

報告 打音信号の解析方法に関する考察

Signal processing method of sounding test for detection of defect in concrete structures.

○山下健太郎^{*1}・池端宏太^{*2}・境 友昭^{*3}

Kentaro YAMASHITA, Kota IKEBATA, Tomoaki SAKAI,

要旨：最も一般的で簡便な非破壊検査方法として、多くの局面で打音診断法が用いられる。この方法では、人官能による判断を主とすることから、その客観性や安定性に疑問が呈されることもあった。このため、最近では音信号を時間領域信号あるいは周波数領域に変換して、剥離や空隙などの欠陥との対比から、非健全性判定のための尺度構成を行う研究が行われてきた。しかしながら、打音を用いた人官能評価とこれまでの信号処理方法での評価の間には乖離が生じることが多くあった。

本論文では、人の感覚が周波数及び音圧に対して対数尺度となっていることに着目した音信号の処理方法を用い、内部欠陥の検知精度が向上した事例について報告する。

キーワード：衝撃弾性波法、パワー伝送比、1/3 オクターブバンド分析

1. はじめに

現在、構造物の点検や異常個所のスクリーニング手法としてハンマによる打撃時の音を人が聞き取り、経験に照らして健全、非健全の判別を行う、いわゆる打音法と呼ばれる検査方法が広く用いられている。しかしながら、人官能試験としての打音法では、調査員の主観的判断に依存するため、判定結果の客観性が得られない、判定根拠となるデータが残されない、などの問題点があることから、これを機械化、システム化する研究が行われている。すなわち、人が音を聞く代わりに、音振動をマイクロホンで測定し、これを周波数分析などの信号処理方法を用いて、人官能に代替し得る尺度の構成を指向する技術である。しかしながら、人の持つ感覚を考慮した尺度の構成方法に関し、十分な検討が成されている状況とは言えないもの現実である。これに対し、本論では、より人官能に近い解析、信号処理の方法としてパワー伝送比及びその周波数関数によって評価する手法について、模擬空隙を持ったコンクリート供試体および、内部欠陥を模擬した板状コンクリート供試体を用いて、解析手法の適用性の検討、また、従来技術 (iTECS 法¹⁾) との比較を行った。この結果、表層剥離型の変状については高い精度で検知可能であること、深い内部欠陥については適用性について改善の余地があることがわかった。

2. 現在の打音解析技術

打音法については、①打撃音の清濁あるいは異常を点

検者が判断する方法、②打撃音をマイクロホンで収録し、その音圧や観測波形の振幅値、周波数 (パワー) 構成を手がかりにして評価する方法²⁾、③ハンマ打撃の代わりにパルスレーザや高出力・高指向性スピーカを使用し、レーザドップラ振動計でコンクリート表面の振動応答を観測する完全非接触の方法³⁾④高感度の加速度計を接触して観測した波形を自己回帰モデルによって評価を行う技術⁴⁾等が提案されている。

他方、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っている。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⁵⁾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し、これに対し、iTECS 技術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2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。

ここで、ハンマ打撃によって発生する振動は、基本的には部材の厚さ方向の共振周波数、あるいは、測定面と内部欠陥の間のたわみ振動の生成の影響を受けているものと考えられるが、衝撃弾性波法による評価の場合、両者の周波数が類似する場合などには欠陥を検知できない可能性がある。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特性があ

*1(株)東洋計測リサーチ

*2 日本大学

*3 アプライドリサーチ (株)

Toyo Measurement and Research Inc.

Dept. of Civil Engineering, NIHON University

Applied Research Inc.

り、出力としての振動応答のみではなく、入力信号をも利用することで、入出力の応答解析を行うことが可能になる。

3. 実験による検討

3.1 剥離型供試体

(1) 供試体および測定方法

実験に使用した剥離タイプの供試体を図-1 に示す。図中の矢印は測定線および測定方向を示している。供試体（厚さ 300mm）は、水平ひび割れによる剥離を模擬したもので、深さ 50mm の位置に、200mm×200mm、100mm×100mm の空隙が埋設されている。

測定は、測定線上、供試体左端から 100mm の位置から右端 100mm の位置まで、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)。使用したインパクトは加速度計を装備した iTECS 装置標準のインパクト(質量約 15g)であり、この加速度計によって打撃力波形を測定した。振動応答は、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。測定は、サンプリング間隔 10μs、測定時間 10ms とした。観測された代表的な波形を図-2 に示す。模擬空隙部では、応答加速度の振幅が相対的に大きく、減衰も小さいことから、いわゆる、たわみ振動が生成していることが伺える。

(2) パワー伝送比解析結果

図-3 に測定点毎の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。なお、出力波形の平均値は 0 としてパワーを算出した。パワー伝送比が大ききことは、同じ打撃力を入力した場合であっても、観測される振動振幅が大ききこと、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) 周波数応答解析結果

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)を求めるために、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。

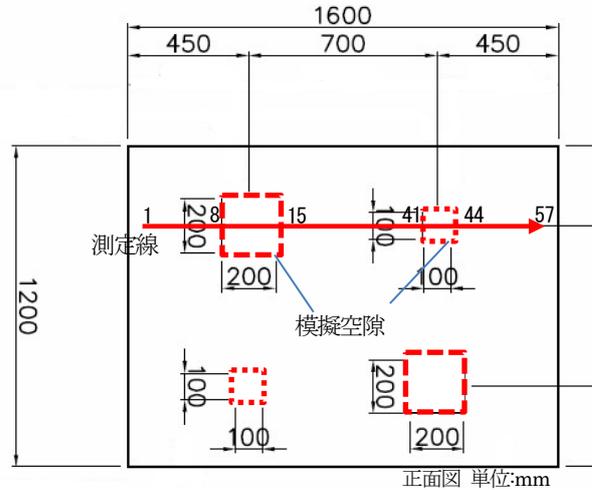


図-1 模擬空隙を有する供試体

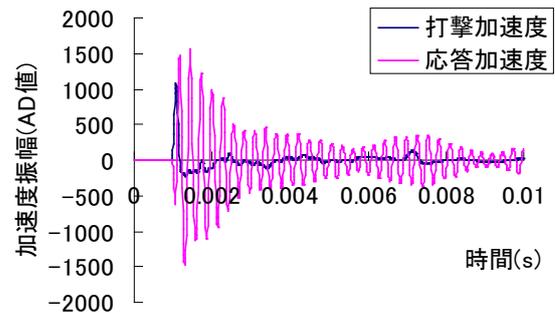
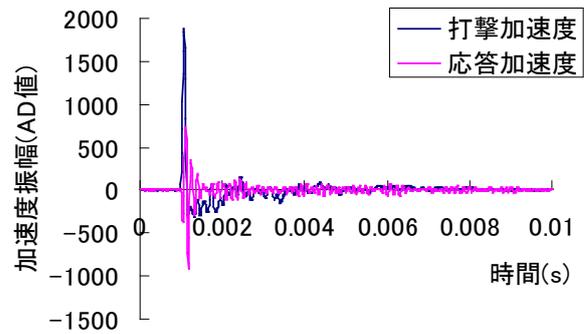


図-2 打撃加速度及び応答加速度の測定波形
(上: 健全部 (測定点 35), 下: 模擬空隙部 (測定点 15))

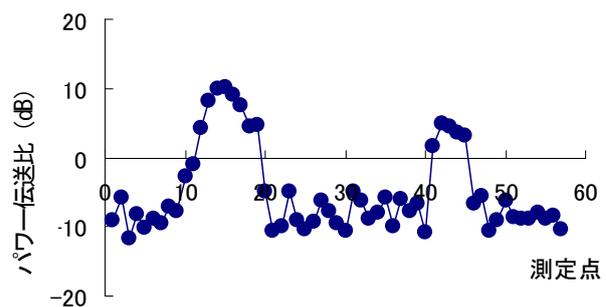


図-3 打撃加速度及び応答加速度の測定波形

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-4 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 間隔のコンターで示し、赤色が最も強い応答強度である。図から、測定点 12~19, 41~45 では、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。

(4) iTECS 技術との比較

図-5 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波形に変換し、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、最小分析厚さ 50mm、最大分析厚さは 600mm とした。また、スペクトルの強度は、図中の色相コンターで表示している。

図-5 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 前後の範囲にあり、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、図-4 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 であることと一致している。すなわち、模擬空隙の内 200mm×200mm 深さ 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、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ず、比較的小さな空隙については検出が難しいといえる。

3.2 内部欠陥模擬供試体を用いた実験

(1) 供試体および測定方法

実験に使用した供試体は、図-6 に示すようなコンクリート製板(厚さ 60mm、高さ 300mm、長さ 980mm)である。測定面と対向する供試体下端側にスリットを設け、深い位置にある内部欠陥を模擬した。測定は、供試体の上辺において、両端の 100mm を除いて 25mm 間隔で行った。スリット位置は測定点 19 と 21 の位置である。測定は、剥離型の供試体と同条件で実施した。

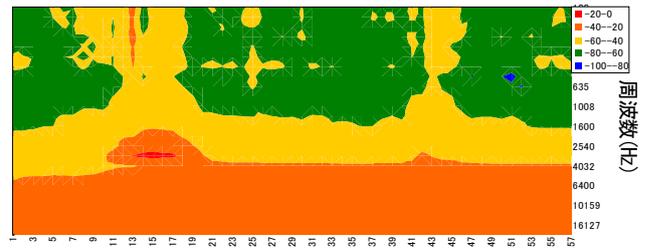


図-4 周波数応答解析結果

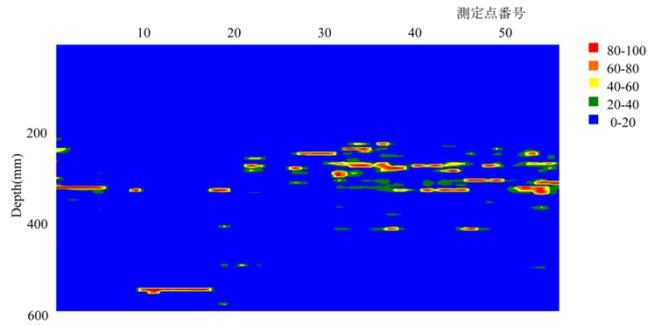


図-5 iTECS 法ラインモード周波数解析結果

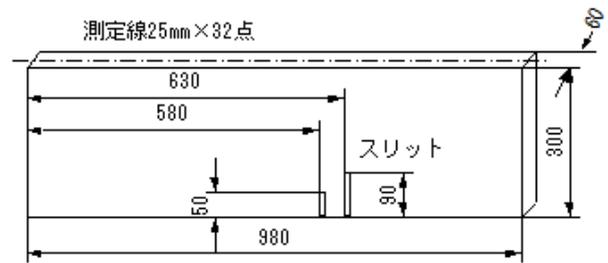


図-6 内部欠陥模擬供試体

(2) 解析結果

解析結果を図-7, 8 に示す。同じ測定データを用いて、従来からのパワースペクトルによる方法と今回の手法を適用し、両者の結果を比較した。図-7 は、スリットが無い状態、図-8 は、スリットを図-6 のように設けた場合の結果である。図の横軸は測定点、縦軸は周波数(iTECS 法では、周波数の逆数)である。1/3 オクターブバンドパワー伝送比では、スリットが非対称位置にあるにも拘わらず、ほぼ左右対称な図柄となっているのに対し、iTECS 法では、スリット有りの場合、左右対称性では無くなり、スリットの影響による周波数変化が表現されている。

4. まとめ

本論では、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、従来技術では検知が難しかった、より小さな空隙も検出し

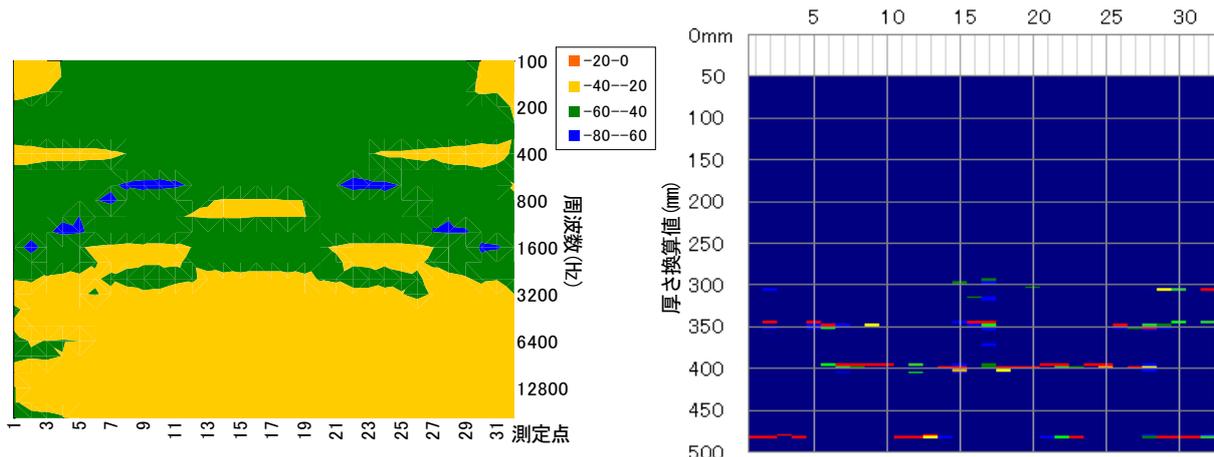


図-7 内部欠陥無しでの解析結果（左：周波数応答解析，右：iTECS ラインモード解析）

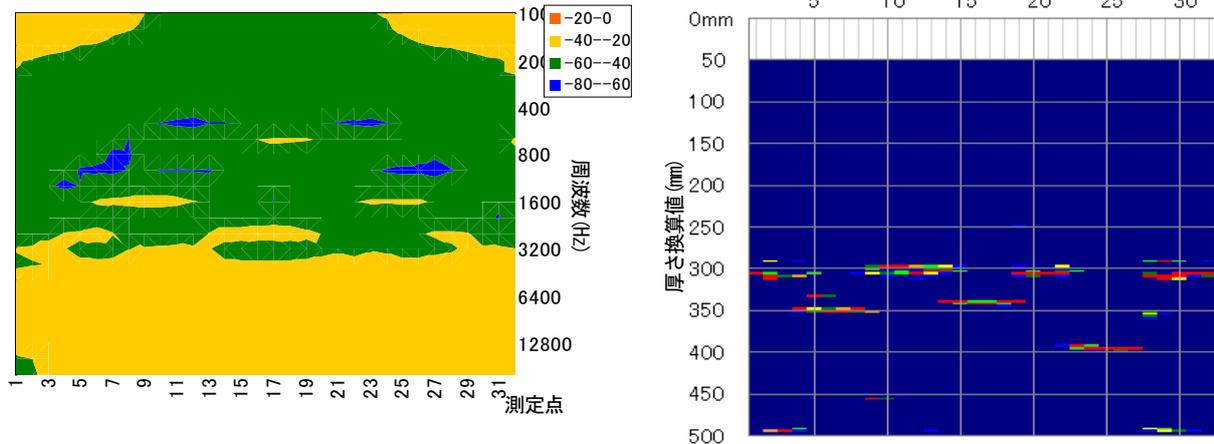


図-8 内部欠陥有りでの解析結果（左：周波数応答解析，右：iTECS ラインモード解析）

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-7 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、内部欠陥の有無や平面位置を検知するには有効であるように思われる。

また、周波数応答解析の結果から、概ね 4kHz 以下の低い周波数帯域で顕著な変化が見られており、マイクロホン等の非接触型のセンサーで収録したデータについても適用の可能性があり、今後検討を進めていきたい。

深い位置ある内部欠陥の検知については従来からのパワースペクトルによる方法がより有効であることがわかったが、いずれの解析手法も、同一のデータを用

いて実施できることから、2つの解析方法の併用により、欠陥の種類を区別することも可能となるものと思われる。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 極檀邦夫, 境友昭; 衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1521-1526, 2002
- 2) 例えば 伴亨, 歌川紀之, 市野大輔, 森濱和正: コンクリートの内部欠陥の検知性能と打撃音特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No1, pp.1735-1740, 2005
- 3) 例えば 杉本恒美, 赤松亮, 歌川紀之, 片倉影義: 空中放射音波を用いた非接触欠陥検出法に関する検討, 平成 25 年度秋季講演大会講演概要集, pp29
- 4) 久保元樹ほか, :新しい打音解析技術による護岸ブロックの健全性試験, 第3回シンポジウム「コンクリート構造物の非破壊検査」論文集, pp177, 2009
- 5) M. J. Sansalone and W. B. Street: Impact-echo: Non-destructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press, June 1997