

SLDV と空中放射音波を用いたコンクリート非破壊検査

—振動エネルギー比を用いた探査アルゴリズムに関する検討—

Study on the Non-destructive Inspection Method for Concrete Structures

by using Air-coupled Sound Wave,

-Study about the defective investigation algorithm using a vibrational energy ratio-

杉本 恒美・赤松 亮

桐蔭横浜大学大学院工学研究科

(2014年3月20日 受理)

1. はじめに

平成24年12月2日に発生した笹子トンネルの天井板崩落事故は、わずか5m先のアンカーボルト先端の叩き点検を怠っていたために生じたことは記憶に新しい。日本の高度成長期に構築された大量のコンクリート構造物はすでに築後30～40年近くが経過しており、笹子トンネルと同様に劣化が進んでいることが予測できる。しかしながら、現在の点検方法は基本的に昔ながらの目視点検と打音点検のみであるため、高所や手の届かない場所の点検は実際にはすべては手が回らないというのが実情である。また、打音検査の場合、大型構造物を対象としたときに高所での作業は避け難く、安全性からも問題がある。そのため、遠距離からでも適用可能な打音に置き換わる手法の開発が望まれている。このような要請に対し、様々な非接触検査手法が提案されてきた。特に欠陥部位の振動特性に着目した手法が活発で、非接触による加振法と組み合わせることが出来れば、遠方からの検査が実現出来る可能性がある。加振方法には様々な方法が提案されている。例えば衝撃波を用いた方法¹⁾では、遠方からの計測の実現

が期待されるが、装置が大型になってしまうのと、連続的な走査に難があった。また、パルスレーザを振源として用いた手法はレーザ出力を上げれば計測距離を伸ばすことが出来、実用化が期待されているが、現段階では電源や安全性に課題が残っていると思われる²⁾。一方で、音波を用いた方法では装置も安価で、連続的な走査も容易である^{3,4)}。しかしながら、トンネル覆工や橋げた等を想定した場合、最低でも5m以上の離隔は必要であり、音波は空気中の減衰が激しいため、市販のラウドスピーカでは十分な加振力を得ることは出来ない。そこで、本研究では長距離音響発生装置(LRAD: Long Range Acoustic Device)とスキニング振動計(SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer)を組み合わせたシステムを提案している^{5,7)}。LRADは鋭い指向性を持ち、10m遠方でも100dB以上の音圧を維持することの出来るスピーカである。LRADを用いることで、より広域にわたる領域での探査が実現出来る可能性がある。

我々はいままでに、空洞欠陥を模擬した発泡スチロールを埋設したコンクリート供試体を用いた実験を行い、10m前後の離隔から欠陥検出が可能であること⁸⁾、ひび割れを

模擬した剥離欠陥の供試験体を用いて、間隔0mmのひび割れであっても検出可能であることなどを示してきた。しかしながら、実構造物に本手法を適用する場合には迅速かつ定量的な欠陥判定法が必要である。従来はたわみ共振のスペクトルピークに着目してきたが、実際のコンクリート構造物中の欠陥形状は一定ではなく複雑であるため、多様な振動モードが発生し、検出されるスペクトル形状も複雑である。そこで、今回はたわみ共振のスペクトルの面積、いわゆる振動エネルギーに着目した手法について検討する。

2. 探査原理

SLDVとLRADを用いた非接触検査法（以下音響探査法）のシステム概要図をFig.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。その欠陥部上の板状部分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。例えば欠陥部形状を円形と想定した場合、板状部分は単純支持した円板と近似できる。そのときの一次固有振動数は以下の式で表される⁹⁾。

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

ここで h は板の厚さ a は板の半径、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 ρ は密度である。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、欠陥部上の板状部分では比較的低いエネルギーでもたわみ共振による大きな振動が発生することになる。その振動速度をSLDVにより二次元的にスキャンすることで、欠陥部位を特定することが可能である。

3. たわみ共振スペクトルのピークに着目した欠陥検知アルゴリズムの検討

3.1 円形供試体について

前節の(1)式で示されたとおり、単純支持円板の一次固有振動数は板の厚さに比例し、板の半径の2乗に反比例する。ということは逆に板の厚さ、つまり欠陥の深さは一次固有振動数と板の半径の2乗の積と比例関係にあることを意味している。通常、欠陥の形状は様々できれいな円であることはまず無いが、SLDVを用いて測定対象面を二次元的に計測することで、欠陥の平面規模はある程度把握可能であることが予測できる。検証を行う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（ $2 \times 1.5 \times 0.3\text{m}^3$ ）を製作した。配置図および写真をFig.2(a)

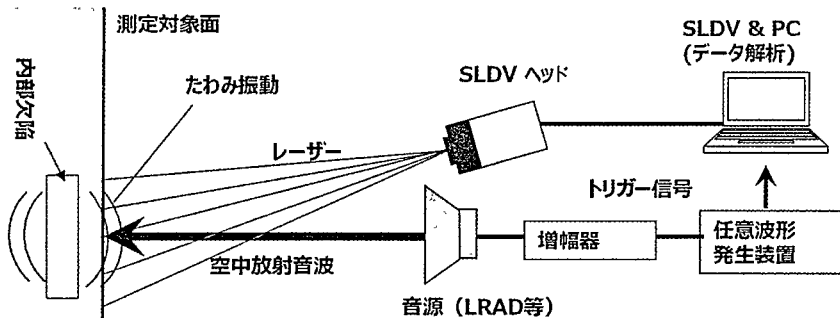
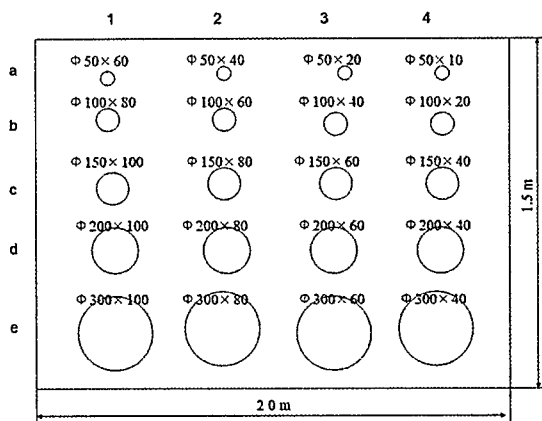


Fig.1 非接触音響探査法の基本構成図

(a) 配置



(b) 写真

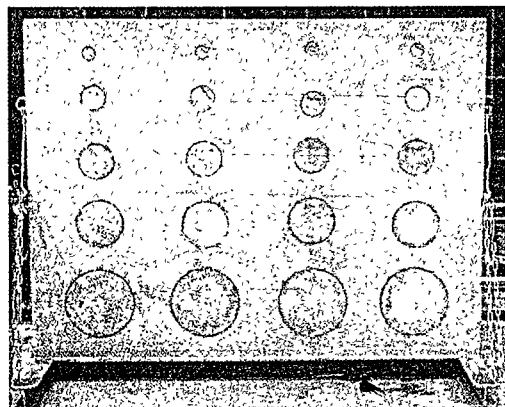


Fig.2 コンクリート供試体の配置図, 円形欠陥

および (b) に示す。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 100 mm 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。

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。その為、SLDV レーザ照射角度は若干斜めからとなる。送振波形は探査用に 0.5kHz から 8kHz 程度まで変化させたトーンバースト波を使用した¹⁰⁾。

3.2 実験セットアップ

実験セットアップ図を Fig.3 に示す。実験は室内で行った。音源と供試体間の距離は 5m

3.3 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

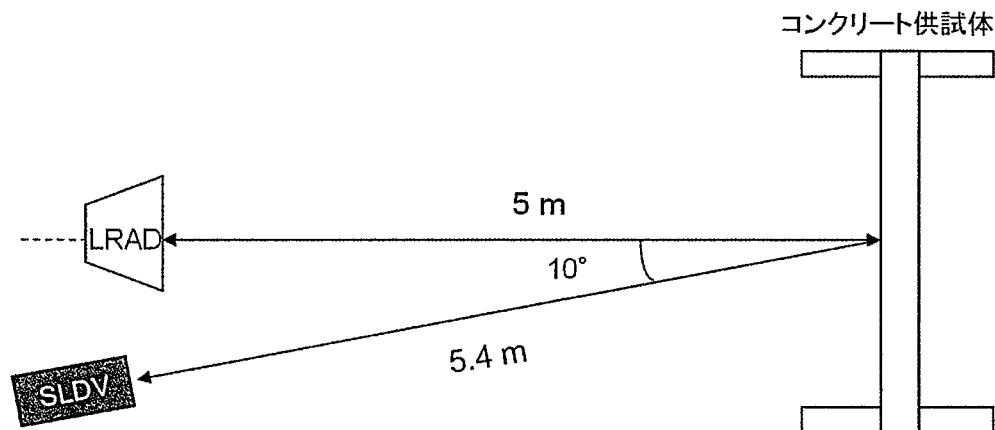


Fig.3 実験セットアップ

Table 1 円形欠陥モデルを用いた探査結果例（上段：叩き点検法、下段：本手法）

mm	深さ100	深さ80	深さ60	深さ40	深さ20	深さ10
Φ50	—	—	△ ×	△ ×	× ×	× ×
Φ100	—	× ×	× ×	× ×	△ ○5430Hz	—
Φ150	× ×	× ×	△ △4958Hz	△ ○4449Hz	—	—
Φ200	× △4557Hz	× △4389Hz	○ ○3733Hz	○ ○2762Hz	—	—
Φ300	○ △3155Hz	○ △2734Hz	○ ○2106Hz	○ ○1449Hz	—	—

上段：叩き点検法 ○：検出可能、△：判定が分かれるもの、×：検出不可
 下段：非接触音響探査法 ○：検出可能、SLDV の共振ピーク以上の共振ピークを検出
 △：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

Table 1 に示す。上段は叩き点検法による検出の可否（3名でブライントテストを行い、○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。表より、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おり、反応を示す共振周波数は深さに比例し（例：直径 300mm）、平面規模に反比例していることがわかる（例：深さ 40mm）。また、この表から、叩き点検では検出できないものも本手法で検出できる可能性があることがわかる（直径 200、深さ 100 及び 80mm）。

3.4 FEM 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）したシェル（板）要素による FEM 解析の結果と実験値との比較を行った。計算

結果例を Fig.4 に示す。図より直径 300mm の円形欠陥は、周辺を単純支持した円板の固有振動数にほぼ等しい結果となったが、それよりも小さな欠陥はシェル要素によるモデル化とは合わない結果となった。これは、欠陥部の直径が大きくなると、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。

3.5 規格化固有振動数と欠陥深さの関係

円形欠陥モデルを用いた場合の規格化後の周波数と深さの関係を Fig.5 に示す。図より欠陥部の半径の二乗により規格化された周波数と欠陥部の深さの間には関連性があることがわかる。深くなるほど理論値から離れているが、これは FEM 解析結果と同じ理由によるものと思われる。

4. 振動エネルギー比を用いた欠陥検知アルゴリズムの検討

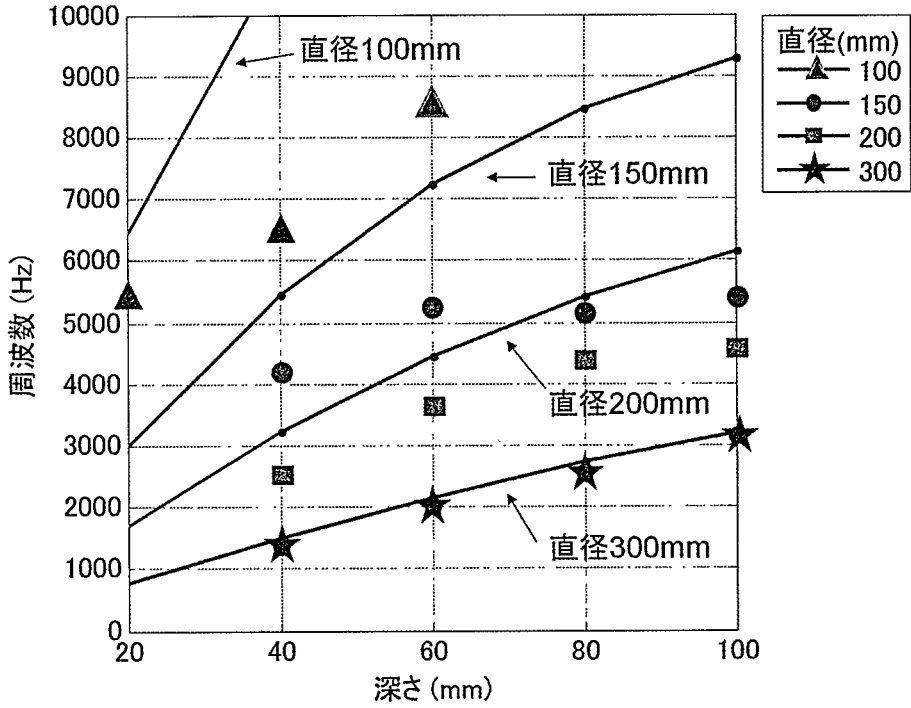


Fig.4 周波数 vs. 欠陥深さ (マーカーは実験結果より得られた共振周波数)

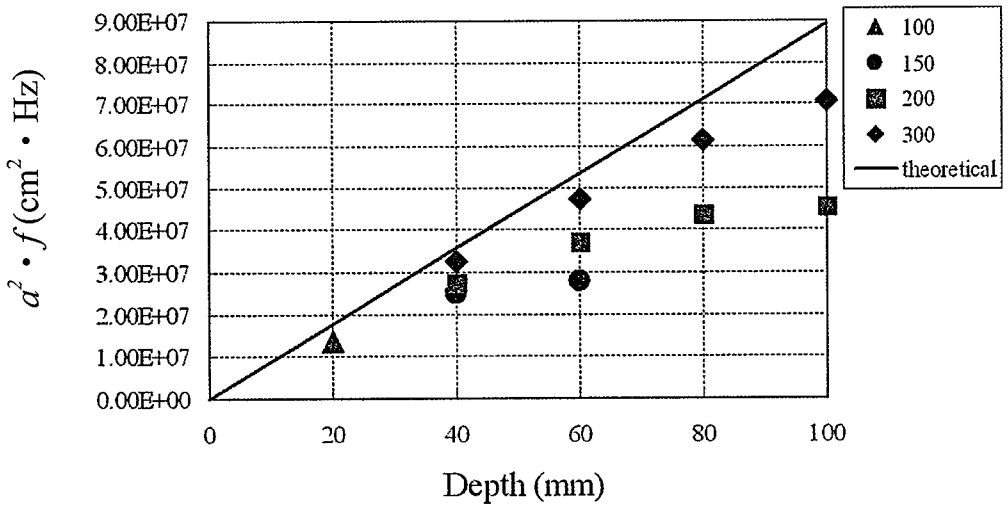


Fig.5 規格化後の周波数と深さの関係

4.1 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欠陥の周波数応答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が高いと思われる。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¹¹⁾。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出来ないが、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、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。

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{health}) df} \quad (2)$$

ここで、 PSD_{defect} 、 PSD_{health} は欠陥部、健全部のパワースペクトル密度、 f_1 および f_2 は下限および上限周波数である。

4.2 振動エネルギー比による欠陥検出

実際に昨年度の円形欠陥モデル供試体の場合に、振動エネルギー比を適用した結果を Fig.6 に示す (現状では 1 kHz 以下に存在する SLDV の共振周波数のノイズが完全に切り切ることが出来ないため、ここでは f_1 を 1.35kHz、 f_2 を 8 kHz としている)。図より半径がそれなりの大きさ (200 ϕ ~ 300 ϕ) 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。

Fig.7 に健全部同士の振動エネルギー比を示す。健全部同士のエネルギー比の計算は、昨年度製作した円形欠陥モデル供試体中の 8 点で計測された健全部のデータのすべての組み合わせで行った。これら健全部同士の振動エネルギー比のばらつきの上限と下限である 3.6 dB を欠陥判定の閾値とすると、 ϕ 200 mm では 80 mm 程度の深さまで検出可能であることがわかる (Fig.6 の一点鎖線が閾値である 3.6dB を示す)。

5. 実構造物での探査結果例

探査対象とした北陸自動車道のボックスカルバートを Fig.8 に示す。探査対象としたのは塩害が特に進展していると思われる米原側 (図の中右側) 海側の側壁である。叩き点検による事前調査結果および本手法による探査結果例 (振動エネルギー比分布) を Fig.9 に示す。振動エネルギー比の基準となる健全部のエネルギーは、今回測定された全スキャンデータの中から最もエネルギーの小さい計測点のものを用いた (この点は上述した打音法による厚さ評価より健全部であることを確認している)。健全部とのエネルギー比 3.6 dB を欠陥判定の閾値とすると図中左半分はほぼ欠陥部と判定され、叩き点検における浮き箇所と音響探査法によりエネルギー比率が高く判定された部位の位置関係は概ね一致する。このことから音響探査法の探査精度は叩き点検と近い性能を有している事が確認出来る。

6. まとめと今後の課題

今回は、欠陥検出アルゴリズムとして共振周波数のピークに着目した欠陥検知アルゴリズムと振動エネルギー比に着目した欠陥検知アルゴリズムの両方について検討した。実構造物における探査結果から、振動エネルギー比を用いた手法は従来の叩き点検法とほぼ同

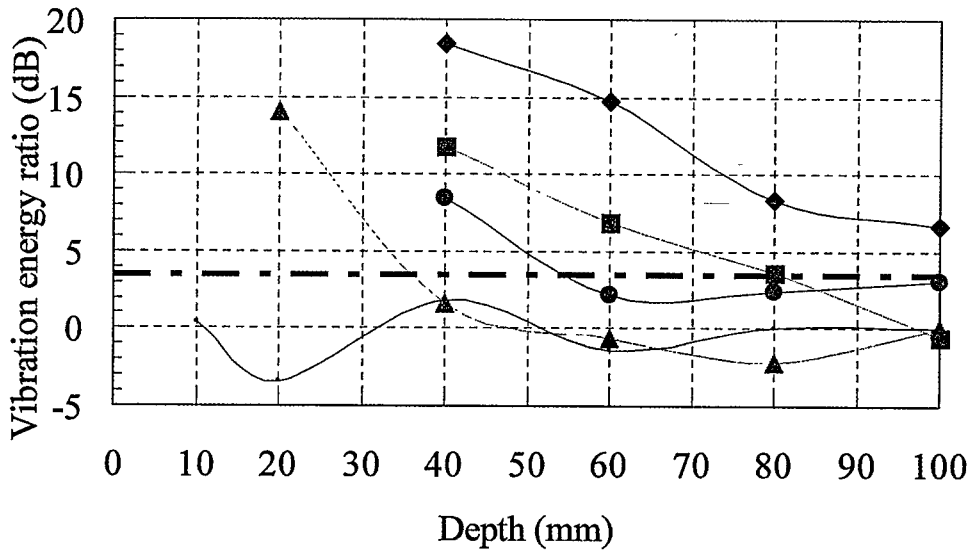


Fig.6 円形欠陥モデル供試体の実験結果に振動エネルギー比を適用した場合

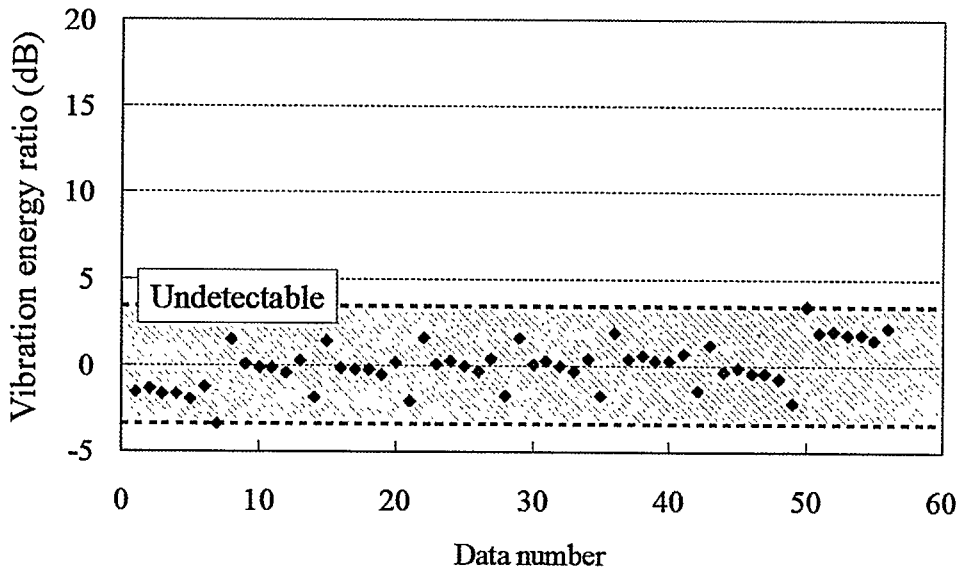


Fig.7 健全部の振動エネルギー比 (円形供試体)

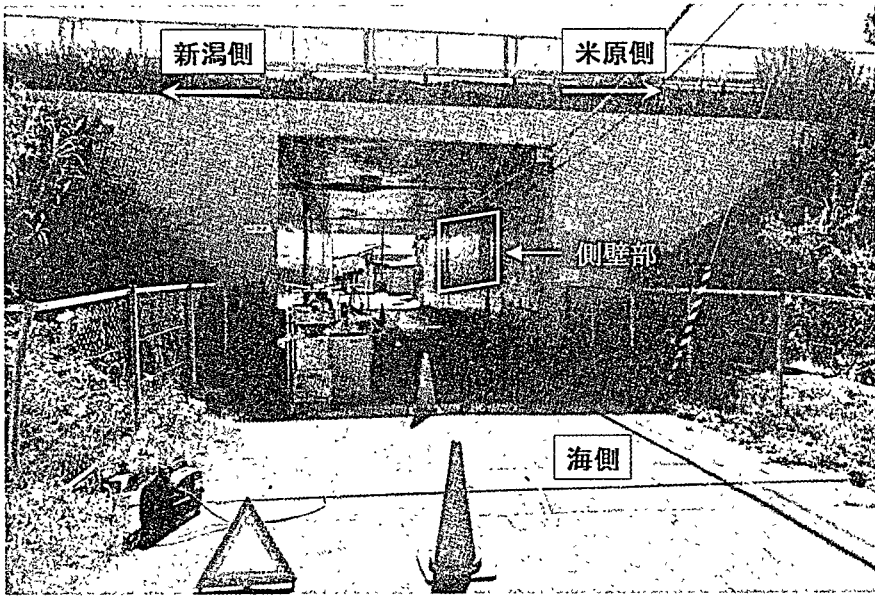


Fig.8 ボックスカルバートの写真（北陸自動車道）

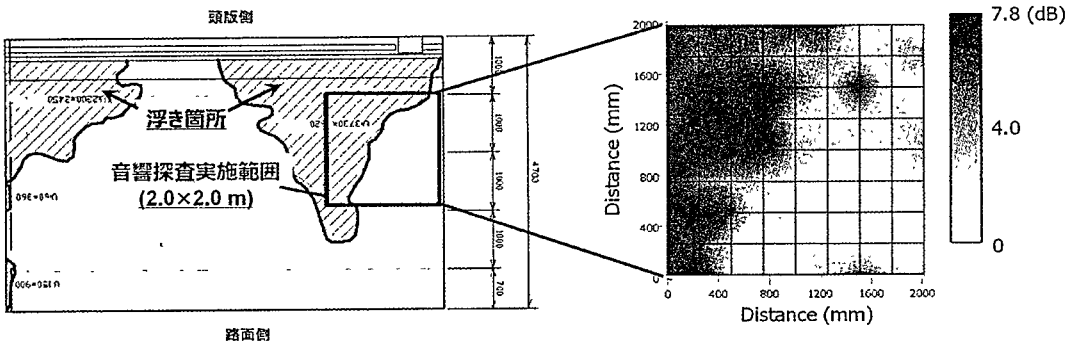


Fig.9 探査結果例（左：叩き点検による事前調査結果、右：振動エネルギー比による探査結果）

等の欠陥検出精度を有していることが明らかになった。今後はさらに欠陥検出の検出精度の向上について検討する予定である。

謝辞

本研究は平成 25 年度の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助成を受けたものである。

【参考文献】

- [1] 森他、コンクリート工学年次論文集 Vol.24、No.1、pp.1473-1478、2002 年。
- [2] 島田他、土木学会第 66 回年次学術講演会予稿集 pp.491-492、2011 年。
- [3] 貝戸他、土木学会論文集、No.690 pp.121-132、2001 年。
- [4] 森他、日本機械学会論文集、72 巻、723 号、pp.1787-1792、2006 年。
- [5] 赤松他、春季音響講論集、pp.1569-1570、2011 年。
- [6] 赤松他、春季音響講論集、pp.1415-1416、2012 年。
- [7] T.Sugimoto, T. Abe, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.50, 07HC18, 2011.
- [8] R.Akamatsu, et.al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol.52, 07HC12, 2013.
- [9] 機械実用便覧(改訂第 6 版)、日本機械学会編、丸善、p.82、1990 年
- [10] R. Akamatsu, et.al.: IEEE Int. Ultrasonics Symp., p.1303, 2013.
- [11] 歌川他、土木学会年次学術講演会論文概要集、Vol.58、pp.765-766、2003 年。