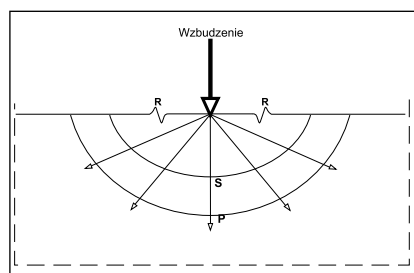


**Współczesne polskie budownictwo betonowe, działające w warunkach gospodarki rynkowej i rosnącej konkurencji, staje przed coraz większymi wymaganiami jakościowymi. Dążenie do podofiania tym wymaganiom wymusza poszukiwanie coraz nowocześniejszych metod badawczych, umożliwiających bezpośrednią i bardziej efektywną ocenę jakości betonu, zarówno w nowo wznoszonych konstrukcjach, jak i w obiektach istniejących, dla których istotne znaczenie ma możliwość dokonania szybkiej prognozy ich trwałości.**

Zoczywistych względów szczególne zainteresowanie budzi w tym zakresie rozwój metod nieniszczących. Rozwój ten, szczególnie widoczny w dziedzinie badań „in-situ”, nastąpił w ostatnim dziesięcioleciu przede wszystkim w krajach Europy Zachodniej i w USA. W tych też krajach opracowano i wdrożono wiele specyfikacji oraz przepisów normowych, sankcjonujących i określających zarazem zakres i sposób wykorzystania w praktyce inżynierskiej najnowszych osiągnięć wiedzy w tej dziedzinie. Również w Polsce obserwuje się ostatnio wzrost zainteresowania tą tematyką. Jedną z metod badawczych, która w ostatnim okresie zyskała sobie szczególne uznanie, jest metoda znana pod nazwą „Impact-Echo”. Sama istota metody, polegająca na wykorzystaniu zjawisk towarzyszących propagacji w ciele stałym impulsowo wzbudzonych fal sprężystych, nie jest nowa. Znane są doniesienia na ten temat z końca lat sześćdziesiątych XX wieku, mówiące



Rys. 1. Fale sprężyste rozchodzące się w ciele stałym, w wyniku wzbudzenia na jego powierzchni krótkotrwałego impulsu mechanicznego

## Diagnostyka konstrukcji betonowych – „Impact-Echo”

o tzw. metodzie „impulsowo-młoteczkowej”. Niemniej jednak przez dłuższy czas przeważał pogląd, iż wykorzystanie fal o niskich częstotliwościach nie rokuje większych nadziei na praktyczne zastosowanie w nieniszczącej diagnostyce konstrukcji betonowych. Ponowne zainteresowanie tym podejściem datuje się na koniec lat osiemdziesiątych XX wieku, kiedy to zespół naukowców z Cornell University w USA, na czele z profesorem Nicholasem Carino oraz Mary Sansalone zrealizował program badawczy, mający na celu poznanie możliwości wykorzystania w badaniach betonu zjawiska odbicia się impulsowo wzbudzonej fali sprężystej od wewnętrznych wad materiałowych oraz powierzchni rozdziału poszczególnych warstw ośrodka, w tym także jego powierzchni zewnętrznej. Badania te zaowocowały nie tylko szeregiem interesujących publikacji naukowych, ale także opracowaniem nowej techniki diagnostycznej, nazwanej „Impact-Echo”. Jej istotnym novum było między innymi wykorzystanie do interpretacji uzyskiwanych wyników badań współczesnych osiągnięć z dziedziny analizy spektralnej sygnałów akustycznych. Wynikiem tych prac było również opracowanie zestawu aparaturowego o nazwie DOCTer Impact-Echo System, składającego się z dwóch głównych elementów:

- wysokiej klasy komputera typu „Field-Works”, przystosowanego do pracy terenowej, wyposażonego w kartę szybkiej rejestracji i przetwarzania danych
- czujnika przemieszczeń, umożliwiającego impulsowe wzbudzenie fal sprężystych w badanym elemencie betonowym wraz z równoczesną rejestracją wymuszonych przemieszczeń czujnika na powierzchni betonu.

### Opis ogólny metody

Powszechnie znany jest fakt, iż krótkotrwałe wzbudzenie na powierzchni takiego ośrodka impulsu mechanicznego generuje w nim rozchodzenie się trzech rodzajów fal sprężystych (rys. 1):

- fali typu P, nazywanej także falą pierwotną lub też

falą podłużną

- fali typu S, nazywanej także falą wtórną
- fali typu R, czyli fali powierzchniowej, znanej powszechnie pod nazwą fali Rayleigha.

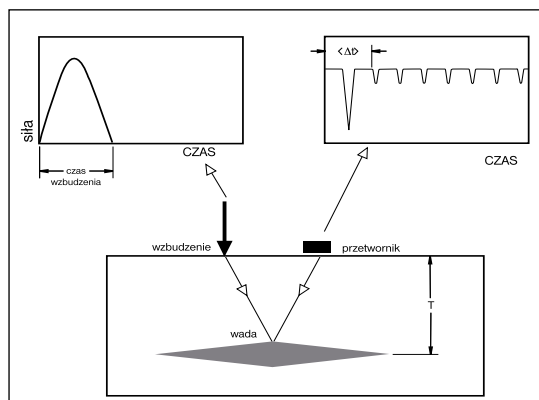
Z praktycznego punktu widzenia, podstawowe znaczenie ma w tym przypadku znajomość charakterystyki rozprzestrzeniania się w betonie fali sprężystej typu „P”, nazywanej także falą pierwotną lub też falą podłużną. Rozprzestrzenianie się tego typu fali w betonie powoduje niewielkie przemieszczenia jego powierzchni, które są rejestrowane w funkcji czasu za pomocą specjalnie do tego celu skonstruowanego czujnika, umieszczonego zwykle w bezpośrednim sąsiedztwie miejsca wzbudzenia impulsu. Istota pomiaru (rys. 2) sprowadza się więc do określenia czasu propagacji czoła fali na drodze: powierzchnia-wada-powierzchnia ( $\Delta t$ ), co przy znajomości prędkości rozchodzenia się fali typu P w betonie ( $C_P$ ) daje możliwość określenia głębokości położenia wady zgodnie ze wzorem:

$$T = C_P \cdot \Delta t / 2 \quad (1)$$

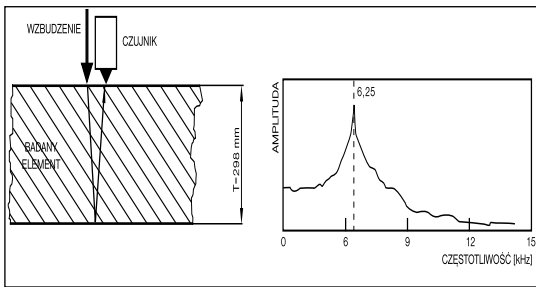
Dzięki wykorzystaniu szybkiej transformaty Fouriera (FFT) rejestrowane przebiegi czasowe mogą być wyrażone w funkcji częstotliwości. Przekształcenie to umożliwia łatwą identyfikację częstotliwości dominujących ( $f$ ) w poszczególnych sygnałach, których znajomość pozwala w prosty sposób wyznaczyć głębokość położenia wady, zgodnie ze wzorem:

$$T = C_P / 2f \quad (2)$$

Duża przydatność metody „Impact-Echo” do diagnostyki konstrukcji betonowych wynika w głównej mierze z jej



Rys. 2 „Impact-Echo” – istota metody



Rys. 3 Przykładowe wyniki pomiaru grubości żelbetowego elementu płytowego

wyjątkowej „czułości” na występowanie w badanym elemencie ośrodków o różnej impedancji akustycznej (iloczyn gęstości ośrodka i prędkości rozchodzenia się w nim fali sprężystej typu „P”). Na granicy ośrodków o wyraźnie różnej impedancji akustycznej następuje częściowe odbicie propagujących fal sprężystych. Z tego typu sytuacją mamy między innymi do czynienia w przypadku występowania wewnętrznych wad wypełnionych powietrzem lub wodą. Poniżej, dla ilustracji, podano orientacyjne wartości impedancji akustycznej dla wybranych ośrodków:

- beton –  $8\text{--}10 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- powietrze –  $411 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- woda –  $1,5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- stal –  $46 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Z praktycznego punktu widzenia do najważniejszych zastosowań tej metody należy w pierwszym rzędzie zaliczyć możliwość:

- wykrywania i lokalizacji wszelkiego rodzaju wewnętrznych wad w betonie
- ocenę zagrożenia korozyjnego kabli sprężających, będącego konsekwencją niewłaściwej iniekcji ich ostion
- wykrywanie wszelkiego rodzaju rozwarstwień wewnętrznych, np. przypadków utraty ciągłości niedostępnych z zewnątrz membran izolacyjnych
- możliwość pomiaru grubości wszelkiego rodzaju elementów betonowych, dostępnych jednostronnie.

### Zasady interpretacji wyników badań

Dla ilustracji, poniżej przedstawiono kilka przykładów (rys. 3, 4 i 5) interpretacji wyników, uzyskanych za pomocą metody „Impact-Echo” w czasie badań typowego płytowego elementu żelbetowego. We wszystkich przypadkach stwierdzona prędkość propagacji fali typu „P” wyniosła 3850 m/s.

Na rysunku 3 przedstawiono przykład oceny grubości płyty w miejscu, gdzie nie występują wewnętrzne uszkodzenia. Lewa część rysunku ilustruje schematyczny przebieg czoła fali, która po wzbudzeniu na powierzchni i odbiciu się od zewnętrznej powierzchni płyty (granicy ośrodków o wyraźnie różnej impedancji

akustycznej) jest rejestrowana przez czujnik zlokalizowany w sąsiedztwie miejsca wzbudzenia. Obok przedstawiono uzyskany na ekranie monitora wykres amplitudy drgań w funkcji częstotliwości.

Widoczna jest dominująca częstotliwość (6,45 kHz), odpowiadająca, zgodnie z wcześniejszymi uwagami, grubości elementu równej:

$$T = V_P / 2f = 3850 / 2 \cdot 6,45 \approx 298 \text{ mm}$$

Późniejszy pomiar w wykonanym otworze rewizyjnym wykazał grubość płyty równą 300 mm.

Rysunek 4 ilustruje natomiast wyniki pomiaru, uzyskane w miejscu występowania wady o niewielkich rozmiarach. W takim przypadku (wada typu „rysa” lub „kawerna”) mamy do czynienia z częściowym odbiciem fali od wady oraz częściowym ominięciem jej przez rozprzestrzeniającą się falę, czemu towarzyszy dalsza penetracja czoła fali w głąb badanego elementu.

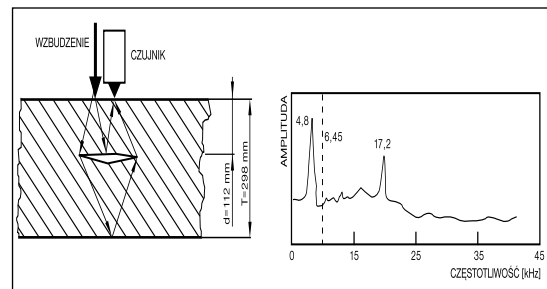
Na wykresie ilustrującym rozkład spektralny amplitudy drgań w funkcji częstotliwości brak jest ekstremum, charakterystycznego dla materiału litego (6,45 kHz). Widoczne są natomiast dwie inne dominujące wartości częstotliwości. Pierwsza z nich (4,8 kHz) związana jest z możliwością ominięcia istniejącej wady i charakteryzuje odbicie fali na granicy samego ośrodka. Oczywiście jest, że w tym przypadku czas niezbędny do pokonania całej grubości badanego elementu jest dłuższy niż ma to miejsce w przypadku materiału bez wad.

W związku z powyższym, obserwowane ekstremum jest przesunięte w kierunku niższych częstotliwości w stosunku do częstotliwości charakteryzującej grubość litego elementu. Tego typu przypadek zawsze świadczy o wystąpieniu wady typu „rysa” lub „kawerna”. Drugie ekstremum (17,2 kHz) ma natomiast swoje źródło w częściowym odbiciu propagującej fali od istniejącej wady wewnętrznej i pozwala określić głębokość jej położenia. W prezentowanym przykładzie głębokość ta wyniosła:

$$d = V_P / 2f = 3850 / 2 \cdot 17,2 \approx 112 \text{ mm}$$

Wykonana później w tym miejscu odkrywka wykazała występowanie wady na głębokości 113 mm.

Na rysunku 6 przedstawiono natomiast wyniki pomiaru, uzyskane w miejscu występowania wady typu „rozwarstwienie”. Uszkodzenia tego typu objawiają się występowaniem pojedynczego ekstremum amplitudy dla relatywnie wyższych wartości częstotliwości niż to wynika z oczekiwanej grubości samego elementu. Brak dominującej wartości częstotliwości, charakterystycznej dla materiału litego (6,45 kHz), przy równoczesnym braku innych ekstremów amplitudy w paśmie niższych częstotliwości, świadczy o wystąpieniu uszkodzenia na tyle dużego, iż fala nie ma praktycznej możliwości penetracji poniżej wady



Rys. 4 Przykładowe wyniki uzyskane w miejscu wystąpienia wady typu „rysa” lub „kawerna”

i w konsekwencji niemal w 100% od niej się odbija.

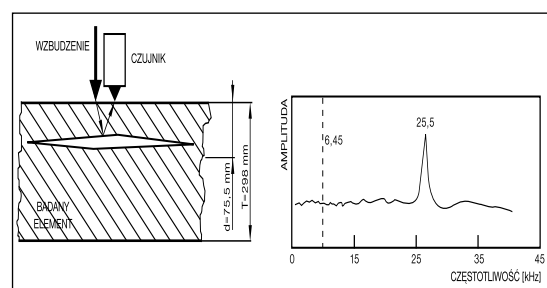
Stwierdzona w przykładzie (rys. 5) dominująca wartość częstotliwości wyniosła 25,5 kHz, co sugerowałoby grubość płyty równą:

$$d = V_P / 2f = 3850 / 2 \cdot 25,5 \approx 75,5 \text{ mm}$$

Z oczywistych względów (grubość płyty była szacowana na około 300 mm) uznano to za niewiarygodne. Dla wyjaśnienia tej sytuacji wykonano odwiert kontrolny, który wykazał na głębokości 75 mm szerokie rozwarstwienie betonu.

### Przykład badań poligonowych

Dla ilustracji możliwości badawczych metody „Impact-Echo” przedstawiono poniżej wybrane wyniki badań zrealizowanych na moście drogowym przez rzekę Narew, koło miejscowości Wizna, na drodze krajowej nr 64 Piątница – Jeżewo (fot. 1).

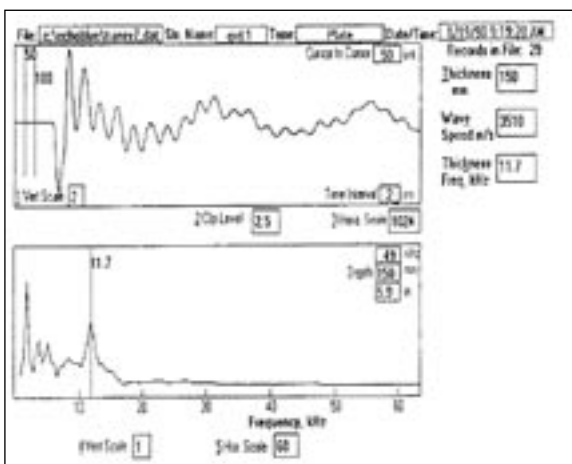


Rys. 5 Przykładowe wyniki uzyskane w miejscu wystąpienia wady typu „rozwarstwienie”



Fot. 1. Most przez rzekę Narew w miejscowości Wisna

Przeprowadzone badania, zrealizowane wspólnie przez zespół badawczy z Politechniki Wrocławskiej i Krakowskiej, przy współpracy Instytutu Badawczego Dróg i Mostów – Filia we Wrocławiu oraz firmy Tarcopol ze Starachowic, były w skali Polski pierwszym tego typu kompleksowym wdrożeniem metody „Impact-Echo” do praktyki inżynierskiej. Ich głównym celem było dokonanie oceny stanu technicznego kabli sprężających



Rys. 6. Wyniki analizy spektralnej dla obszaru, w którym nie występują kable sprężające

betonowe belki, stanowiące przęsła mostu badanego obiektu.

W ramach przeprowadzonych badań, w pierwszej kolejności określono wartość prędkości rozchodzenia się fal sprężystych typu P w badanym ośrodku. W przypadku badanych belek zarejestrowana prędkość propagacji fali wyniosła 3510 m/s. Uzyskane następnie za pomocą zestawu DOCTer wyniki oraz dokonana analiza spektralna zarejestrowanych przebiegów czasowych wykazały, iż w przypadku badania przekroju betonowego poza obszarem występowania kabli sprężających uzyskano stałą wartość dominującej częstotliwości, która wynosiła 11,7 kHz (rys. 6), co wykorzystując wzór (2) pozwoliło na oszacowanie średniej grubości badanego fragmentu belki na poziomie około 150 mm.

Dla porównania na rys. 7 przedstawiono przypadek rozkładu częstotliwości

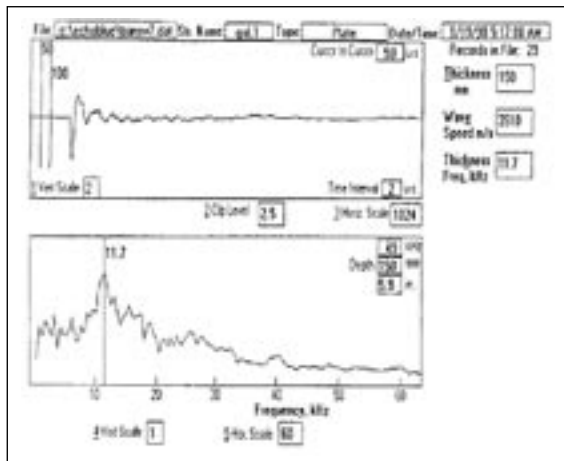
w obszarze, dla którego stwierdzono dobre wypełnienie oston kablowych zaczynem cementowym. Charakterystyczne jest, iż w obu przypadkach występuje ta sama wartość dominującej częstotliwości (w tym przypadku  $f=11,7$  kHz).

Natomiast w przekroju, którego wyniki badania ilustruje rys. 8, stwierdzono wartość dominującej częstotliwości rzędu 8,8 kHz, co mogłoby odpowiadać grubości elementu około 200 mm lub świadczyć o wystąpieniu w jego wnętrzu

wady, wypełnionej powietrzem. Ponieważ oczywiste w tym przypadku było, iż grubość elementu była stała i wynosiła około 150 mm, uzyskane wyniki wskazywały na przypadek niepełnej iniekcji oston kablowych. W tej sytuacji, w wątpliwym przekroju wykonano odkrywkę. Potwierdziła ona istnienie wady, której źródłem był brak pełnego wypełnienia kanału zaczynem, spowodowany mechanicznym odkształceniem górnej powierzchni ostonki kablowej.

**Podsumowanie**

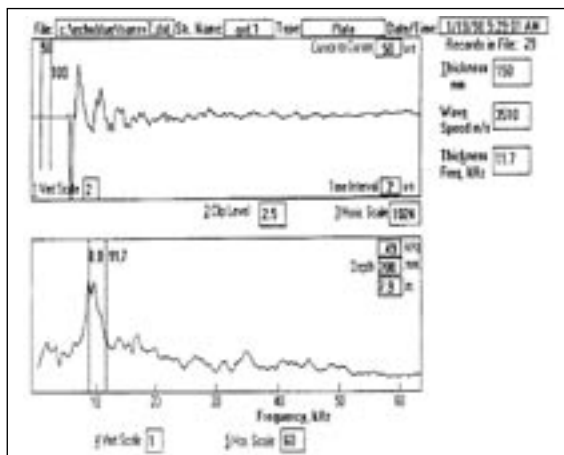
Z przedstawionych powyżej rozważań oraz wyników przeprowadzonych badań wynika, że metoda „Impact-Echo” może być bardzo użyteczna w diagnostyce konstrukcji betonowych. Jej podstawową zaletą jest szeroki wachlarz możliwości badawczych, praktycznie niedostępnych w przypadku innych znanych technik diagnostycznych. Alternatywą dla tej metody mogą być jedynie kłopotliwe i pracochłonne odkrywki i odwierty, wymagające następnie napraw elementów, uszkodzonych w trakcie tego rodzaju badań kontrolnych. Ze względów technicznych, takie odkrywki mogą być wykonane tylko wyrywkowo, w niewielkiej liczbie



Rys. 7 Wyniki analizy spektralnej dla obszaru, w którym występują kable sprężające (dobra iniekcja – pik częstotliwości pokrywa się z wartością oczekiwaną)

punktów kontrolnych. Metoda „Impact-Echo” umożliwia natomiast przeprowadzenie badań kontrolnych w krótkim czasie, praktycznie w nieograniczonej liczbie punktów pomiarowych. Potwierdzeniem przydatności tej metody dla praktyki inżynierskiej jest fakt, iż została ona usankcjonowana w amerykańskich przepisach normowych, a ostatnio także w obowiązujących w polskim budownictwie komunikacyjnym Zaleceniach Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych odnośnie oceny jakości betonu w istniejących konstrukcjach mostowych oraz w nowo budowanych obiektach mostowych. Za pewną niedogodność metody należy uznać fakt, iż tego typu badania wymagają zastosowania bardzo kosztownej i skomplikowanej aparatury, którą w efektywny sposób może posługiwać się tylko wysoko wykwalifikowana kadra techniczna.

dr inż. Andrzej Moczko  
Instytut Budownictwa  
Politechniki Wrocławskiej



Rys. 8. Wyniki analizy spektralnej dla obszaru, w którym występują kable sprężające (zła iniekcja – pik częstotliwości na poziomie 8,8 kHz, zamiast 11,7 Hz)