

報告 音響探査法における欠陥の探査アルゴリズムの検討

歌川 紀之^{*1}・赤松 亮^{*2}・杉本 恒美^{*3}・片倉 景義^{*4}

要旨：叩き点検を遠隔地から可能とする「音響探査法」の技術開発を進めている。音響探査法は音源で発生させた音響によりコンクリート表面を振動させ、その振動をレーザドップラ振動計で測定する。さらにその振動の分布からコンクリート表面のはく離やうきなどの欠陥を抽出する技術である。本報告では、欠陥の探査アルゴリズムについて述べる。振動エネルギー比およびピーク周波数・ピーク振幅を用いる探査アルゴリズムを、実構造物（RC床版）へ適用し、床版下面のうき・はく離欠陥を探査した結果を示す。

キーワード：音響探査法、非破壊検査法、うき・はく離、叩き点検、打音法

1. はじめに

これまで、コンクリートは半永久的な構造物と考えられてきたが、RC高架橋からのコンクリート片の落下事故やトンネルにおける天井板の落下事故などがあり、近年は、構造物を長持ちさせるための維持管理の重要性が叫ばれるようになってきた。維持管理では、最初に点検を行い、構造物の状態を把握することになる。

一般的な点検では、遠望目視点検、近接目視点検、叩き点検が行われる。近接目視点検や叩き点検については、壁面や床版に近づく必要があり、高所作業車や足場からの苦渋作業となる。このような作業を合理化するため、目視点検については、CCDカメラやレーザーによるデジタル画像を用いる技術がトンネルでは使われ始めている。さらに、自動的にひび割れ幅を評価する技術も提案され

ている。また、近年では、画像が撮れない、桁下の部分などに対して小型のヘリコプターにカメラを搭載したシステムも検討されている。一方、叩き点検については表-1に示すような自動化・遠隔化の研究開発が成されているが、あまり実用化は成されていない。

本研究では、叩き点検をコンクリート面から離れた位置で可能とする技術の一つである「音響探査法」⁴⁾に着目した。音響探査法とは、音源からの放射音によりコンクリート面を加振し、その振動をレーザドップラ振動計で測定し、振動分布から、はく離やうきなどのコンクリート表層の欠陥を探査する技術である。本技術を完成させるためには、(1)コンクリート面を離れた位置から効率的に振動させるための音響加振技術、(2)振動状況を離れた位置からノイズを少なく計測する技術、(3)計測された振

表-1 叩き点検を自動化・遠隔化する技術

	概要	長所・短所
打音法ロボット ¹⁾	打音法（コンクリートを打撃し、その音をマイクロフォンで収録・分析する）を自動化させた技術	これまでの打音法や叩き点検の探査技術をそのまま使える。ただし、架線の下げ束や換気ファンなどの付帯構造物周辺の覆工面に打撃装置や収録装置を近づけることが難しいため、その周辺の測定に手間がかかる。
赤外線法	赤外線カメラで測定されたコンクリート表面の温度分布から、うきやはく離欠陥の位置を抽出する。	赤外線画像の撮影のみで平面的な調査ができるので、簡易な調査となる。ただし、トンネル内など温度変化が少ない箇所での測定が難しい。環境条件の制約がある。
電磁波法（ロボット） ²⁾	コンクリート内部の電磁波の伝搬状況から、コンクリート内部の空洞やジャンカを抽出する技術	空洞やジャンカ以外に配筋や背面空洞の調査などにも適用が可能。ただし、はく離のように薄い欠陥の抽出は難しい。また、センサーを覆工面に近づける必要があるため、付帯設備の周辺の測定は難しい。
レーザーリモートセンシング ³⁾	パルスレーザーをコンクリート面に照射することにより振動させ、その振動をレーザドップラ振動計で測定し、うき、はく離を抽出する技術	遠隔地から非接触の点検が可能となる。ただし、レーザー加振させるために大きなエネルギーが必要となる。

*1 佐藤工業(株)技術研究所 上席研究員 工博 (正会員)

*2 桐蔭横浜大学大学院工学研究科 修士2年

*3 桐蔭横浜大学大学院工学研究科 教授 (正会員)

*4 明篤技研

動の結果から、欠陥箇所を抽出する技術、(4)環境的な配慮を含めこれらを現地で適用できるようにする技術の開発が必要となる。

本論文では、これらの中で、欠陥箇所を抽出する技術に着目し研究を実施した成果を述べる。欠陥探査の中で特に、欠陥の有無を検出する技術に着目した。室内実験では円形欠陥の試験体を用い、探査指標の適用性を調べた。その探査指標を現地構造物である高速道路のRC床版下面の調査に用いた結果を示した。

2. 音響探査法

音響探査法の概要を以下に示す。

2.1 機器構成

音響探査法の基本的なシステム図を図-1に示す。10m以上離れた位置で100dB以上の音響を与えられるLRAD(:Large Range Acoustic Device)という音源で音を発生させ、コンクリート面を振動させる。その振動をレーザドップラ振動計(SLDV:Scanning Laser Doppler Vibrometer)で測定する。SLDVにより、平面的にレーザーヘッドをスキャンさせることにより、面外方向の振動速度の平面分布を測定できる。コンクリートの振動のうち、着目している振動は、はく離面とコンクリート表面の間の板のたわみ振動である。たわみ振動を発生させるためにコンクリート表面で100dBになるように音源を調整している。また、振動測定は音の発生と同期させている。

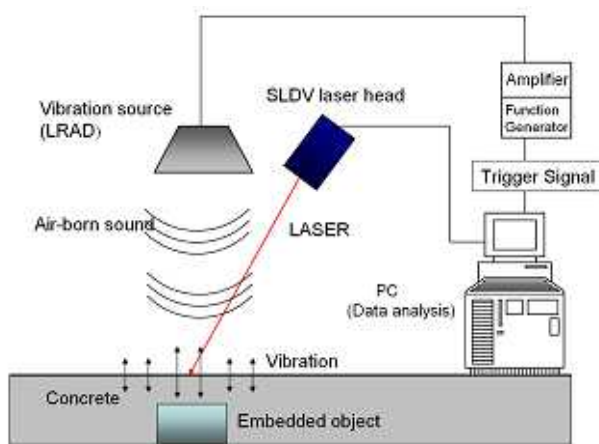


図-1 音響探査法のシステム図

2.2 現状の欠陥の検出方法とその課題

たわみ振動を見つけるために、異なる周波数を含む、音波をLRADで発生させる。最初に広い帯域のリニアチャープ波やホワイトノイズを用い、固有振動と考えられる振動が見られたら、周波数帯を絞ったチャープ波を与える。現在、チャープ波よりもトーンパース波の方が、発生するノイズの処理に優れていること、耳で聞いた場

合も不快感を与えないことから、トーンパース波を用いる方法⁵⁾を選択している。

欠陥があると考えられる領域について、SLDVで面的に振動を測定する。固有周波数と考えられる周波数に着目して、フーリエ振幅(振動速度)の分布を図化することにより、欠陥を検出する。正方形の空洞欠陥(100mm×100mm、深さ25mm)を図化した事例を図-2に示す。2800-4200Hzのチャープ波を与え、3993.5Hzで図化した結果である。フーリエ振幅の分布図を用い、文献⁴⁾に示すように、円形の空洞欠陥では平面規模(直径)が大きく、深さが浅い欠陥については欠陥の有無の探査が可能であることが確認されている。また、実際のはく離を想定した試験体を用い実験を行い、はく離面において十分な間隙がなくても、欠陥を探査できることを確認した。ただし、本技術を現地で適用するためには、以下に示すいくつかの課題がある。

- ・欠陥を検出するために、固有周波数を探し、平面的な分布をみるという手間がかかる。
- ・現地の測定を考える場合、測定領域が広いために、測定効率を考え、測定間隔を小さくできない。
- ・現地の欠陥は、固有周波数が一つであることが少ない。一つの測定領域の中に2か所の欠陥がある場合に、それぞれの欠陥の広さや深さが異なる場合に固有周波数を1つに限定することはできない。
- ・固有周波数が明確にならない欠陥もある。はく離欠陥では、コンクリートの接触箇所が含まれているため、理想的な試験体の欠陥のようにピークがきれいに立つことは少ない。

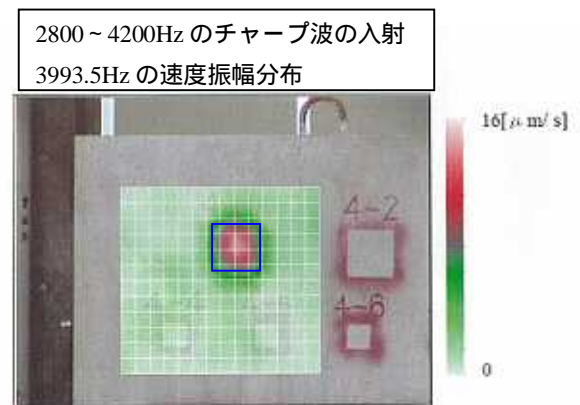


図-2 正方形の空洞試験体の探査結果

2.3 現地に適用できる探査システム

そこで、広領域と狭領域を分けた探査システムを検討するものとする。広領域で、測定間隔を広くとり、欠陥の有無のみを判定し、欠陥が検出された領域については従来の狭領域の探査を実施し、欠陥の広さや深さを確定するような方法を用いることとする。

(1) 広領域走査探査

広領域探査では、探査性能を考慮し、最大限の測定間隔を取るものとする。面的な測定データではなく、1点の測定データを用い、欠陥の有無を判別できるような探査アルゴリズムを検討することとする。探査アルゴリズムは簡略で、瞬時に判断できるものが望ましい。なお、本探査では、測定間隔が広がるため、スピーカーと振動計を一体化させ、次の測定点に向け移動できるシステムを用いることとする。

(2) 狭領域精密一括探査

狭領域探査では、広領域探査で欠陥が有りそうと判断された場所について、探査間隔を狭くして測定を実施する。上述した、LRAD+SLDV のシステムを用いることとする。本探査では、欠陥の深さや広さまでを評価できるようにする。そのためには、固有振動数、振幅以外に波形や FFT の結果を総合的に判断する必要がある。

3. 欠陥の有無の探査方法

最初に円形の空洞欠陥の試験体を用い、従来の叩き点検を行い、音響探査における検出目標を定めた。次に音響探査法で振動データを取り、探査アルゴリズムやしきい値について検討を行った。

3.1 円形欠陥の試験体と叩き点検の結果

本章で用いた円形空洞欠陥の試験体を写真-1 に示す。20 種類の欠陥を 2m x 1.5m x 0.3m の直方体の試験体に配置した。配置した欠陥の大きさは直径 50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 300mm の円形で深さ（表面から欠陥までの距離）は表-2 に示すように 4 通りに変化させた。円形空洞は、厚さ 2.5cm の発泡スチロール板でモデル化した。



写真-1 円形空洞欠陥の試験体

叩き点検では写真-2 に示す 2 種類の打撃用機器を用意し、それぞれの機器を用い、3名の被験者に欠陥の有無を判断してもらった。表-2 の中段が、点検結果で、左側が岩検ハンマーによる点検結果、右側がコンクリート点検器（先端を回転させながら打撃する）の結果で、印は 3 名ともに欠陥と判断、×印は 1 名または 2 名が欠陥と判断、×印は 3 名とも健全と判断した結果である。また、下段は、欠陥の表面側のコンクリート板を円形の板と仮定した場合の周辺単純支持の一次の厳密解である。用いた定数はヤング率 21GPa、密度 2350kg/m³、ポアソ

ン比 0.2 である。叩き点検では、平面規模が大きく、欠陥深さが浅いほど、探査が簡単であることが分かる。また、岩検ハンマー（薄いハッチ部分）に比較し、コンクリート点検器の方（うすい部分と濃い部分）が、探査できる範囲が広いことが分かる。これは、打撃面が凸のために、高周波数の振動の励起が可能であるためと考えられる。音響探査法における探査目標を岩検ハンマーの探査可能範囲よりも広い範囲とした。



写真-2 叩き点検に用いた打撃機器(左:岩検ハンマー, 右:コンクリート点検器)

表-2 叩き点検の結果

	深さ 100	深さ 80	深さ 60	深さ 40	深さ 20	深さ 10
50	-	-	f 50-60 × 66406Hz	f 50-40 × 44271Hz	f 50-20 × 22145Hz	f 50-10 × 11068Hz
100	-	f 100-80 × × 22135Hz	f 100-60 × 16602Hz	f 100-40 × 11068Hz	f 100-20 × 5534Hz	-
150	f 150-100 × × 12297Hz	f 150-80 × 9838Hz	f 150-60 × 7378Hz	f 150-40 × 4919Hz	-	-
200	f 200-100 × 6917Hz	f 200-80 × 5534Hz	f 200-60 × 4150Hz	f 200-40 × 2767Hz	-	-
300	f 300-100 × 3074Hz	f 300-80 × 2459Hz	f 300-60 × 1845Hz	f 300-40 × 1230Hz	-	-

探査目標

3.2 音響探査法による探査

音響探査法による振動測定を各欠陥中心で行った。測定データのうち、深さ 60mm の欠陥（100mm, 200mm, 300mm）を健全部（円形欠陥から離れた部分で測定）と比較し、FFT の結果を図-3 に示す。図-3 に示すように、100mm の結果では、健全部の結果と重なっており、欠陥部の認識は難しいものと思われる。200mm, 300mm の結果では固有振動のピークが分かるので、欠陥の認識は可能である。なお、1000Hz 前後の振動は SLDV の固有振動である。

著者らは、音響探査法における探査指標を検討するために、探査指標の選定を打音法により行った⁵⁾。その結果、振動エネルギー比とピーク周波数・ピーク振幅が適当と考え、測定データからこれらの探査指標を計算した。

振動エネルギー比の計算では、次式に示すように、欠陥中心のエネルギーを健全部の平均エネルギーで除して、dB 表示した。ここで X は周波数 における振動速度の周波数振幅、積分範囲は 1200Hz ~ 8000Hz である。図-3

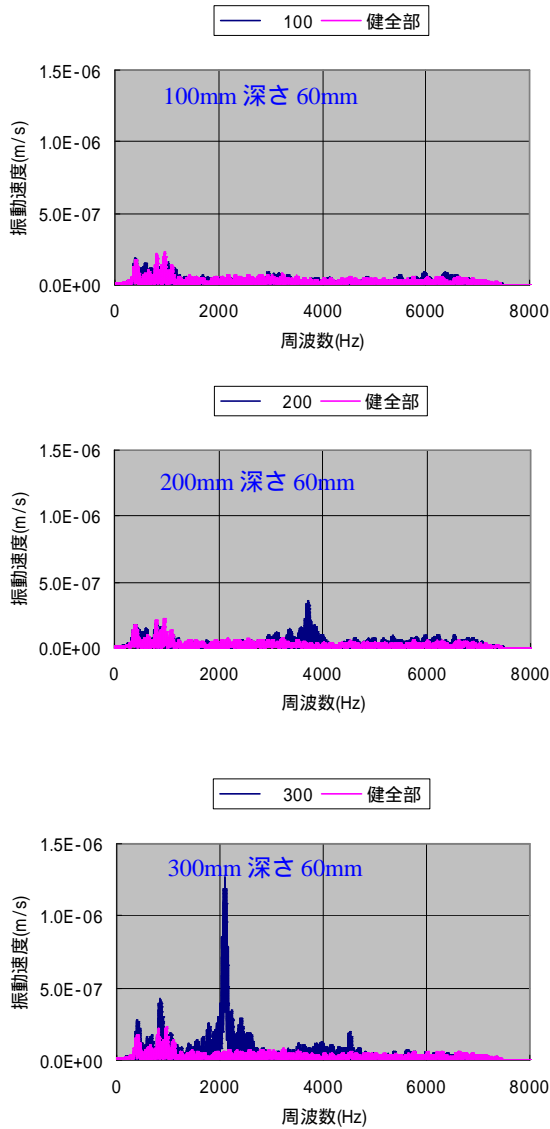


図-3 音響探査による測定結果

に示す各周波数における振動速度を2乗して足し合わせ、健全部に対する面積比をとったものである。SLDVの固有振動を避け、1200Hz以上を積分範囲とした。

$$VER(Vibration_Energy_Ratio) = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} (X_{defective_part}(\omega))^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} (X_{healthy_part}(\omega))^2 d\omega}$$

振動エネルギー比の結果を欠陥深さにごとに整理した結果を図-4に示す。この結果から、健全部の平均値をしきい値としたら(0dB)、コンクリート点検器以上の探査性能を有することとなる。ただし、健全部でも測定結果のばらつきがあるため、健全部の8データから2データずつのエネルギー比をとり、最大となる3.6dBをしきい値とした。このしきい値を用いた場合でも、岩検ハンマーの性能を超えていること(岩検ハンマー+f200-80, f150-40, f100-20)が分かる。

ピーク周波数、ピーク振幅の関係で整理した結果を図-5に示す。健全部のピーク振幅と比較して、大きな振幅となる欠陥は、振動エネルギー比で3.6dB以上の欠陥と同様であることが分かる。また、固有振動が確認された場合は、同じ欠陥深さで欠陥が狭くなると周波数は高くなることが分かる(図-5 緑色矢印)。このような関係を使うことにより、欠陥の規模(広さ、深さ)が推定できるものと考えられる。

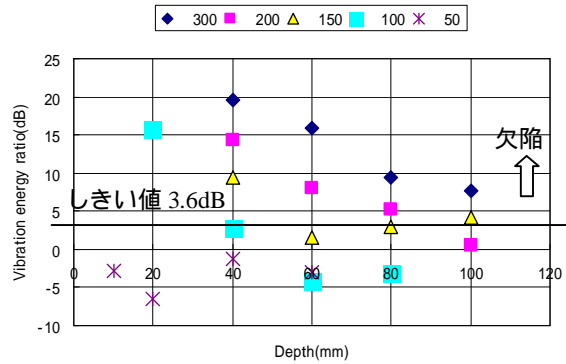


図-4 振動エネルギー比による探査

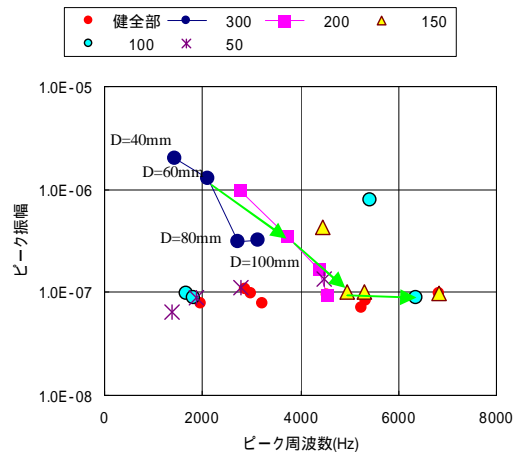


図-5 ピーク周波数・ピーク振幅による探査

4. RC床版への適用

本章では、現地のRC床版に対して音響探査法を適用した結果を示す。

4.1 RC床版の概要

対象とした床版は、写真-3に示す海岸に近い高速道路の片側2車線のRC床版(支間長15m)で、建設から30年程度経過している。対象とした測定範囲は、床版下面の海側の0.6m×5mの長方形の領域である。対象構造物の海岸線からの距離は200mである。本床版は塩害による鉄筋腐食に起因するはく離が生じており、表面被覆工の補修が実施されている。同時に実施された打音法の結果を図-6に示す。打音法⁵⁾とは、ハンマーによる打撃音をマイクロフォンで収録し、その音を分析することによ

り、コンクリート表層のうきやはく離、空洞の有無や規模を調べる技術である。本手法では、振幅の大きさから欠陥の深さを推定する手法を用いている。平面分布から、起点側から 2m までの領域(A 領域)には広い欠陥があり。3-5m の領域(B 領域)には、浅く狭い欠陥があることが分かる。A 領域では、複数の鉄筋で腐食が生じており、はく離が広い領域に広がっている。一方、B 領域では 1 本の鉄筋の腐食により、押しぬきせん断のような狭い領域のはく離になっていることが分かる。



写真-3 音響探査を実施した RC 床版

辺方向の固有振動が確認されたためと考えられる。また、健全部の 900Hz 前後に SLDV の固有振動と考えられる振動があり、円形試験体 (図-3) に比較し 5 倍程度と大きいことが分かる。これは、橋の下の閉鎖空間で、床版までの距離が 2m と近いため、音源が原因で、SLDV のヘッドの振動が大きくなったためと考えられる。



写真-4 音響探査による測定

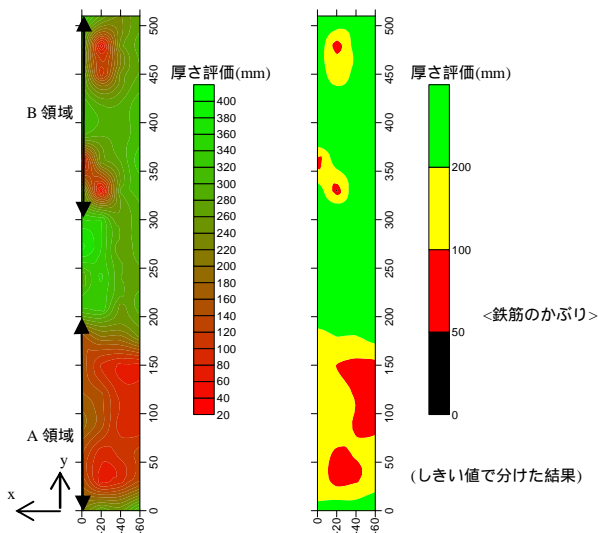


図-6 打音法による調査結果

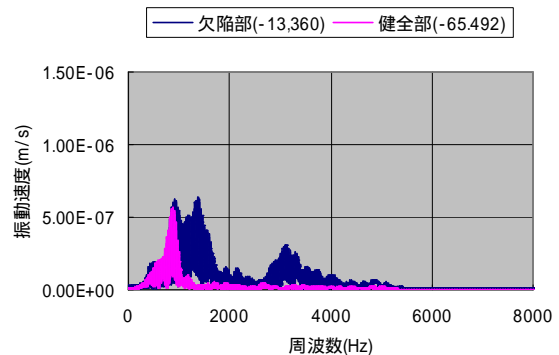


図-7 音響探査法による振動測定結果

4.2 音響探査による測定

音響探査では、写真-4 に示すように床版真下から床版に向けて音波を発生させる方法で測定を行った。音源は床版下面から 2m の位置に配置した。1 回の測定で 60cm × 60cm の領域を 13cm × 12cm 間隔(5 × 6 点)で測定し、その後、橋軸と平行に音源と振動計を移動させ、測定を繰り返した。トーンバースト波 (500-5100Hz) をノイズを抑制するため 1 点当たり 10 回送信し、加算平均した。

音響探査法による振動の測定結果を欠陥部と考えられる箇所 (図-8:-13,360)、健全箇所 (図-8:-65,492) と比較し、図-7 に示す。図-7 に示すように、1400Hz と 3200Hz ぐらいの 2 箇所にピークがあり、これは、欠陥が鉄筋上に沿った長方形の形状となっているため、長辺方向と短

音響エネルギー比をコンタ図で表した結果を図-8(左)に、しきい値で分別した結果を図-8(右)に示す。ここで、3.6dB は円形欠陥の試験体の健全部から設定した。7.2dB は岩検ハンマーで検出できる範囲である。10.8dB は健全部の 10 倍程度である。ピーク周波数とピーク振幅の結果を試験体の結果と比較して、図-9 に示す。なお、測定結果は、エネルギー比の 3 つの領域で色分けした。これらの結果から、以下のことが分かる。

図-8 から、エネルギー比が大きい赤色の部分と打音法の厚さが 100mm 以下の箇所 (図-6) と良好に一致している。音響探査で見つかった B 領域の主筋方向に細長い欠陥については、幅が狭いために打音法の測定間隔 (30cm × 20cm) では見つけられなかったものと思われる。一方、A 領域の広い欠陥 (x=-40 ~ -60, y=100 ~ 150) については中心部が健全な結果となっている。原因として、打音法に比較し加力値が小さく、厚く広い欠陥を振動させることが難しいこと、音源からの音が端部では音圧が低下する可能性があること、振動エネルギーの積分範囲

は、SLDVの固有周波数を避けた範囲(1.2~8kHz)のため、1.2kHz以下に固有振動がある欠陥はエネルギーが考慮されないことが考えられる。

図-8のしきい値で分けた結果からは、欠陥箇所を3.6以上(黄色+オレンジ色+赤色)とすると、やや打音法の結果200mm以下よりも広い領域が欠陥とみなされる。7.2dB以上の領域(オレンジ色+赤色)では、岩検ハンマーで検出できる範囲と同程度の欠陥と判断される。10.8dB以上(赤色)は確実に欠陥があるものと考えられる。3.6dB以上の範囲が広い原因として、車の走行振動の影響があるものと予想される。

図-9から、ピーク振幅の大きさとエネルギー比は相関があることが分かる、したがって、ピーク振幅の大きさのみからも欠陥の判定はできるものと考えられる。エネルギー比が10.8dB以上の測定結果(赤四角)については、深さや広さの傾向も分かる。例えば、B領域の細長い欠陥では、ピーク振幅の違いから、長手方向のはく離深さが変化していることが推定される。

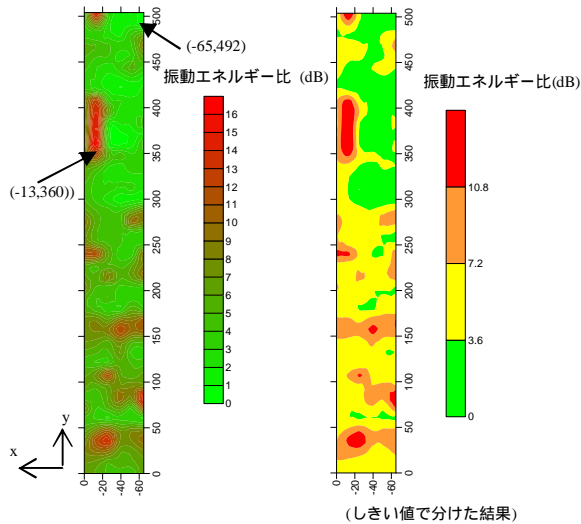


図-8 振動エネルギー比による探査結果

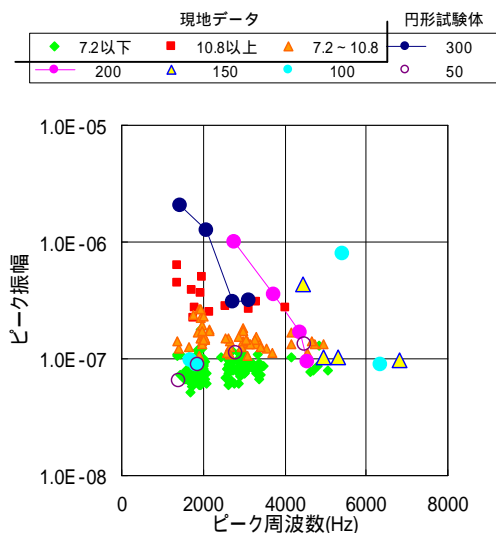


図-9 ピーク周波数・ピーク振幅による整理

5. まとめ

音響探査法における探査アルゴリズムについて検討を行い、実際のRC構造物へ適用した。その結果、以下のことが分かった。

- ・車が走っている供用中で振動している橋梁床版に対し、音響探査法によるコンクリート表層の探査が可能である。
- ・振動エネルギー比を用いた評価により、叩き検査で抽出できる、鉄筋のかぶり程度の深さ100mm以浅のはく離欠陥については抽出することが可能である。音響探査法では、簡易に測定間隔を変化させることができ、塩害による1本の鉄筋の膨張に伴う、幅が狭いのはく離の抽出も可能である。
- ・ピーク周波数・ピーク振幅を用いた評価により、欠陥の形状(広さ、深さ)を推定できる可能性がある。
- ・打音法で探査可能な100mm以深のはく離欠陥については、現状の音源の音圧では振動させることが難しいことなどが原因で、探査が難しいことが分かった。

今後、橋梁を含め、各種の構造物について、音響探査による測定を行い、現地への適用上の課題の抽出および改良を進める。さらに自動化のシステムの検討も進め、音響探査の実用化を行う予定である。

謝辞：本研究は、国土交通省「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の予算で実施されたものです。また、現地の測定では、NEXCO 中日本(株)および金沢工業大学の支援をいただき、実施しました。関係者には謝意を表します。

参考文献

- 1) 伴享,歌川紀之,市野大輔,林忠男,高橋浩,北川真也,村本利行:トンネル覆工打音自動化システム「ライニングヒッター」の開発,佐藤工業(株)技術研究所報,No.29,2003.
- 2) 内藤孝和,露木寿,秋山保行,小関昌信:土木構造物の非破壊検査技術に関する研究開発,JR EAST Technical Review,pp.51-54,No.39.
- 3) 篠田昌弘,大村寛和,御崎哲一,島田義則,内田成明:レーザー加振によるコンクリート部材の非破壊検査法の開発,RTRI Report ,pp.29-34,Vol.23,No.12,Dec.2009.
- 4) 杉本恒美,赤松 亮,歌川紀之,片倉景義:音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥の探査技術の開発,土木学会第65回年次学術講演会概要集,V-030,pp.59-60,2012.
- 5) 歌川紀之,片倉景義,赤松 亮,杉本恒美:音響探査法を用いたコンクリート構造物の健全性評価(3)-トーンバースト波とタイムゲートを用いたS/N比の改善-,佐藤工業(株)技術研究所報,No.38,2013.