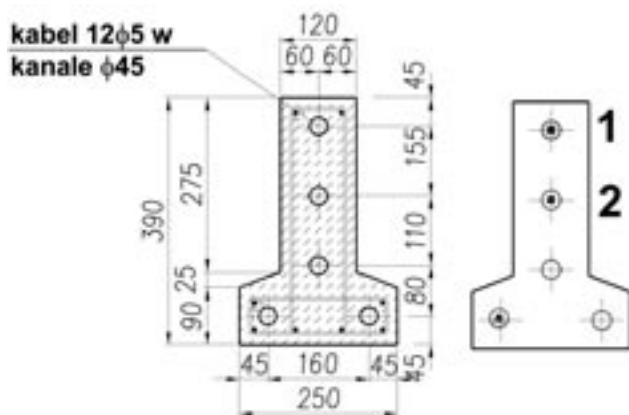
Rys. 7. Spektrum częstotliwościowe uzyskane przy pomiarze grubości płyty



Rys. 8. Spektrum uzyskane przy detekcji wady w postaci pustki powietrznej



Rys. 9. Spektrum częstotliwościowe otrzymane przy lokalizacji rozwarstwienia betonu



Rys. 10. Model dolnego pasa dźwigara sprężonego: 1 – kanał całkowicie zainiektowany, 2 – kanał niezainiektowany

zanego na rysunku 7 otrzymanego na obszarze bez wewnętrznych nieciągłości betonu.

Na pokazanych wykresach uzyskano wartości maksymalne amplitudy echa fal dla częstotliwości 30,8 kHz i 21,5 kHz. Przy znanej prędkości fal C_L możliwe jest obliczenie głębokości położenia wad – 61 mm w przypadku pustki powietrznej i 87 mm dla rozwarstwienia betonu. Na rysunkach 8 i 9 widoczne są także piki amplitudowe przy częstotliwościach 8,3 kHz i 7,8 kHz. Są to echa fal odbitych od dna płyty. Częstotliwości są niższe od wartości 9,3 kHz uzyskanej w badaniu grubości płyty (rys. 7), co wynika z dłuższej drogi fali omijającej symulowane wady struktury betonu.

4.3. Wykrywanie wad iniekcji kanałów kablowych

Badania wykonano na modelu dolnego pasa sprężonego dźwigara kablobetonowego (rys. 10). W części kanałów kablowych o średnicy 45 mm umieszczono kable 12Ø5. Kanały wypełniono w całości lub w części iniektem. Dwa kanały pozostawiono bez kabli.

W pierwszym kroku określono prędkość propagacji fali podłużnej metodą pomiaru czasu przejścia przez czoło fali określonego dystansu. Uzyskano wykresy pokazane na rysunku 11. Dla różnicy czasu $t_2 - t_1 = 143 - 66 = 77 \mu s$, prędkość $C_L = 3896 \text{ m/s}$, a zatem o wartości identycznej jak w przypadku modelu płyty, który wykonano z tego zarobu betonu.

Kolejną czynnością w tego typu badaniach jest wyznaczenie lub obliczenie częstotliwości bazowej, która w przypadku badania kanałów kablowych znajdujących się w środku pasa odpowiada częstotliwości echa fal odbitych od przeciwległej powierzchni środka. Na spektrum częstotliwościowym, pokazanym na rysunku 12, maksymalną wartość amplitudy uzyskano przy częstotliwości $f_T = 15,6 \text{ kHz}$.

Uzyskana częstotliwość echa odpowiada dokładnie grubości średnika równej 120 mm, przy założeniu prędkości propagacji fal $C_L = 3896 \text{ m/s}$.

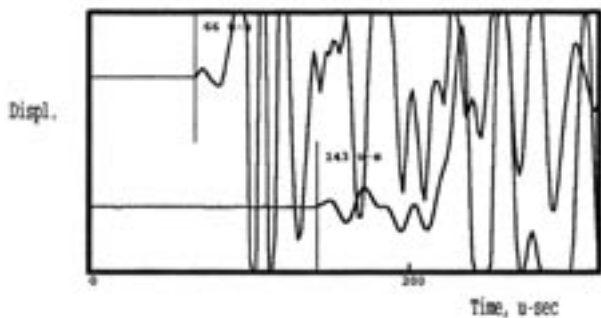
Całkowicie zainiektowany kanał kablowy z cięgnem sprężającym znajdował się w środku modelu pasa dolnego (kanał nr 1 na rysunku 10). Ciężno stalowe położone było w odległości około 47 mm od powierzchni bocznej środka.

Na przedstawionym na rysunku 13 spektrum uzyskano dwa wyraźne maksima amplitud przy częstotliwościach 14,2 kHz i 19,5 kHz.

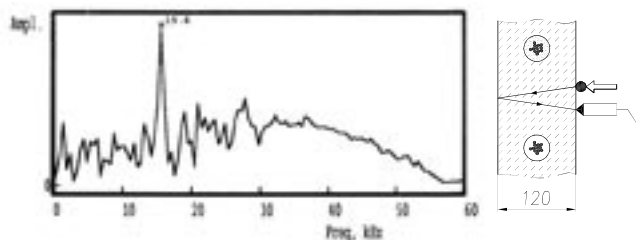
Pierwsza wartość odpowiada echu fal odbitych od przeciwległej powierzchni środka i jest niższa od częstotliwości bazowej 15,6 kHz, co jest skutkiem spadku prędkości fali w warstwie iniektu. Druga wartość częstotliwości echa odpowiada odbiciu fal od stali sprężającej położonej na głębokości:

$$T = \frac{\beta C_L}{4 f_T} = \frac{0,96 \cdot 3896}{4 \cdot 19,5} = 48 \text{ mm}$$

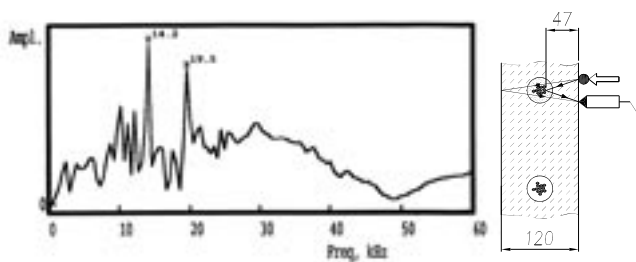
Nieco inaczej wygląda spektrum częstotliwościowe w przypadku lokalizacji kanału niezainiektowanego (kanał 2 na rysunku 10), w którym znajduje się powietrze (rys. 14).



Rys. 11. Wykresy otrzymane przy pomiarze prędkości propagacji fal w modelu pasa dolnego dźwigara



Rys. 12. Spektrum częstotliwościowe uzyskane przy przepuszczeniu fali podłużnej przez środnik

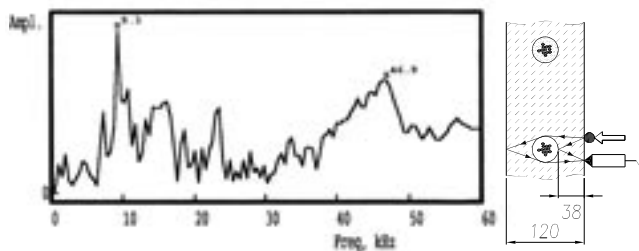


Rys. 13. Wyniki badań kanału całkowicie zainiektowanego

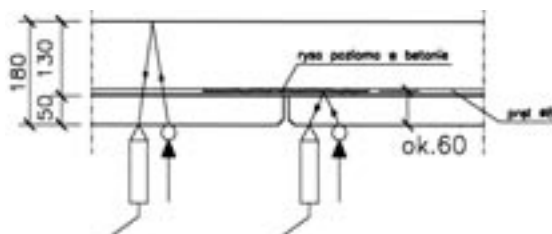
Częstotliwość 9,3 kHz, mniejsza od częstotliwości bazowej 15,6 kHz, jest zobrazowaniem echa fali odbitej od przeciwległej powierzchni środnika. Fala podłużna musiała w tym przypadku pokonać dłuższą drogę obiegając pusty kanał kablowy. Maksimum amplitudy przy wartości 46,9 kHz wynika z odbicia fali na styku betonu i powietrza zawartego w niezainiektowanym kanale kablowym, którego głębokość położenia oszacowano na 40 mm.

4.4. Badania „in-situ” stropu typu 2K

Przeprowadzono badania zarysowanego stropu prefabrykowanego typu 2K pokazanego na rysunku 15.



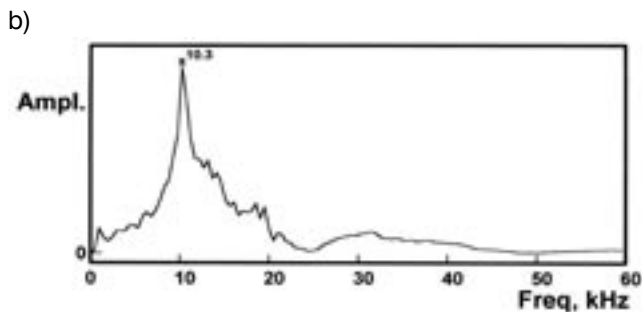
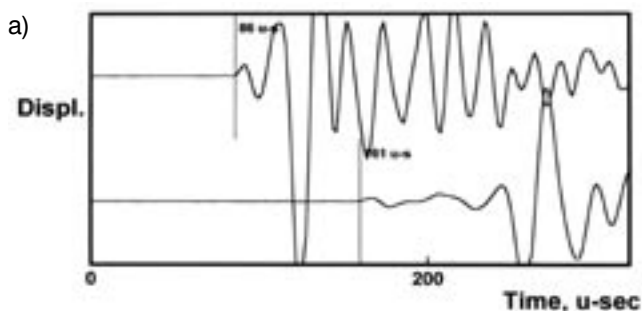
Rys. 14. Rezultaty badań niezainiektowanego kanału kablowego



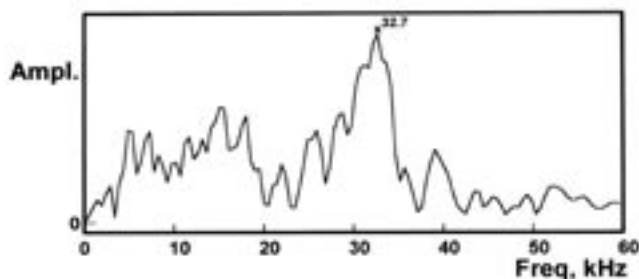
Rys. 15. Szczegół połączenia poprzecznego w stropie 2K

Wykonano pomiary grubości płyty stropowej w rejonie podpór (w obszarze najmniejszych zarysowań) oraz dokonano próby wykrycia rysy pojawiającej się w poziomie zbrojenia poprzecznego, układanego na styku prefabrykowanych „desek”.

Prędkość propagacji fali podłużnej w betonie wyznaczono na podstawie pomiaru różnicy czasu rejestracji drgań przez czujniki. Wykresy przebiegu fal



Rys. 16. Wynik badań grubości stropu prefabrykowanego typu 2K: a) pomiaru prędkości fali podłużnej, b) spektrum częstotliwościowe



Rys. 17. Spektrum częstotliwościowe uzyskane podczas lokalizacji poziomej rysy w stropie 2K

pokazano na rysunku 16a. Uzyskana różnica czasu $75 \mu\text{s}$, przy rozstawie odbiorników drgań równym 300 mm , odpowiada prędkości propagacji drgań $C_L = 4000 \text{ m/s}$.

W wyniku wzbudzenia fal na dolnej powierzchni stropu poza obszarem rys widocznych oraz potencjalnych poziomych zarysowań betonu, uzyskano zobrazowanie echa fal mechanicznych pokazane na rysunku 16b. Częstotliwość odpowiadająca maksimum amplitudy wynosi $10,3 \text{ kHz}$, co pozwala na obliczenie grubości stropu równej 186 mm .

Rezultaty badań laboratoryjnych stropów 2K wskazywały na powstawanie poziomych zarysowań na wysokości zbrojenia poprzecznego układanego na styku prefabrykatów. Celem badań metodą IE było potwierdzenie występowania takich zarysowań.

Na spektrum obrazującym echo fal podłużnych wygenerowanych w pobliżu styku prefabrykatów (rys. 17) uzyskano wartość maksymalną amplitudy przy częstotliwości $f_T = 32,7 \text{ kHz}$.

Dla oszacowanej wcześniej prędkości rozchodzenia się fal podłużnych, wykazano, że fala odbija się od granicy ośrodków beton–powietrze (rysy) 59 mm od dolnej powierzchni płyty, co potwierdza występowanie rozwarstwienia pomiędzy prefabrykatami i nadbetonem na poziomie zbrojenia poprzecznego położonego w odległości 60 mm od dołu stropu.

5. Podsumowanie

Opisana metoda młoteczkowa Impact-Echo, chociaż w Polsce jest jeszcze wciąż nowością, to w USA i Europie Zachodniej stosowana przez specjalistów sprawdza się w praktyce w badaniach poważnych obiektów inżynierskich, jak most przez cieśninę Sund oraz wielu mniej odpowiedzialnych konstrukcji.

Przytoczone w niniejszym opracowaniu wyniki badań wskazują na dużą dokładność metody IE. Osoba obsługująca aparaturę badawczą musi jednak być dobrze przygotowana teoretycznie i posiadać doświadczenie niezbędne do poprawnego przeprowadzenia samych badań i późniejszej analizy wyników.

Metoda młoteczkowa może być również przeznaczona do oceny głębokości rys, poszukiwań obszarów słabiej zagęszczonego betonu, badania przyczepności posadzek do podkładów, określania położenia prętów zbrojeniowych oraz diagnostyki konstrukcji murowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sansalone M. J., Street W. B., Impact-Echo Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press Ithaca, N.Y. 1997
- [2] Mary J. Sansalone, Impact-Echo: The Complete Story. ACI Structural Journal – November – December 1997, 777–786
- [3] Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method. American Society For Testing And Materials. Designation: C 1383 – 98
- [4] Moczko A., Moczko M., Możliwości wykorzystania metody „Impact-Echo” do lokalizacji wad w kablobetonowych konstrukcjach mostowych. 30 Krajowa Konferencja Badan Nieniszczących, Szczyrk 2001
- [5] Starosolski W., Jasiński R., Piekarczyk A., Impact-Echo – nowoczesna aparatura do nieniszczących badań diagnostycznych konstrukcji betonowych i murowych. 28 Krajowa Konferencja Badan Nieniszczących, Zakopane 1999 r., 269–276
- [6] Gromysz K., Piekarczyk A., Jasiński R., Drobiec Ł., Nowoczesne metody diagnostyki konstrukcji żelbetowych. XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń 2002 r., 225–240
- [7] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Lokalizacja wad konstrukcji i stali zbrojeniowej – metody. XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk, 8 – 11 marca 2006, t. I, s. 133–208
- [8] Henriksen C., Impact-Echo Testing. Concrete International 5/95, 55–58
- [9] Moczko A., Nowe metody nieniszczącej diagnostyki konstrukcji betonowych „In-situ”. 28 Krajowa Konferencja Badan Nieniszczących, Zakopane 1999 r., 261–268
- [10] Sansalone M. J., Carino N. J., Detecting delaminations in concrete slabs with and without overlays using Impact-Echo method. ACI Materials Journal. No 2, Vol. 86, 1989, str. 175–184
- [11] Claus Germann Petersen. DOCTer Impact-Echo Testing of a Post-tensioned Cable Steel Duct. Germann Instruments A/S Copenhagen, Denmark, 1993
- [12] Claus Germann Petersen. Impact-Echo Testing of Grouted Tendon Ducts. In – Situ Testing A/S Copenhagen, Denmark 1996
- [13] Jaeger B. J., Sansalone M. J., Poston R. W., Detecting voids in grouted tendon ducts of post-tensioned concrete structures using the Impact-Echo Method. ACI Structural Journal, vol. 93, No 4, 1996, 462–473
- [14] Claus Germann Petersen. Testing for crack-depth with the DOCTer Impact-Echo System on the bottom of tunnel segment 011 Øresund for Tunnel Contractors. In – Situ Testing A/S Copenhagen, Denmark 1997
- [15] Carino N. J., Sansalone M. J., Detecting flaws In concrete beams and columns using the Impact-Echo method. ACI Materials Journal. No 3, Vol. 89, 1992, 296–303
- [16] ASTM C 1383-98: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method. American Society For Testing And Materials
- [17] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych – metoda ultradźwiękowa (cz. I), Przegląd Budowlany 9/2007, s. 29–36

MATERIAŁY REKLAMOWE

- [M-1] Materiały reklamowe firmy GERMANN INSTRUMENTS A/S Copenhagen
 [M-2] Materiały reklamowe firmy NDT JAMES INSTRUMENTS INC