

# „Impulse response”

## – nowoczesna metoda nieniszczącej defektoskopii konstrukcji betonowych



Rys. 1. Widok zestawu pomiarowego Pile Integrity Tester

### 1. Wprowadzenie

Obserwowany od początku bieżącego stulecia stały wzrost zainteresowania wielu ośrodków naukowych rozwojem nieniszczącej diagnostyki konstrukcji betonowych zaowocował szeregiem nowych rozwiązań technicznych. Widoczny postęp nastąpił w pierwszym rzędzie w dziedzinie pomiarów defektoskopowych. Obok znanej i sprawdzonej metody „Impact-Echo” [1, 2, 3] pojawiły się nowe możliwości badawcze, spośród których na szczególną uwagę zasługuje trójwymiarowa tomografia ultradźwiękowa oraz metoda „Impulse Response” [4], która jest twórczym rozwinięciem metody badania ciągłości pali fundamentowych, znanej pod nazwą PIT (Pile Integrity Testing) [5, 6].

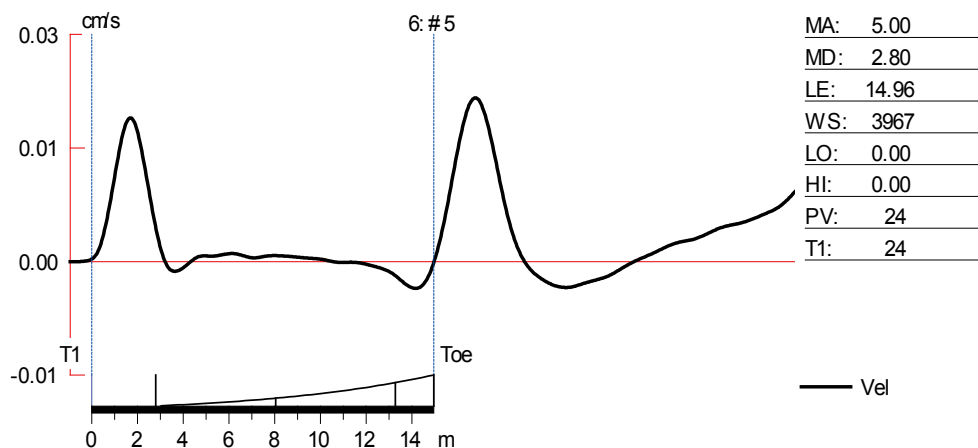
Metoda „Impulse Response” jest nową metodą diagnostyczną, której genezą powstania była potrzeba opracowania metody badawczej, umożliwiającej możliwie szybkie przeprowadzenie nieniszczącej kontroli ciągłości strukturalnej betonowych

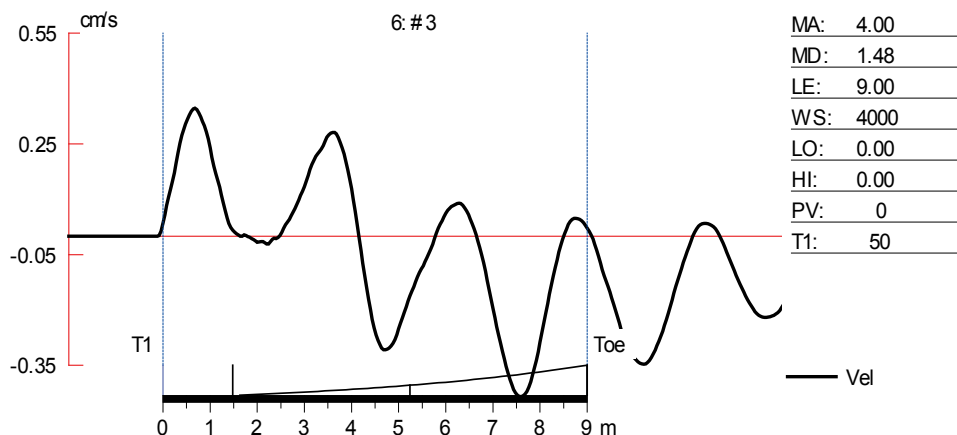
konstrukcji budowlanych o znacznych wymiarach, w przypadku których pracochłonność, a co za tym idzie i znaczny koszt dotychczas stosowanych technik pomiarowych były istotnym ograniczeniem. Metoda ta jest, co prawda, metodą mniej dokładną w porównaniu na przykład z metodą „Impact-Echo”, ale za to pozwalającą na znacznie szybsze zidentyfikowanie fragmentów konstrukcji, w których należy spodziewać się obecności różnego rodzaju wad wewnętrznych. Tak wytypowane obszary, o potencjalnie dużym prawdopodobieństwie występowania defektów strukturalnych, są zwykle poddawane dalszym szczegółowym badaniom przy wykorzystaniu innych, bardziej precyzyjnych, systemów pomiarowych, np. metody „Impact-Echo”. Ostateczną weryfikacją wiarygodności uzyskiwanych wyników badań są zwykle oględziny odwiertów kontrolnych, które pozwalają nie tylko na potwierdzenie obecności wady, ale i na ustalenie jej rodzaju.

W praktyce inżynierskiej metoda „Impulse Response” może być wykorzystywana między innymi do:

- badania ciągłości strukturalnej betonowych pali fundamentowych
- lokalizacji wszelkiego rodzaju delaminacji oraz miejsc, w których nastąpiło rozsegregowanie kruszywa (honeycombing), np. w płytach mostowych, stropach, ścianach oraz innych konstrukcjach betonowych o znacznych wymiarach, takich jak: zapory wodne, kominy, silosy czy też chłodnie kominowe
- wykrywania pustek powietrznych, zlokalizowanych poniżej betonowych pasów autostradowych, podtóg oraz przelewów wodnych
- wykrywania rozwarstwień, powstających pomiędzy nawierzchnią asfaltową a betonową konstrukcją jezdni oraz pomiędzy podłożem betonowym i nakładanymi na nie warstwami naprawczymi, np. typu PCC

Rys. 2. Przykładowy wynik pomiaru, świadczący o braku uszkodzeń wewnętrznych badanego pala





Rys. 3. Przykładowy wynik pomiaru, świadczący o pęknięciu badanego pała na głębokości około 3.2 m

- oceny jakości zamocowania płyt elewacyjnych (np. kamiennych) do konstrukcji nośnej budynku.

## 2. Badania ciągłości pali fundamentowych metodą PIT (Pile Integrity Testing)

Istota omawianej metody polega na punktowym wzbudzeniu fali sprężystej o stosunkowo niskiej częstotliwości, przemieszczającej się wzdłuż trzonu pała, a następnie rejestracji czasu, po którym fala powraca na powierzchnię głowicy pała po odbiciu się od jego podstawy. Wzbudzenie fali następuje w wyniku uderzenia głowicy pała specjalnie do tego celu zaprojektowanym młotkiem pomiarowym. Natomiast pomiar czasu powrotu fali jest najczęściej realizowany za pomocą czujnika, będącego czułym akcelerometrem, który reaguje na niewielkie przemieszczenie badanej powierzchni, towarzyszące powrotowi fali do miejsca wzbudzenia. Tak rejestrowane sygnały są następnie przetwarzane przez specjalistyczne oprogramowanie komputerowe i wizualizowane na ekranie w postaci wykresów, umożliwiających z jednej strony pomiar długości badanego pała, a z drugiej wykrywanie występowania ewentualnych wad wewnętrznych, takich jak na przykład pęknięcie pała w czasie jego wbijania lub uszkodzenie bądź przewężenie pała, powstałe w czasie, gdy podawanie betonu nie nadąża za podnoszeniem świda, rury lub wibratora w trakcie betonowania na miejscu budowy. Na rysunku nr 1 pokazano typowy zestaw pomiarowy tego typu. Znajomość czasu powrotu na powierzchnię głowicy pała generowanej w nim fali sprężystej ( $\Delta t$ ) oraz prędkości rozchodzenia się tej fali w badanym betonie ( $C_p$ ) pozwala na określenie długości pała ( $L$ ) zgodnie z poniższym wzorem.

$$L = C_p \frac{\Delta t}{2}$$

Jak więc widać, prawidłowa interpretacja uzyskiwanych wyników jest ściśle uzależniona od wiarygodnego oszacowania prędkości rozchodzenia się generowanej fali sprężystej w danym ośrodku. Zagadnienie to nie jest proste, ponieważ zwykle nie ma możliwości precyzyjnego określenia tego parametru. Propagująca fala jest falą typu „P”, nazywaną także falą pierwotną lub też falą ściskającą. Prędkość fali jest, w omawianym przypadku, uwarunkowana wytrzymałością badanego betonu oraz

jego gęstością. Jej wartość zmienia się (rośnie) w miarę dojrzewania betonu.

Aby jednoznacznie określić prędkość rozchodzenia się fali w danym rodzaju pali należy przeprowadzić badanie na pału, którego długości jesteśmy pewni. Następnie wprowadzając do programu długość pała, można odpowiednio skalibrować prędkość fali. Jest to bardzo istotna uwaga, ponieważ prędkości rozchodzenia się fali nie można korelować z badaniami przeprowadzonymi np. na palach prefabrykowanych przed ich wbiciem, gdyż fala rozchodzi się z mniejszą prędkością w palach już wbitych niż w palach leżących na placu budowy. Jest to spowodowane powstawaniem zarysowań w głowicy pała podczas jego wbijania.

Z posiadanych doświadczeń wynika, że prędkość rozchodzenia się fali sprężystej typu „P” w palach prefabrykowanych po wbiciu wynosi od około 4000 do około 4100 m/s. Natomiast w palach wierconych jest ona mniejsza i wynosi niecałe 4000 m/s. Wolniejsze propagowanie się fali jest w tym przypadku związane z mniejszą gęstością betonu i niższymi parametrami mechanicznymi betonu, który jest wykorzystywany do wykonania tego rodzaju pali. W przypadku pali betonowych, badanych po upływie 7 dni od ich zabetonowania, można oszacować, że prędkość fali wynosi około 3600 m/s.



Rys.4. Allen Davis opracował na przełomie lat 2000/2001 metodę pomiarową, która umożliwia także diagnostykę defektoskopową płytowych konstrukcji betonowych

Rys. 5. Widok zestawu pomiarowego „s'MASH”



Rys. 6. „s'MASH” – przebieg pomiarów



Odrębnym problemem jest zagadnienie smukłości pala. Zasadniczo uznaje się, że wnioskowanie o jakości pala, którego smukłość, określana jako stosunek długości do średnicy, przekracza 30, jest obarczone ryzykiem popełnienia istotnego błędu. Wynika to ze znacznego rozproszenia sygnału i słabego „echa” z podstawy pala. Trudno również zinterpretować wyniki badania pala opartego na podłożu skalnym. Doświadczenia autorów wskazują jednak, że gdy pal na swojej długości przechodzi przez warstwy gruntów „słabych” (małe tarcie na pobocznicach), to można uzyskać czytelne sygnały nawet przy smukłościach przekraczających 50.

Poniżej przedstawiono kilka przykładowych wyników badań, ilustrujących możliwości omawianej metody badawczej. Na rys. 2 pokazano wynik pomiaru długości pala wierconego o średnicy 1,50 m i długości ok. 15 m w posadowieniu estakady na obwodnicy autostradowej Wrocławia. Przy założonej „standardowo” dla betonu C20/25 prędkości fali równej 3967 m/s można oszacować długość pala na około 14,96 m, co odpowiada w tym przy-

padku wartości oczekiwanej i świadczy o ciągłości strukturalnej badanego pala.

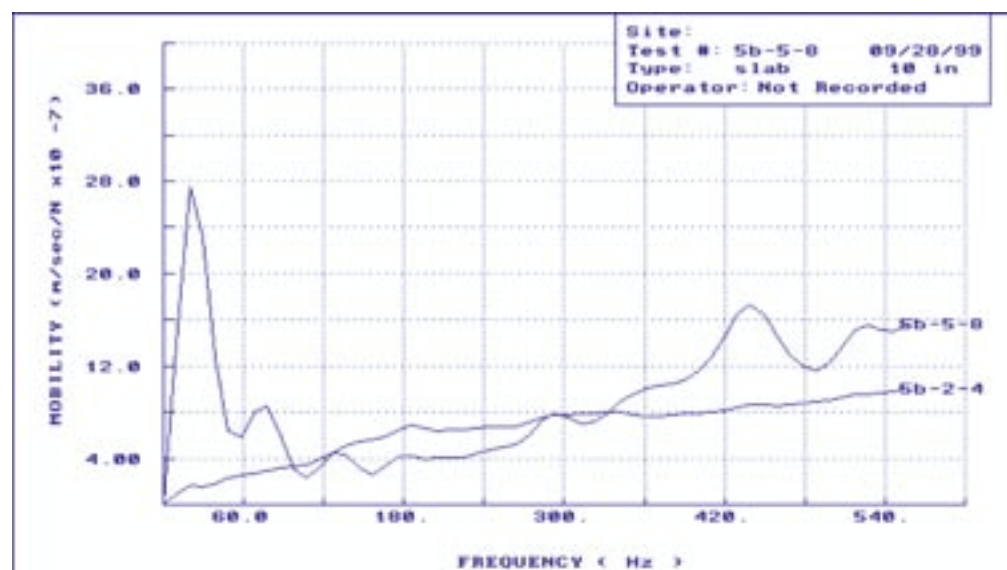
Dla odmiany na rys. 3 przedstawiono przykład pala prefabrykowanego wbijanego, o długości 9 m, który w czasie wbijania uległ pęknięciu na głębokości około 3,2 m.

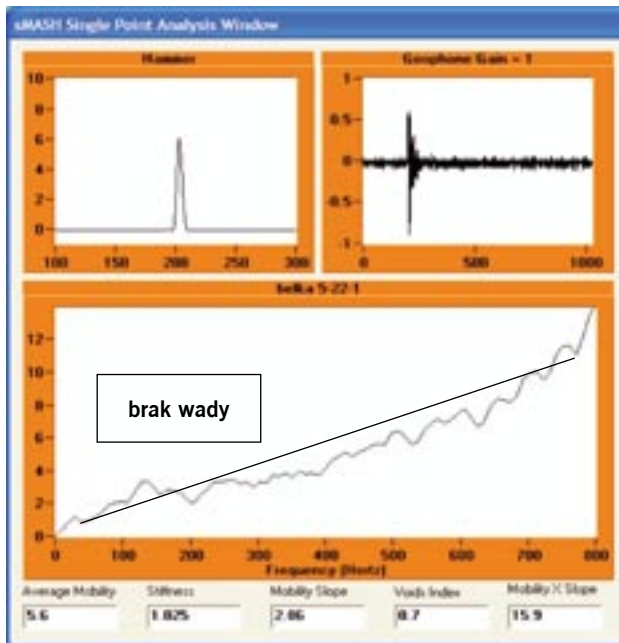
### 3. Badania defektoskopowe elementów płytowych metodą „Impulse Response”

Bazując na przedstawionych powyżej możliwościach badawczych w odniesieniu do pali fundamentowych, Allen Davis (rys. 4) opracował na przełomie lat 2000/2001 metodę pomiarową, która umożliwia także diagnostykę defektoskopową płytowych konstrukcji betonowych. Metoda ta znana jest pod nazwą „Impulse Response”, a zestaw pomiarowy przystosowany do tego rodzaju pomiarów nosi nazwę „s'MASH” (rys. 5).

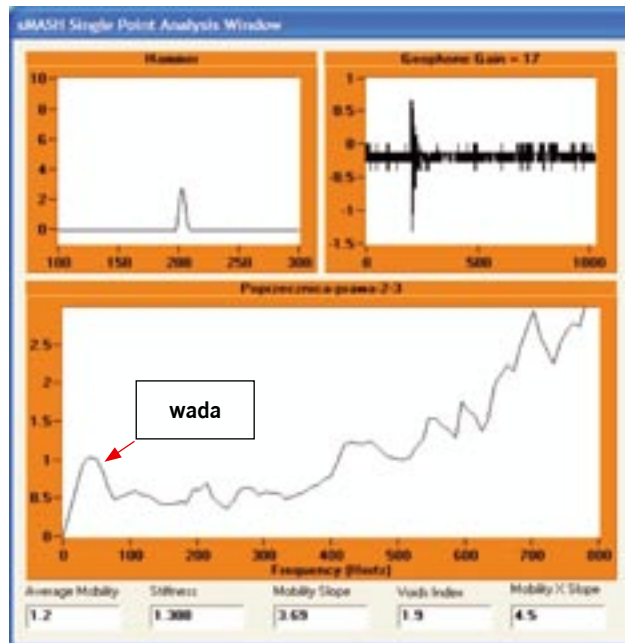
Istotą metody „Impulse Response” jest pomiar parametrów charakteryzujących reakcję sprężystą badanego fragmentu betonowej konstrukcji płytowej na działanie krótkotrwałego mechanicznego impulsu, który wywołuje w nim chwilowe wibracje.

Rys. 7. Przykładowe wykresy przebiegu zmienności „Mobility” w funkcji częstotliwości





Rys. 8. Przykładowy wynik pomiaru (brak wady)



Rys. 9. Przykładowy wynik pomiaru (obecność wady)

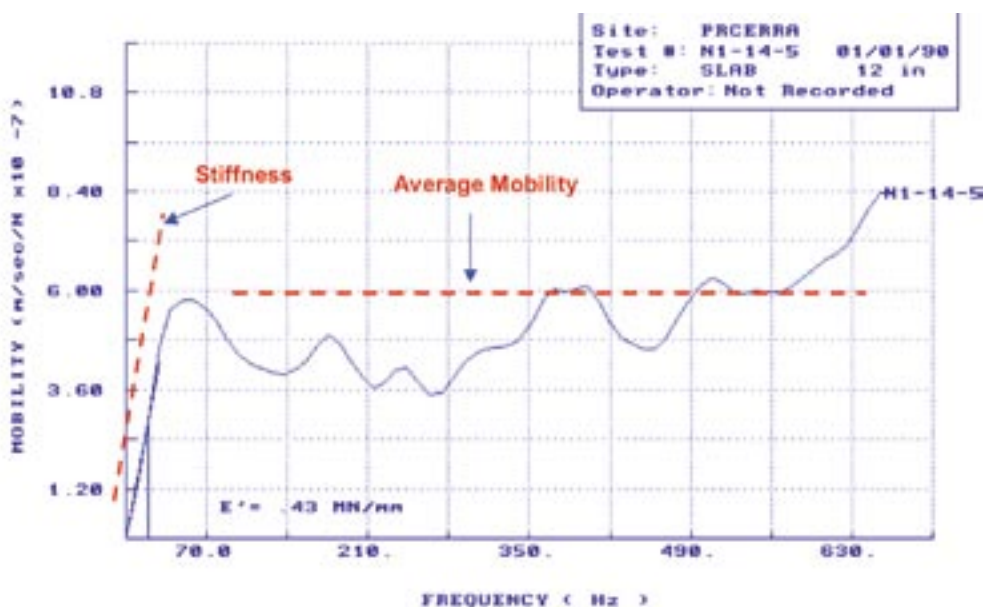
Impuls ten jest wzbudzany za pomocą uderzenia w badaną powierzchnię specjalnie oprzyrządowanym młotkiem pomiarowym, który posiada wbudowaną głowicę umożliwiającą rejestrację wielkości siły uderzenia w funkcji czasu (rys. 6). W skład zestawu pomiarowego wchodzi także szerokopasmowy czujnik przemieszczeń (geofon), umożliwiający rejestrację w funkcji czasu amplitudy drgań wzbudzonej powierzchni betonu (prędkości rejestrowanych drgań). Geofon przetwarza rejestrowaną prędkość drgań podłoża na napięcie elektryczne. Obie mierzone wielkości są przekształcane za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (FFT), która pozwala na wyrażenie rejestrowanych przebiegów czasowych w funkcji częstotliwości.

Jako podstawowy parametr oceny przyjmuje się tak zwaną „Dynamic Mobility” lub w skrócie „Mobility” (zmiennosc dynamiki drgań), która jest definiowana jako stosunek prędkości drgań do wartości siły, która je wywołata. Wielkość „Mobility” jest wyrażana w jednostkach prędkości przypadających

na jednostkę siły (m/s)/N. Pojawienie się wyraźnego ekstremum na wykresie „Mobility” dla niskich wartości częstotliwości (poniżej 100 kHz) może wskazywać na występowanie wad wewnętrznych w badanym przekroju betonowym. Brak takiego ekstremum świadczy o jego ciągłości strukturalnej. Te dwa skrajne przypadki zilustrowano odpowiednio na rys. 7, 8 i 9.

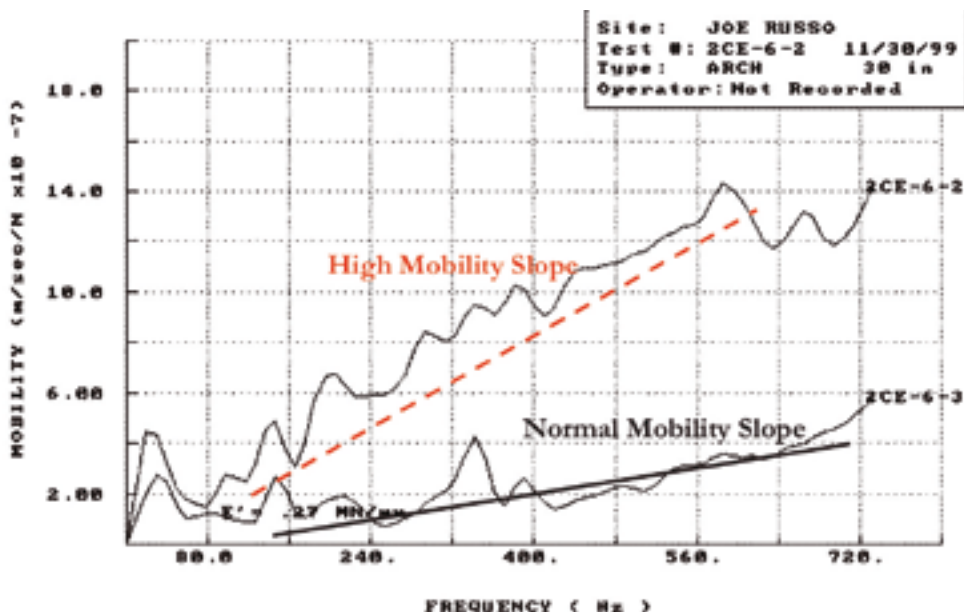
W celu przeprowadzenia bardziej szczegółowej analizy uzyskiwanych wyników wykorzystuje się także dodatkowe parametry oceny:

- Dynamic Stiffness (sztywność dynamiczna), kąt pochylenia krzywej „Mobility” w przedziale od 0 do 40 kHz (rys. 10), który charakteryzuje sztywność dynamiczną badanego fragmentu konstrukcji. Jest to parametr charakteryzujący jakość betonu, grubość badanego elementu oraz jakość jego zamocowania.
- „Average Mobility” (średnia zmiennosc dynamiki drgań), średnia wartość „Mobility” wyliczona w przedziale od 100 do 800 kHz (rys. 10), która



Rys. 10. Definicja „Dynamic Stiffness” oraz „Average Mobility”

Rys. 11. Definicja „Mobility Slope”



sygnalizuje zmniejszenie zdolności danego fragmentu konstrukcji do tłumienia wzbudzonych drgań, co może być między innymi spowodowane delaminacją badanego przekroju betonowego.

- „Mobility Slope” (tempo przyrostu dynamiki

drgań), gradient wartości „Mobility” wyrażony jako stosunek wartości „Mobility” uzyskanej dla częstotliwości 800 kHz do wartości uzyskanej dla częstotliwości 100 kHz (rys. 11 i 12), który jest ściśle związany z jakością zagęszczenia struktury betonu i pozwala zlokalizować obszary o niedostatecznym zagęszczeniu betonu lub rozsegregowaniu jego struktury i obecności wad typu honeycombing.

- „Void Index” (współczynnik wadliwości), stosunek maksymalnej wartości „Mobility” w przedziale od 0 do 100 kHz do wartości średniej „Mobility” w przedziale od 100 do 800 kHz – parametr pozwalający na lokalizację obecności wad wewnętrznych typu „kawerna” lub „delaminacja” w miejscu pomiaru (rys. 13).

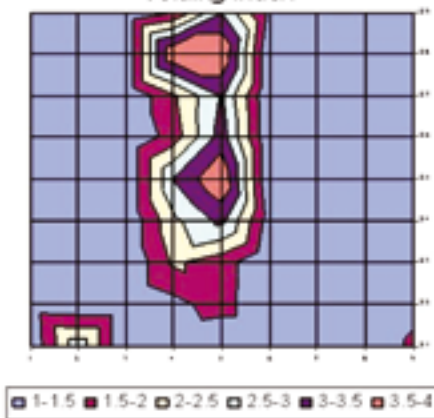
**dr inż. Andrzej MOCZKO**  
Instytut Budownictwa

**Politechniki Wrocławskiej**

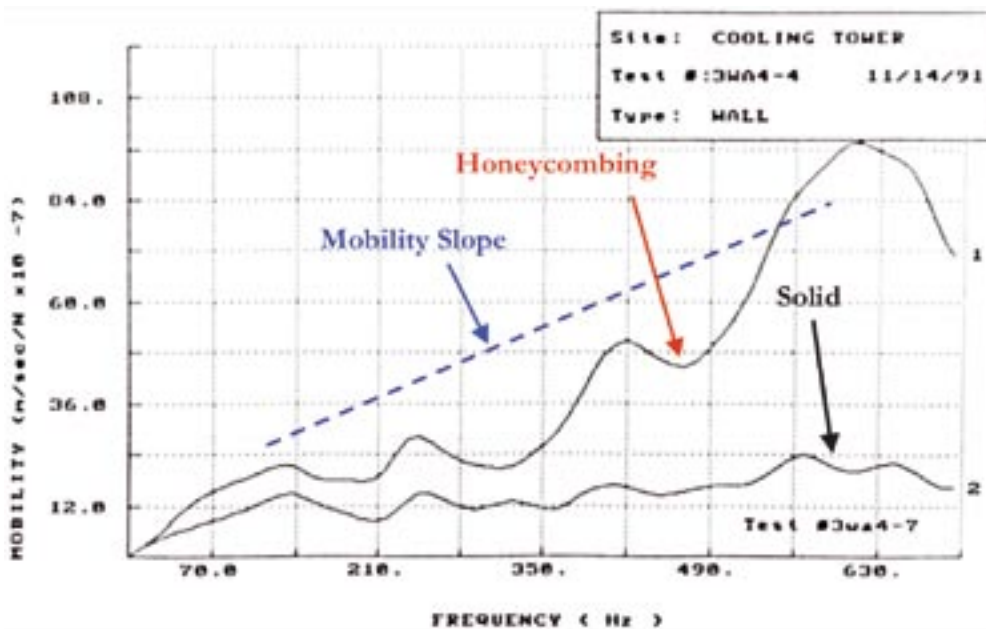
**dr inż. Jarosław RYBAK**

**Instytut Geotechniki i Hydrotechniki**  
**Politechniki Wrocławskiej**

Industrial Floor, 40 m x 40 m Section  
Voiding Index



Rys. 12. Przykład wykorzystania „Mobility Slope” do oceny występowania w przekroju betonowym wad typu „Honeycombing”



Rys. 13. Przykład lokalizacji wad wewnętrznych za pomocą „Voif Index”

**LITERATURA**

- 1 M.J. Sansalone, Streett W.B.: *Impact-Echo – Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997, USA
- 2 ASTM C 1383-04: *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. 19103, USA
- 3 A. Moczko, „Impact-Echo” – nowa metoda nieniszczącej diagnostyki konstrukcji betonowych, „Budownictwo, Technologie, Architektura”, Polski Cement, 2002, nr 1 (17), str. 44-46
- 4 A.G. Davis, *The non-destructive impulse response test in North America: 1985-2001*, NDT & E International, 36 (2003), 185-193, Elsevier Science Ltd.
- 5 K. Gwizdała, *Kontrola nośności i jakości pali fundamentowych*. „Geoinżynieria i Tunelowanie” 01/2004
- 6 ASTM D 5882-00: *Standard Test Method for Low Strain Integrity Testing of Piles*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. 19103, USA