

# 周波数応答によるコンクリート構造物内部欠陥探査の適用性

## APPLICABILITY OF FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS FOR DETECTING DEFECTS OF CONCRETE STRUCTURES

○山下健太郎                      境 友昭                      池端 宏太  
KENTARO YAMASHITA      TOMOAKI SAKAI              KOUTA IKEBATA  
(株) 東洋計測リサーチ      アプライドリサーチ (株)      日本大学理工学部

### 概 要

衝撃弾性波法では、一般に応答波形のみを測定し、その周波数スペクトルから内部欠陥の位置、あるいは深さを検知するという方法が用いられている。しかしながら、この方法では構造物の応答のうち、振幅特性に関する情報が生かされていない。本論では、打撃信号を入力、構造物の振動を出力とした入出力間の周波数応答をパワー伝送比関数で分析し、その空間分布の変化をキーとしてコンクリート構造物の内部欠陥探査を試み、その適用性について検討した結果を報告する。

キーワード 非破壊試験, コンクリート構造物, 衝撃弾性波法, 周波数応答

### 1. まえがき

衝撃弾性波法では、板状コンクリート構造物の厚さ方向に対する波動の多重反射(Flutter Echo)によって生じる定在波の周波数をもとに、厚さあるいは内部欠陥の探査を行う。この方法には、大別して二つの考え方があり、例えば Impact Echo 法<sup>1)</sup>では卓越周波数から厚さを算出し、この厚さが実際のコンクリート板の厚さよりも薄い場合には内部欠陥があると判定する。これに対し、iTECS 技術<sup>2)</sup>では定在波の周波数が健全部より低くなる場合に、内部欠陥があると判定する。これらの二つの方法には基本的な考え方の違いはあるが、いずれもコンクリート表面の振動の周波数成分を分析するという態度は同じである。

しかしながら、衝撃弾性波法では、入力信号を能動的に印加するという機能を持っており、出力としての振動応答のみではなく、入力信号をも利用し、入出力の応答解析を行うことが可能である。本報告では、模擬空隙を持つコンクリート供試体を対象としてパワー伝送比及びその周波数解析を行った結果を示すとともに、従来からの解析方法との比較考察を行う。

### 2. 供試体を用いた実験

#### 2.1 供試体

実験に使用した供試体を図-1 に示す。測定線は、矢印破線で示している。供試体は、水平ひび割れによる剥離を模擬したもので、測定線内に、いずれも深さ 50mm に、200mm×200mm、100mm×100mm の空隙がある。

#### 2.2 測定方法

測定は、測定線上、供試体左端側 100mm から右端側 100mm まで、25mm 間隔で行った(模擬空隙の位置は測定点 8~15, 41~44 の区間である)。使用したインパクトは加速度計を装備した iTECS 標準のインパクト(質量約 15g)であり、この加速度計によって打撃力を測定した。構造物の応答は、打撃点の横 25mm に設置した加速度計(感度 100mV/G, 周波数範囲 0.5~15kHz)によって測定した。測定では、サンプリング時間 10 $\mu$ s, 測定時間 10ms とし、入力信号としての打撃力及び出力として応答波形を同時測定した。

測定した典型的な波形を図-2 に示す。健全部では、応答加速度の振幅が小さく、また減衰も大きいことがわかる。これら対し、模擬空隙部では、応答加速度の振幅も大きく、また減衰しづらいことがわかる。

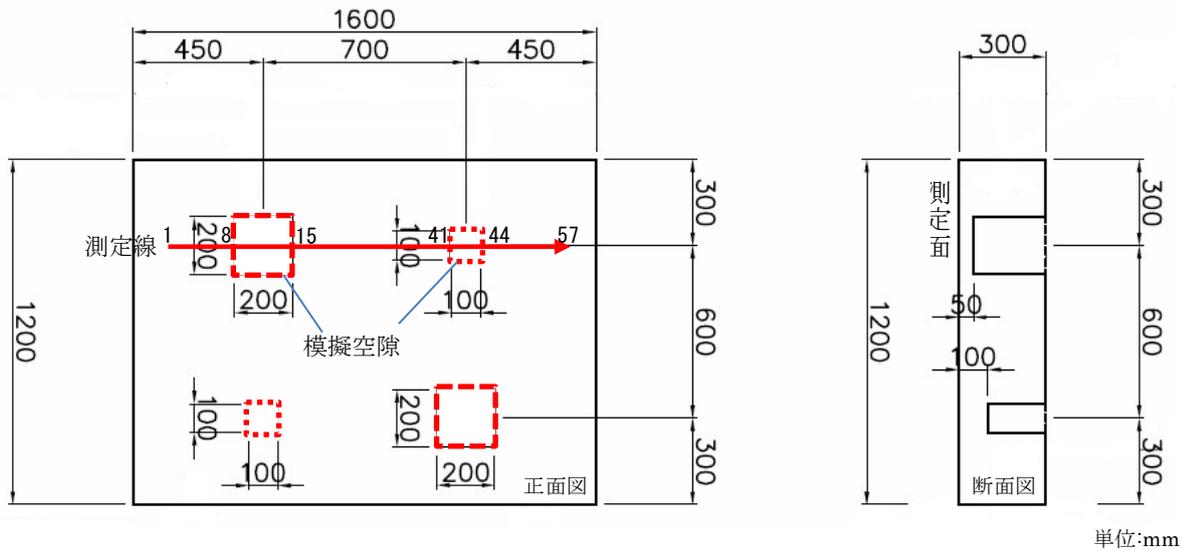
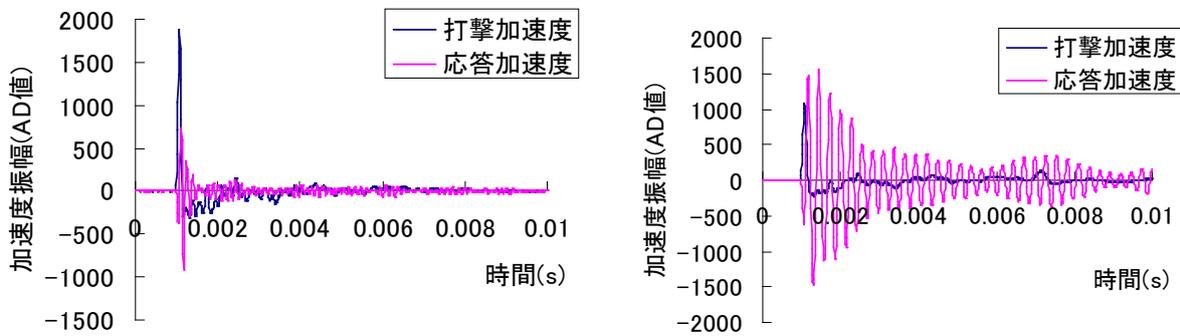


図-1 模擬空隙を有する供試体(設計強度 40kN/mm<sup>2</sup>)



(a) 健全部(測定点 35)

(b) 模擬空隙部(測定点 15)

図-2 打撃加速度及び応答加速度の測定波形

### 3. 解析結果

#### 3.1 パワー伝送比

図-3 に全パワー伝送比を示す。全パワー伝送比は、

$$L_T = 10 \log \frac{\sum Y_i^2}{\sum X_i^2} \quad (1)$$

として算出した値である。ここで、X は、打撃力波形、Y は応答加速度波形を意味し、入力波形及び出力波形の全パワー比の常用対数の 10 倍、単位は dB である。パワー伝送比が大きいことは、同じ打撃力を入力した場合であっても、振動振幅

が大きいこと、すなわち、その測定点位置が振動し易いということの意味する。解析結果から、測定点 12~19 及び 41~45 で、パワー伝送比が大きくなり、この位置は模擬空隙の位置と一致し、これから、空隙があれば、健全な部位よりも振動し易くなることがわかる。

#### 3.2 減衰率

図-4 に応答波形の減衰率を示す。減衰率は、打撃力波形が最大値となつてから 2ms 間の応答波形のパワーと 5ms 後の 2ms 間応答波形のパワーの比を dB で表記したものである。空隙があると、振

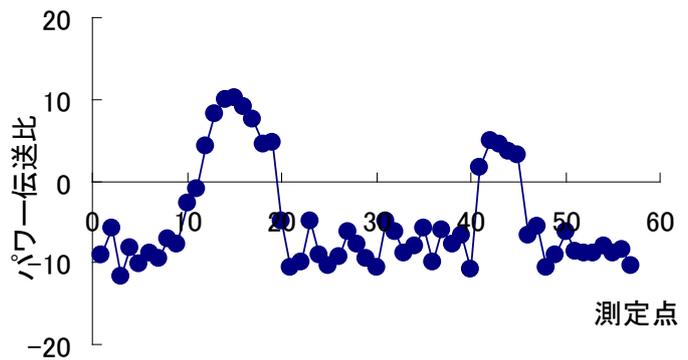


図-3 パワー伝送比の分布

動しやすく、かつその振動の減衰が小さいことが知られている。しかし、図-4 から測定点 12~19 では、減衰率が小さく、空隙の存在を推定することが出来るが、測定点 41~45 での減衰率は、他の測定点よりも逆に大きく、減衰率のみでは空隙位置の確定が難しいことがわかる。

### 3.3 周波数応答

周波数応答では、バンドパス周波数分析を行った。従来、衝撃弾性波法では、卓越周波数あるいは多重反射の周波数から、厚さあるいは内部欠陥までの距離(深さ)を求めるため、分解能の高い周波数分析方法として、フーリエ変換が用いられてきた。これに対し、ここでは、周波数を 1/3 オクターブバンドパスフィルターを用いてそのパワーを求める方法を用いた。この分析方法の場合、周波数間隔は等比間隔となり、バンドの中心周波数とバンド幅が比例関係になる。

図-5 に分析結果を示す。図は、横軸が測定点の位置、縦軸は 1/3 オクターブバンド周波数応答を示し、図の下に向かうほど周波数が高くなる。図では、応答強度を 20dB 間隔のコンターを示し、赤色が最も強い応答強度である。図から、測定点 12~19, 41~45 で、低い周波数帯域においてもやや強い応答強度を示しており、この位置は模擬空隙の位置と一致する。

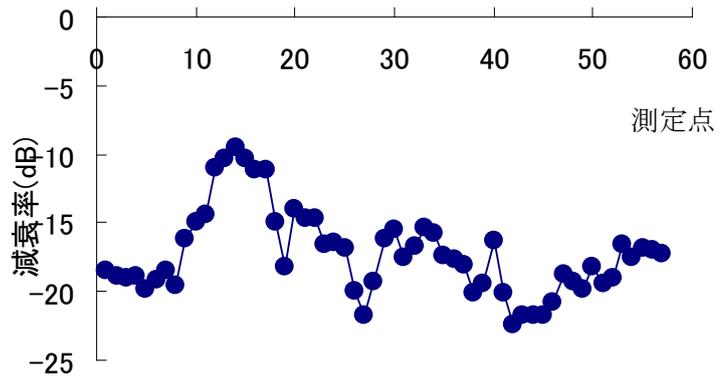


図-4 減衰率の分布

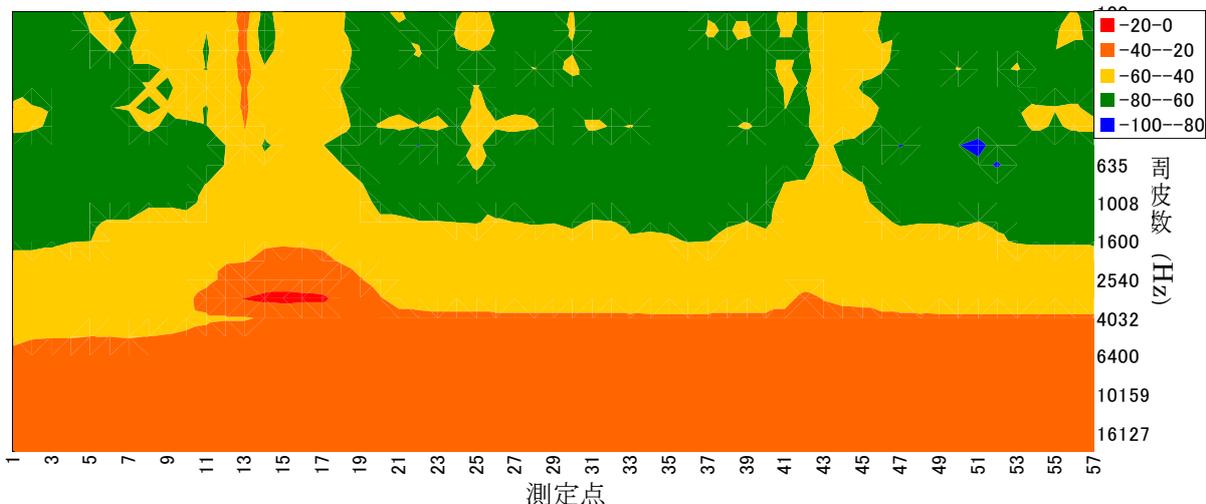


図-5 1/3 オクターブ周波数分析による周波数応答

## 4. 従来技術との比較

図-6 は、同じ測定データ群を iTECS 法によって解析した結果である。図の縦軸は、周波数を「厚さ」に換算した値であり、この時の弾性波速度( $V$ )は 4,000m/s に設定している。厚さ( $D$ )は周波数分析によって得られた周波数( $f$ )から、 $D=V/2f$  として算出している。図の横軸は、測定点である。個別測定点の応答波形は速度に変換し、これから自己回帰モデル係数ベクトルを求め、周波数領域に変換している。各測定点での周波数スペクトルの最大値は 100 に基準化されている。周波数分析は、厚さ  $D$  に対して等間隔であり、分析時の距離間隔は 5mm、最小厚さ 50mm、最大厚さ 600mm である。また、スペクトルの強度は、図中色相コンターで表示している。

図-6 では、厚さが厚く観測される程、周波数が低いことを意味している。スペクトルは、全体的に

は 300～350mm 付近に集中しており、これは供試体の厚さ 300mm に相当する。測定点 12～19 では、スペクトルが最大となる周波数は、厚さとしての値が 550mm 前後に範囲にあり、他の部位と比較して周波数が低くなっていることがわかる。この周波数は、おおよそ 3.5kHz であり、これは図-5において、この区間でパワー最大となる周波数帯域が 3.2kHz～4kHz 帯域であることと一致している。すなわち、模擬空隙の内 200mm×200mm 厚さ 50mm の空隙部分は、従来の iTECS 法によっても検知されていることが示される。しかしながら、図-6 から明らかなとおり、測定点区間 41～45 では、空隙があるにも拘わらず特段の周波数低下は見られない。

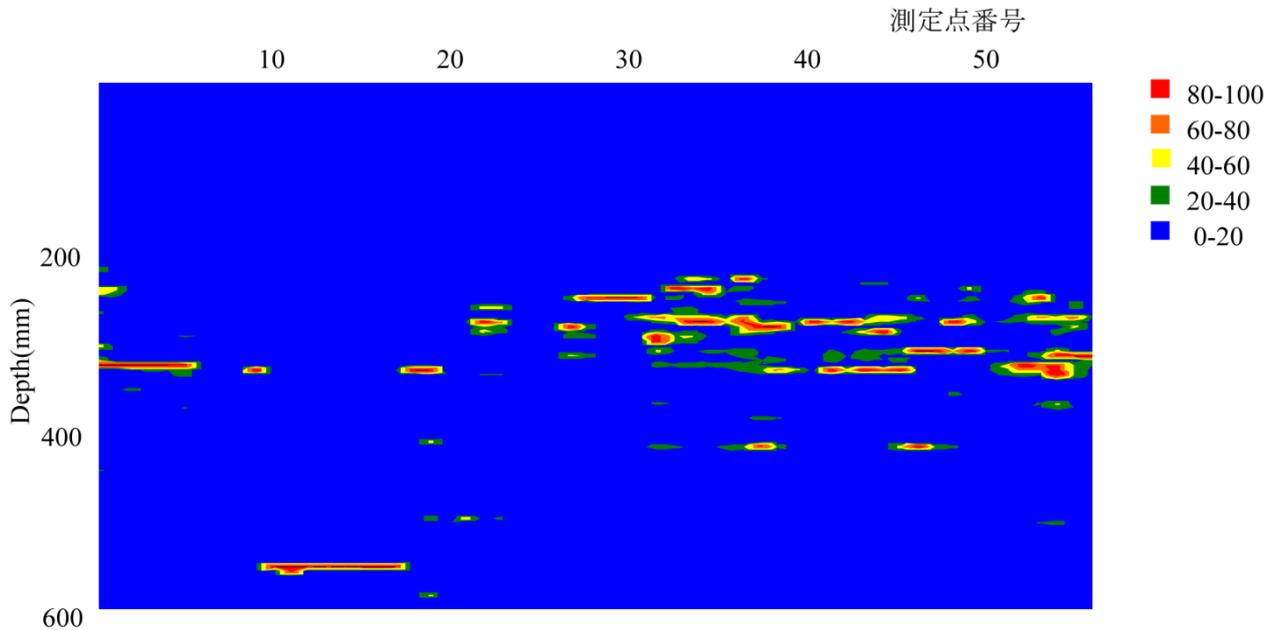


図-6 衝撃弾性波法(iTECS 法)による解析結果

## 5. まとめ

本報告では、コンクリート構造物の内部欠陥探査方法として、バンドパス周波数分析に基づいた周波数応答解析によって行う方法を提案し、従来手法との比較を行った。解析結果が示すように、周波数応答解析では、従来技術では、検知出来なかった、より小さな空隙も検知しており、今後の解析方法として有用性が高いものと考えられる。

従来からの衝撃弾性波法では、より高精度で厚さを測定することを目的とし、その延長上としての内部欠陥探査であった。これらは、多重反射による定在波が存在することを前提としていたが、実際に観測される周波数は、図-6 に示されるように健全部であっても、コンクリート内部の不均質性、予期しない微細な欠陥などを原因として周波数に揺らぎがあり、高い分解能で周波数分析することが、内部欠陥探査に関してより精度の高い情報をもたらすとは限らない。むしろ、本報告で用いたように、比較的粗いバンドパスフィルターを用いて周波数応答を求め、構造物全体の応答を相互比較する方法が、内部欠陥の平面位置を検知するには有効であるように思われる。

今後、これらの手法の適用性、また応用範囲について研究を継続する予定としている。

## 参考文献

- 1) Mary J. Sansalone William B. Streett ;IMPACT-ECHO Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry 1997
- 2) 岩野聡史, 森濱和正：非破壊・局部破壊試験によるコンクリート品質検査に関する共同研究 衝撃弾性波 その2 衝撃弾性波法によるコンクリート表層部欠陥の深さ測定日本非破壊検査協会平成 15 年度秋季大会講演概要集