

# 論文 コンクリート非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法

杉本 恒美\*1・赤松 亮\*2・歌川 紀之\*3・片倉 景義\*4

**要旨:** コンクリート表面近くの内部に存在する空洞やひび割れを 5m 程度以上の遠距離から検出することができる非接触音響探査法について検討を行っている。今回は、その検出原理と検出可能な欠陥について検討を行った。検出原理としては高音圧と強い指向性を発生できる長距離音響放射装置を用いて、コンクリート表面近くの欠陥部にたわみ共振を発生させ、その振動速度をレーザドップラ振動計により検出するというものである。コンクリート供試体を用いた実験的検討を行い、コンクリート表面近くに存在する空洞やひび割れを 5m 程度以上の遠距離から検出することが可能であることを明らかにした。

**キーワード:** 非接触音響探査, 空中放射音波, 非破壊検査, レーザドップラ振動計, 長距離音響放射装置

## 1. はじめに

コンクリート構造物表面のクラックや劣化の程度を調査する方法は、すでに様々な手法が開発されている。しかしながら、これらの調査方法の多くは検査対象物に接触もしくは極めて接近して使用する必要があるために、足場や高所作業車を必要とするという問題点がある。さらに、平成 24 年 12 月の笹子トンネル天井板崩落事故に象徴されるように我が国の高度成長期に建設されたコンクリート構造物およびその付帯設備の点検管理が非常に重要であることが一般にも広く認識されたことから、早急に遠距離から非接触で行える非破壊検査法の確立が点検現場からも強く望まれている。

実際に 5m 以上の非接触で実施できる非破壊検査法としては赤外線法とレーザリモートセンシング法<sup>1)</sup>があげられるが、前者は環境条件に依存すること、後者は高出力のレーザが必要となり安全性の面に不安があることが問題となっており従来の打音法の代替手法とはならないことが指摘されている。また一方で、衝撃波<sup>2)</sup>や空中放射音波<sup>3-4)</sup>を振源とし、レーザドップラ振動計により計測を行う手法も提案されてきたが、実際に 5m 程度以上の遠距離で安定的な計測が実現できていなかった。しかしながら、本研究では高音圧と強い指向性を発生できる長距離音響放射装置(LRAD:Long Range Acoustic Device)を用いた非接触音響探査法の検討を行い、5m 以上の離隔であっても、安定的に通常の打音検査とほぼ同程度の検出精度を有することを実験的に明らかにしてきている<sup>5)</sup>。本論文ではその検出原理と検出可能な欠陥の大きさおよび深さとたわみ共振周波数との関係等についてコンクリート供試体を用いた実験的検討を行った。なお、本研究で対象とする欠陥は、鉄筋腐食や施工不良に起因するコンクリート表層の浮き、剥離、空洞などである。

## 2. 遠距離非接触音響探査法の概要

### 2.1 非接触音響探査法の探査原理

スキャンニング振動計(SLDV:Scanning Laser Doppler Vibrometer)と空中放射音源 (LRAD) を用いた非接触検査法(以下音響探査法)の基本セットアップ図を図-1 に示す。もし、コンクリート表層部に、空洞やひび割れ等の欠陥による空気層が存在していた場合、その上の部分ではコンクリートの板状部分が構成される。その欠陥部は健全部に比べ曲げ剛性が低下するため、たわみ振動が生じやすくなる。例えば欠陥部分の形状を円形と想定した場合、単純支持した円形板と近似できる。そのときの一次固有振動数は以下の式で表される<sup>6)</sup>。

$$f = \frac{4.98h}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

ここで  $h$  は板の厚さ  $a$  は円の直径、 $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比、 $\rho$  は密度である。(1) 式よりたわみ共振周波数は深さ(板厚)に比例し、直径の 2 乗に反比例することが予想できる。

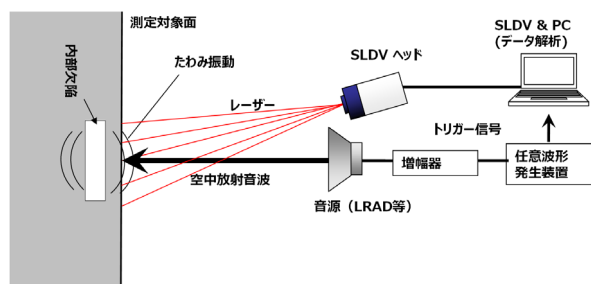


図-1 非接触音響探査の基本セットアップ図

もし、その固有振動数を含んだ音波がコンクリート壁面に照射された場合、欠陥部上ではたわみ振動が生じる。その振動速度分布を SLDV により二次元的にスキャンす

\*1 桐蔭横浜大学 大学院・工学研究科教授 工博 (正会員)

\*2 桐蔭横浜大学 大学院・工学研究科 (非会員)

\*3 佐藤工業 技術研究所・上席研究員 工博 (正会員)

\*4 明篤技研・代表 工博 (非会員)

ることで、欠陥部位・形状を特定することが可能である。

## 2.2 送信波形について

### (1) チャープ波

当初、使用した音波の波形については周波数応答帯が全く分からない時には1秒間のホワイトノイズを、ある程度周波数応答帯が判明した場合にはその応答帯域を含むような周波数帯でのチャープ波を送信することにより探査を行っていた。チャープ波の送信持続時間はスキャン間隔にも依存するが、通常約640ms-1.8s程度である。周波数帯はLRADの特性に合わせて500Hzから数kHz程度である。

### (2) トーンバースト波

広い周波数帯をもつチャープ波を送信した場合には、比較的長い持続時間が必要となる。しかしながら、音源からの直接波および対象面からの反射波により計測用のレーザヘッドが振動し、それがS/N比に悪影響をもたらしていることが明らかになった。一方でレーザ光と音波の空気中伝搬速度は大きな差があるため、持続時間の短いパルスを用いれば、欠陥部が振動している間のみ計測することが出来、ノイズ成分を分離することが理論的に可能である。そして音波によるノイズ信号は音源からの直達波およびコンクリート壁面からの反射波であるが、計測機器間の距離や機器と対象物の距離などが既知であればこのノイズ信号の出現タイミングは予測可能である。したがって、タイムゲートを施すことで高精度かつ見落としの少ない検査が可能となる。また、実際には欠陥部の共振周波数は不明であるため、広い周波数帯をカバーする必要がある。そのため、図-2(a)に示すように、中心周波数の異なるパルスを逐次的に送信したパルス列(トーンバースト波)を用いることにより、欠陥部の周波数応答を検出する。図-2(b)に示すように各パルスの中心周波数に対する不足成分を互いに補うような周波数特性を各パルス列に持たせることで、擬似的に広帯域かつフラットな周波数成分が得られる。

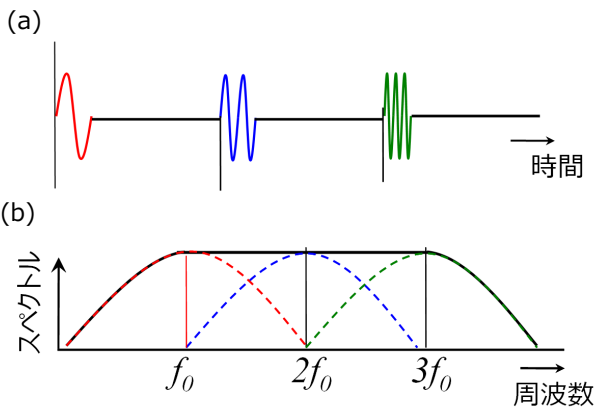


図-2 送信に使用したトーンバースト波の模式図、

(a) 時間波形、(b) 周波数スペクトル

## 2.3 照射角度の検討

トンネル内部や橋梁等の高所を探査する場合には音源およびLDVの照射角度が理想的な鉛直からかなり離れた角度にせざるを得ない状況が想定される。そのため、現状でどのような照射角度まで計測可能かどうかについて検討した。

### (1) 入射音波角度と振動振幅の関係

欠陥部上における入射角度 $\theta$ の音圧分布 $p(x)$ を図-3に示す。図中の網掛け部がコンクリート部を、黒太線部が欠陥部上のたわみ振動を起こすコンクリート部を示している。したがって、内側の白四角部分が空洞部を示している。ここで、 $\lambda$ は入射音波の波長を、 $x$ は欠陥部中央からの水平距離を表している。欠陥部上の $x$ 軸上に欠陥部の固有モード $u(x)$ を投影すると相反定理より、欠陥部上の振動振幅は固有モード $u(x)$ と音圧分布 $p(x)$ の相互相関により与えられる。したがって、入射音波により形成される励振力 $F(\theta)$ は、固有モード形状 $u(x)$ のフーリエ変換により与えられる。

$$F(\theta) = \int_{-D/2}^{+D/2} u(x) \cdot p(x) dx \quad (2)$$

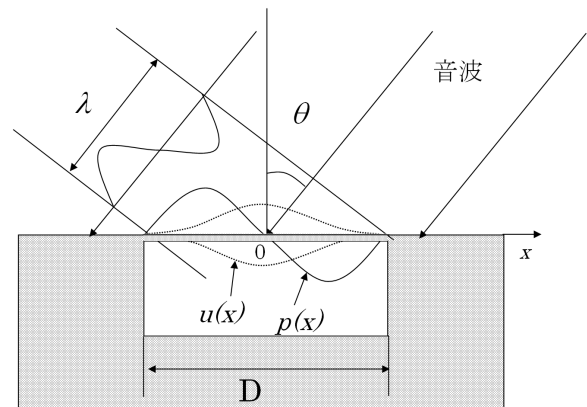


図-3 入射音波の角度と振動振幅との関係

反射強度が低下する限界の角度は、音波の波長を $\lambda$ 、共振系の口径幅を $D$ として、ほぼ $D \sin \theta_0 = \lambda$ なる角度 $\theta_0$ となる。従って、この角度 $\theta_0$ を反射限界角度とすると

$$\theta_0 = \sin^{-1}(\lambda/D) = \sin^{-1}(c_0/Df) \quad (3)$$

となる。この関係を、空中(音速:340m/s)の場合で示すと図-4となる。反射限界角度が90度となり、入射角が制限されなくなる条件は、 $c_0/Df=1$ から、 $Df=c_0$ にて与えられる。この関係を図の太線に示す。また、図中の度は反射限界角度を、欠陥寸法とは共振系の口径幅を示している。

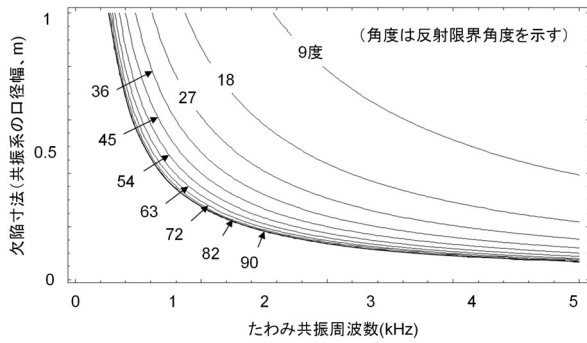


図-4 反射限界角度, 欠陥寸法および共振周波数の関係

図より, 例えば 0.3m 角の欠陥寸法で 1.8kHz 程度のたわみ共振周波数であるとすると音波入射限界角度は約 40 度程度であることがわかる。

(2) レーザ光入射角と振幅計測値との関係

変位計測用レーザ光の入射角と振幅部の位置関係を図-5 に示す。図中の網掛け部分がコンクリート部を, 内側の白四角部分が空洞部を表している。ここで, レーザ光入射角度を  $\theta$ , 振動部の振動振幅を  $\varepsilon_0$  すると, 黒点にて示す反射源は, レーザ光に対して  $\varepsilon(\theta)$  の距離変化を与えることとなる。従って, 振動振幅の計測値  $\varepsilon(\theta)$  とレーザ光入射角  $\theta$  の関係は, 振動振幅を  $\varepsilon_0$  として

$$\varepsilon(\theta) = \varepsilon_0 \cos \theta \quad (4)$$

となる。したがって, レーザの場合は入射角が 60 度程度であっても垂直入射の場合の半分程度の振動振幅計測値が得られることがわかる。

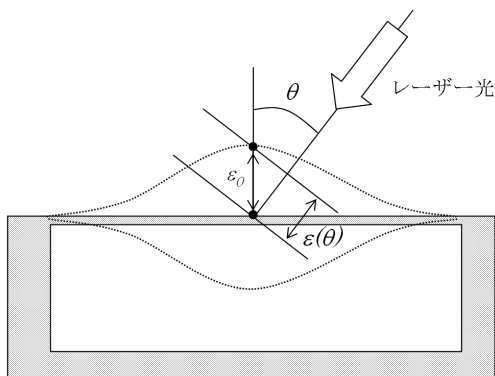


図-5 レーザ光入射角と振幅計測値

2.4 10m 遠方からの実証試験結果

本手法が実際に 5m 以上の離隔で探査が行えることを確認するために実証実験を行った。図-6 に音源とコンクリート供試体間は 10 m に設定した場合の実験セットアップの概念図を示す。音源である LRAD は供試体に正対して設置し, SLDV はそのやや斜め後方の位置から計測を行った。高さは測定対象の欠陥部の中央位置と同じぐらいになるように調整した (約 1.2m 程度)。実験に用い

たコンクリート供試体の大きさは 150×200×30 cm<sup>3</sup> である。供試体には深さ 5 cm の位置に 30×30×2.5 cm<sup>3</sup> の発泡スチロール板が埋設されている。音源としては米 LRAD 社の LRAD 300X を, SLDV としては独 Polytec 社の PSV400-H4 を使用した。また, 探査用の送振波形としては広い周波数帯域を持ったチャープ波を用いた。実験時の出力音圧はコンクリート表面付近で約 110 dB である。

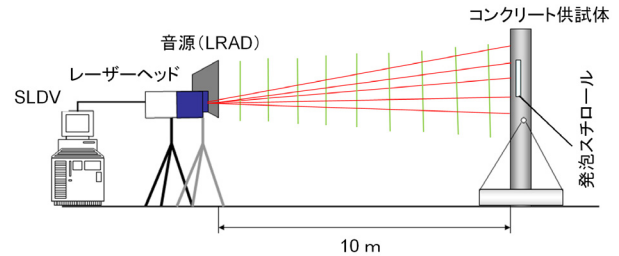


図-6 遠距離計測実験のセットアップの概念図

図-7 に欠陥部の応答周波数帯の輝度映像結果 (周波数スペクトルの最大値で規格化したスペクトル表示) を示す。探査用のリニアアップチャープ(500-4200 Hz, 1800-2400 Hz)を送振した結果, 2 kHz 周辺で明瞭なスペクトルピークを存在することがわかる。帯域を絞ったチャープ(1800-2400 Hz)を送振した場合の SLDV の振動速度分布の映像化例を図-8 (映像化周波数は 1998Hz) に示す。図中の大きな白四角が埋設物の位置と大きさを示しており, その他の細白線の交点はスキャンポイント位置を示している。スキャン領域は 60×70cm<sup>2</sup> の大きさで, 計測ポイント数は 195 (13×15) ポイントである。この映像から埋設物中心での振動が見てとれる。この結果から, 10 m の離隔であっても欠陥検出が可能であることを確認した。

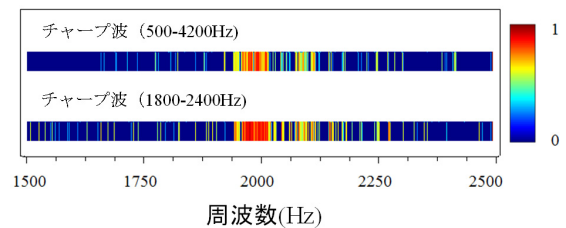


図-7 欠陥部の応答周波数帯の輝度表示結果例

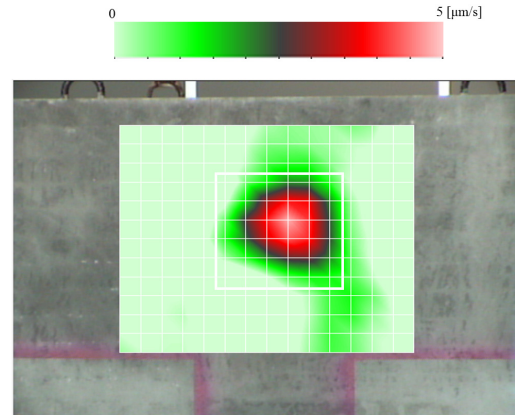


図-8 振動速度分布図 (映像化周波数 1998Hz)

## 2.5 測定可能距離限界について

更に同じ欠陥対象(30×30×2.5 cm<sup>3</sup>, 深さ 5 cm)を用いて本手法における最大測定距離の検討を行った。10 m から更に 15 m, 20 m と音源と供試体間の距離を離して測定を行った。出力音圧はコンクリート表面付近で 120 dB となるように設定した。図-9 に応答周波数帯の輝度映像化結果を示す。図はスペクトルの最大値で規格化しているために、距離を離すにつれ段々と応答が弱くなっていることがみてとれる。なお、測定距離を長くすると、計測可能領域は増えていくが、ここでは、測定距離限界を調べるために欠陥部中央のみの計測を行っている。

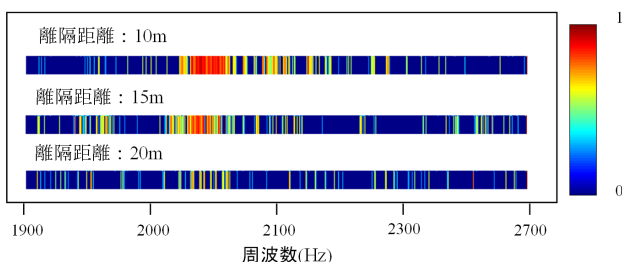


図-9 欠陥部の応答周波数帯の輝度表示結果例

この結果から現時点での最大測定可能距離は 20 m 以内にあると思われるが、この限界は音響側ではなく、レーザ側の出力が安全のため 1mW 程度と低いことが原因であり、高い出力をもつ長距離用レーザを使用すればさらに長距離の計測が可能になる可能性がある。

## 3. 検出可能な欠陥の大きさ及び深さについて<sup>7)</sup>

### 3.1 円形欠陥モデルについて

検出可能な空洞の大きさ及び深さについて検討するために、埋設深さと直径を変化させた円形欠陥モデル(発泡スチロール 25mm 厚)を埋設したコンクリート供試体(2×1.5×0.3m<sup>3</sup>)を製作した。円形発泡スチロールの直径および深さは直径 50mm のものが深さ 10, 20, 40 及び 60mm に、直径 100mm のものが深さ 20, 40, 60, 80mm に直径 150, 200 および 300mm のものが深さ 40, 60, 80, 100mm の位置に埋設されている。なお、使用したコンクリート供試体の配合表を表-1 に示す。

表-1 供試体に用いたコンクリートの配合

Gmax(mm)	空気量(%)	W/C(%)	s/a(%)	水(kg/m <sup>3</sup> )
20	4.5	49.5	42.9	162
セメント(kg/m <sup>3</sup> )	細骨材(kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材(kg/m <sup>3</sup> )	混和剤(kg/m <sup>3</sup> )	
327	786	1061	3.270	

### 3.2 円形欠陥モデルを用いた叩き点検法との比較

円形欠陥モデルを用いた場合の探査結果を表-2 に示す。上段は岩検ハンマーを用いた叩き点検法による検出の可否(3 名でブラインドテストを行い、○は検出可能、△は判定が分かれるもの、×: 検出不可)、下段は本手法

による検出の可否(○は検出可能、かつ SLDV の共振ピーク以上の共振ピークを検出した場合で、その共振周波数を表示、△は SLDV の共振ピークと同程度以下のピークを検出した場合、×: 検出不可を示す)を示している。岩検ハンマーを用いた叩き点検では、打音検査のプロではない素人の方に自由に叩いて判定をしてもらった場合の結果である。両手法ともに加振方法に違いがあるにも関わらず、同様な探査性能を示していることがわかる。

表-2 円形欠陥モデルの探査結果

(mm)	深さ100	深さ80	深さ60	深さ40	深さ20	深さ10
直径 50	-	-	△ ×	△ ×	×	×
直径 100	-	×	×	×	△ ○5430Hz	-
直径 150	×	×	△ △4958Hz	△ ○4449Hz	-	-
直径 200	×	×	○ ○3733Hz	○ ○2762Hz	-	-
直径 300	○ △3155Hz	○ △2734Hz	○ ○2106Hz	○ ○1449Hz	-	-

### 3.3 FEM 固有値解析による結果との比較例

周辺を単純支持(並進変位のみ拘束し、回転自由)とした円板要素による FEM 固有値解析の結果と実験値との比較を行った(ヤング率 35GPa, 密度 2400kg/m<sup>3</sup>, ポアソン比 0.2 として計算)。計算結果例を図-10 に示す(図中の実線が解析値、マーカは実験値を示す)。直径 300mm の円形欠陥の場合は FEM 解析結果とほぼ等しい結果となり、たわみ共振周波数は欠陥上部の厚みに比例していることがわかる。しかしながら、それよりも小さな欠陥は解析結果とは合わない結果となった。これは、欠陥部の直径が小さくなると、欠陥部周辺の回転変位が拘束されることで、FEM 解析の仮定である回転変位が自由という条件と合わなくなるためと考えられる。

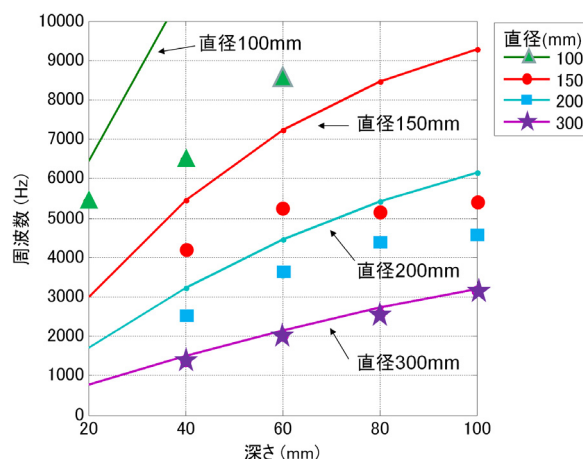


図-10 周波数 vs. 欠陥深さ (FEM 解析結果例)

## 4. 模擬欠陥モデルを用いた探査結果について<sup>8)</sup>

表層部のはく離や空洞を模擬するため、発泡スチロールを埋設した試験体を用いてきたが、実際の塩害による

鉄筋膨張で生じるはく離などを想定する場合、はく離の隙間はかなり狭いことも想定される。鉄筋を強制的に腐食させ、はく離を発生させることも可能であるが、はく離の間隙幅やはく離広さを定めた定量的な試験体とはならない。本研究では、一度、割裂させた試験体を用い、間隙幅を変化させ、再度コンクリート内部に埋設することにより、非接触音響探査法の適用性検討のための試験体を作った。本試験体を用い、間隙幅の変化により、探査性能にどのような影響を与えるのかを調べた。

**4.1 はく離モデルを用いたコンクリート供試体について**  
剥離欠陥モデルは壁型供試体(150×200×30 cm<sup>3</sup>)にひび割れを有した小型供試体(以下はく離モデル)を埋設することで再現した。はく離モデルの製作手順を以下に示す(図-11 参照)。

- (1) 円柱状コンクリートピース(φ100×200 mm)を割裂引張強度試験により2つに割裂させる。
- (2) 測定面側をフラットにするため、割裂させたテストピースのうち一つを半分にカットする。
- (3) 割裂させた二つの供試体間に金属スペーサを挿入することで間隙幅を調整。
- (4) エポキシ接着剤をひび割れ部周囲に塗布。供試体の固定とともに、後に流し込むコンクリートの侵入を防ぐ。

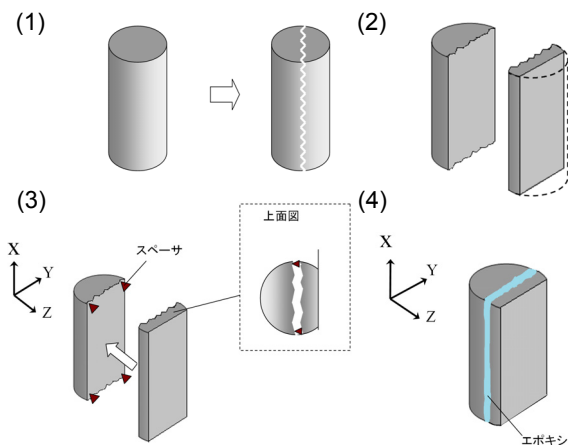


図-11 はく離モデルの製作手順

埋設したはく離モデルは4種類で、内3種類それぞれ間隙幅が異なる。この時調整した間隙幅は1.0 mm、0.5 mm および0 mm である。0 mm のものは割裂後にスペーサなどを挿入せずに再度固定したものである。残りの1つは空洞の代わりとして厚さ25mmの発泡スチロールを挿入したものである。埋設後の各試料のひび割れの深さは25 mm 程度、欠陥寸法は100×200 mm<sup>2</sup> である。これらの試料を埋設したコンクリート供試体(200×150×30 cm<sup>3</sup>)を製作して実験に使用した。なお、コンクリート供試体の配合は表-1 と同じものを使用した。

## 4.2 実験セットアップ

実験は室内で行なわれた。音源-供試体間の距離は5 m とし、高さはコンクリート供試体に埋設した各欠陥位置に対し、正対させるようセットアップしている。そのため、SLDV 側のレーザの照射角度は若干斜めからとなる。送振波形は0.5-7 kHz 程度周波数帯域を持った探査用のトーンバースト波を用いた。出力した音圧はコンクリート表面付近で100 dB 程度である。

## 4.3 はく離モデルを用いた探査結果について

各欠陥試料の位置の中心点上の振動速度スペクトルとその周辺の健全部上の振動速度スペクトルを比較した結果を図-12に示す。(a)は深さ25 mm、欠陥寸法100×200 mm<sup>2</sup> のものである。図中の発泡スチロールおよび間隙幅1.0 mm では3.5 kHz 周辺で明確な応答が見られる。

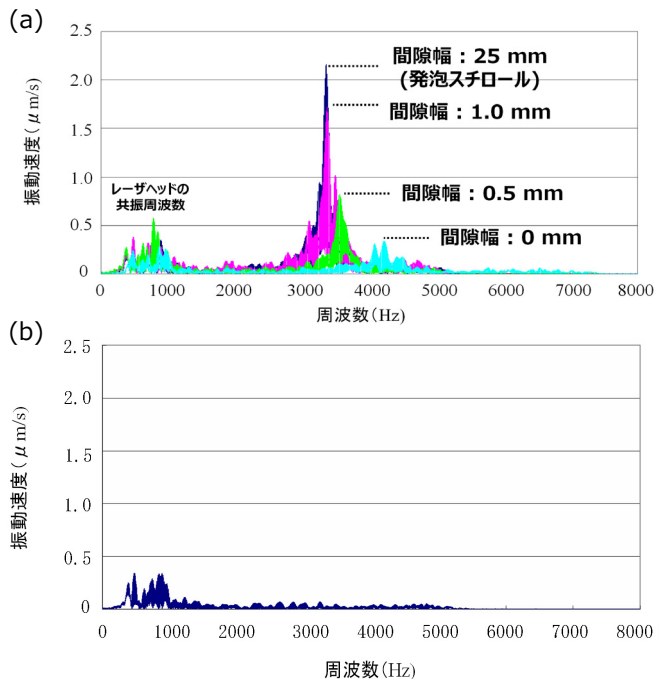


図-12 振動速度スペクトルの計測結果

- (a) 深さ25 mm、欠陥寸法100×200 mm<sup>2</sup>、
- (b) 健全部の振動速度スペクトル

0.5 mm と0 mm においてもピークが確認出来るが、発泡スチロールと間隙幅1.0 mm のものに比べると振幅が小さい。これは設定間隙幅が狭くなったため、割裂したテストピース間の接触面積が増加していることが影響していると考えられる。(b)は同じコンクリート供試体の健全部での振動速度スペクトルの計測結果例である。両図ともに約1 kHz で見られるピークはSLDV レーザヘッド自体の共振周波数である、健全部ではレーザヘッド自体の共振を除くと他には共振ピークが存在していないことがわかる。これらの結果から、ここで示す割裂欠陥の広さと深さであれば、間隙幅が0mm であっても、欠陥の有無については探査できることが分かる。

## 5. 振動エネルギー比を用いた欠陥深さ評価

### 5.1 振動エネルギー比の定義

非接触音響探査法と打音法では検出される周波数帯はほぼ同じであることから、同様な欠陥部のたわみ共振現象を観測していることは明らかである。したがって、同様な計測アルゴリズムが適用できる可能性もあると思われる。一方、すでにマイクロホンを用いた打音法では、打撃力振幅値で打撃音振幅値を正規化する、いわゆる振幅値比を用いることで欠陥の深さや部材の厚さの定量的な評価が行われている<sup>9)</sup>。しかしながら、非接触音響探査法での計測値はあくまでもレーザドップラ振動計による振動速度のみになるため、単純に同じアルゴリズムを適用することは困難である。そこで、ここではある周波数範囲での振動速度のパワースペクトルの和を振動エネルギーに対応する値であると考え、その場合、欠陥部と健全部には明確な差が生じていることが考えられる。そこで、振動エネルギー比(VER: Vibration Energy Ratio)を下式のように定義する。

$$VER = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} (X_{defective\_part}(\omega))^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} (X_{health\_part}(\omega))^2 d\omega} \quad (5)$$

### 5.2 振動エネルギー比による欠陥深さ評価の検討

実際に円形欠陥モデルの場合に、振動エネルギー比を適用した結果を図-13に示す。図より半径がそれなりの大きさ(200φ~300φ)であれば、広い範囲(40mm~100mm)で、振動エネルギー比と欠陥深さが反比例していることがわかる。この事実は振動エネルギー比により欠陥深さが推定できる可能性があることを示している。

## 6. まとめ

5m以上の遠隔からでもコンクリート構造物の非破壊検査が可能な非接触音響探査法の基本原理、検出可能な欠陥の大きさや深さ等について検討した。最初に円形欠陥モデルを用いた実験結果より、5mの離隔でも打音法と同様な探査性能を示していることが明らかになった。次にはく離モデルを用いた実験結果より、割裂幅0mmのひび割れであっても検出可能であることも明確になった。以上より、本手法は打音法と同じたわみ共振現象を利用していることから、将来的には打音法に置き換わる標準的なコンクリート構造物の遠距離非破壊検査法として期待できると思われる。今後は振動エネルギー比等を用いた欠陥検出アルゴリズムの検討を進める予定である。

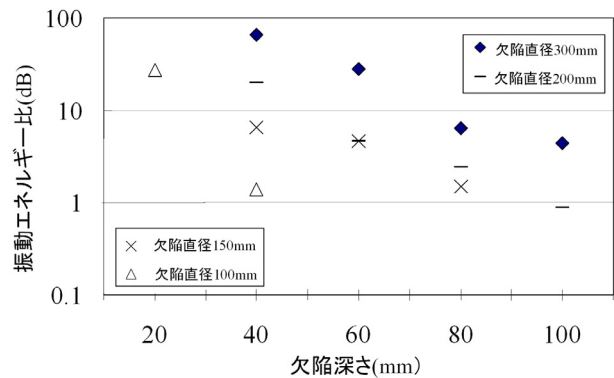


図-13 欠陥部と健全部の振動エネルギー比の例

### 参考文献

- 1) 島田義則,コチャエフ オレグ,篠田昌弘,御崎哲一,高橋康将,瀧浪秀元: レーザを用いたコンクリート欠陥検出の進展, 非破壊検査 61(10), pp519-524, 2012.10
- 2) 森和也,Andrea SPAGNOLI, 村上敬宣,鳥越一平: コンクリート構造物の圧力波を用いた新しい非接触非破壊検査法,コンクリート工学年次論文集 Vol.24, No.1, pp.1473-1478, 2002
- 3) 貝戸清之,阿部雅人,藤野陽三,熊坂和弘: 局所的な振動特性に着目したコンクリート構造物の空隙検出, 土木学会論文集, No.690, pp.121-132, 2001
- 4) 森和也,鳥越一平,百崎敦彦,岩本達也: 周波数スイープ音波を用いた壁面加振によるコンクリート構造物の非破壊検査, 日本機械学会論文集, 72 巻, 723 号, pp.1787-1792, 2006
- 5) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa and K.Katakura: Proposal of Non-Contact Inspection Method for Concrete Structures, Using High-Power Directional Sound Source and Scanning Laser Doppler Vibrometer, Jpn. J. Appl. Phys.,Vol.52, 07HC12, 2013.7
- 6) 日本機械学会編:機械実用便覧(改訂第6版), 丸善株, 東京, 2006.9
- 7) 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探査技術の開発, -(1) 検出可能な欠陥の大きさおよび深さに関する検討-, 土木学会土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68, pp173-174, 2013.9
- 8) 赤松亮, 杉本恒美, 歌川紀之, 片倉景義: SLDV と空中放射音波を用いたコンクリート表層部の欠陥映像化に関する研究, - 剥離欠陥検出の検討-, 信学技報 US2012-111, No.437, pp.1-6, 2013.2
- 9) 歌川他: 打音法における欠陥検知に関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.58, pp765-766, 2003.9