

SLDVと空中放射音波を用いたコンクリート非破壊検査

— 割裂供試体を用いたひび割れ欠陥検出の検討 —

Study on the Non-destructive Inspection Method for Concrete Structures by using Air-coupled Sound Wave
- Examination of Crack Defect Detection by using Cracked Concrete Test Piece -

赤松 亮・杉本 恒美

桐蔭横浜大学大学院工学研究科

(2013 年 3 月 15 日 受理)

1. はじめに

日本では高度経済成長期以降、数多くのコンクリート構造物が建設されてきた。それらの中には 30 年以上経過したものも少なくなく、維持管理する上で点検業務は不可欠である。一般的に、コンクリートインフラ設備の維持管理は一次点検と二次点検から成る。一次検査は広い領域における損傷箇所を見つけるために行われる。一方、二次検査では、狭い領域における損傷箇所の詳細な箇所や欠陥の進行度合いを調査するために行われる。二次検査においては、様々な非破壊検査法が開発されてきたが、一次検査では、その作業効率性から目視点検および打音検査が未だに主流である。しかしながらこれら検査法の検出精度は検査者の技量に依存し、実際に欠陥の見落としも起きている。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。このような問題に対し、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³⁴⁾。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 5 m 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) とスキャニング振動計を組み合わせたシステムを提案している⁵⁶⁾。LRAD は鋭い指向性を持ち、10 m 遠方でも 100 dB 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

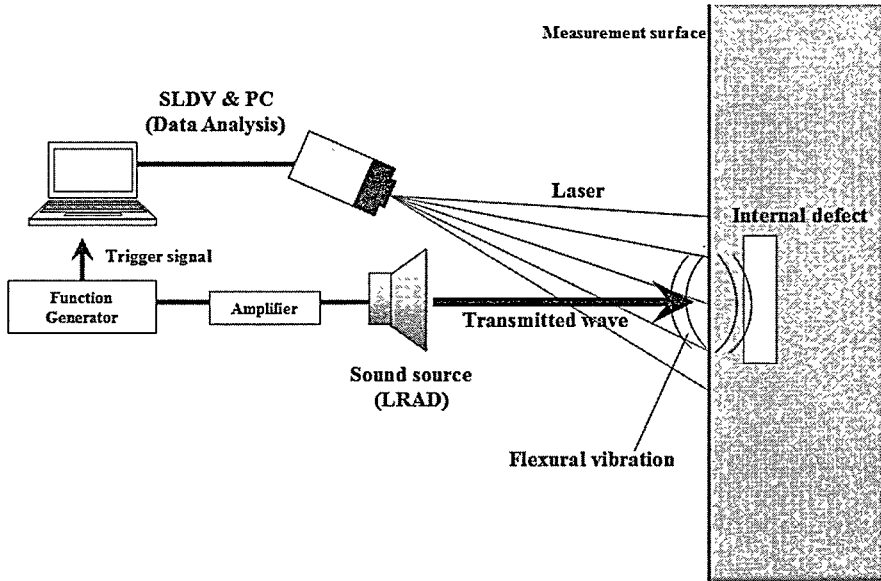


Fig.1 Fundamental concept

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、10 m 前後の離隔から欠陥検出が可能であることを示した。

今回、空洞と同様に、ひび割れによる剥離欠陥の検出が行えるか検討するため、人工的なひび割れを有した供試体を製作し、探査実験を行った。

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、たわみ振動が生じる。例えば欠陥部分の形状を矩形と想定した場合、単純支持した矩形平板と近似できる。そのときの一次固有振動数は以下の式で表される。

$$f = \frac{\pi h}{4} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{E}{3(1-\nu^2)\rho}} \quad (1)$$

ここで h は板の厚さ a と b は板の辺長、 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、欠陥部上ではたわみ振動が生じる。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出来る。本研究では大音圧音源として LRAD を用いる。Fig.2 に LRAD-300X (LRAD Corp.) の周波数特性を示す。縦軸は LRAD から軸上に 1 m 離れた位置の最大音圧を示している。図から、500 から 5000 Hz の範囲でフラットな特性を持っていることがわかる。加えて、打音検査で用いられるハンマーの持つ周波数範囲の上限が 5000 Hz 程度であるため、本研究では 5000 Hz 以下の周波数を用いている。

3. 模擬剥離欠陥を用いた探査実験

今までに、様々な大きさ深さの空洞欠陥を模擬するため、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探査実験を行ってきた。使用した発泡スチロールは厚さ 25 mm

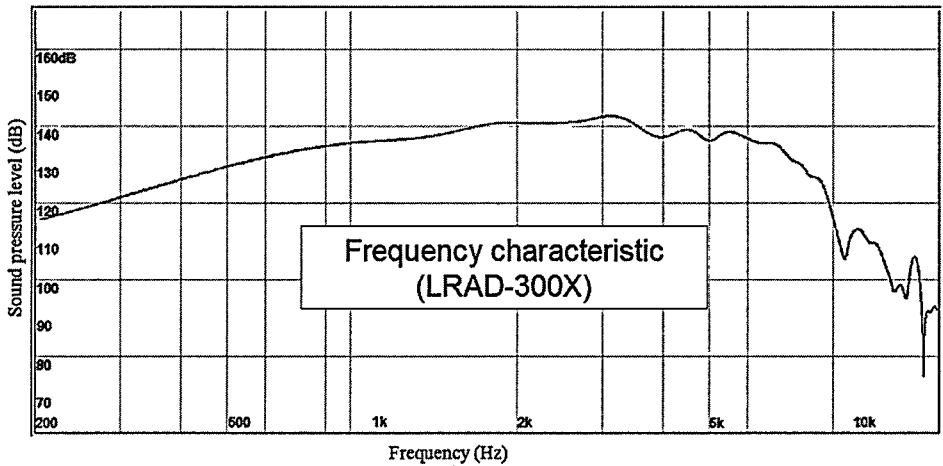


Fig.2 Frequency characteristic of LRAD-300X

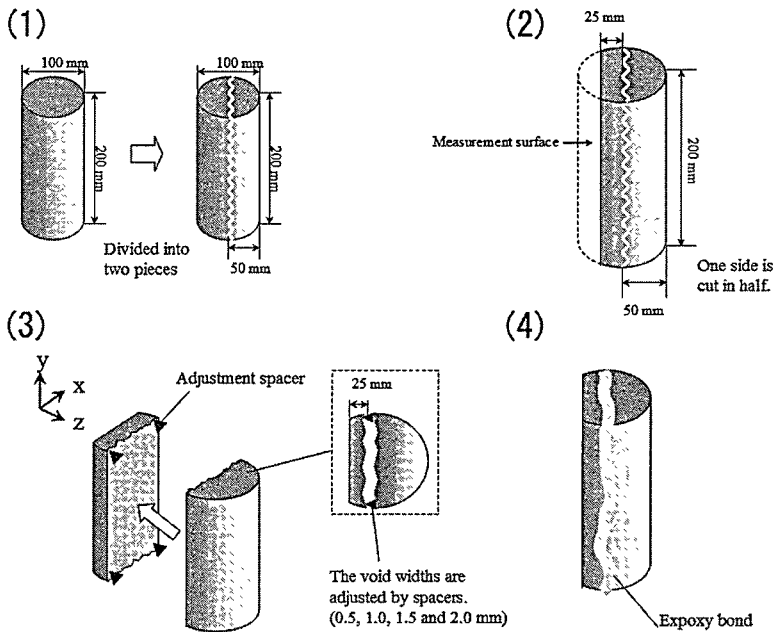


Fig.3 Production procedure of the crack models

と厚いものであるが、原理的には、表層部にわずかな空気層があれば板振動を生じさせることができるため、欠陥の検出精度はその間隙幅には依存しない。しかしながら、音響加振を用いた手法において、過去にこういった実験的検討を行った例はないと思われる。そこで今回、より現実的なひび割れを模擬した供試体を用いてひび割れによる剥離欠陥が探

査可能かどうか検討を行った。

3.1 模擬クラックの作成手順

より現実に近いひび割れを再現するため、模擬クラックを有した壁型コンクリート供試体を製作した。模擬クラックは以下の手順により製作した (Fig.3)。

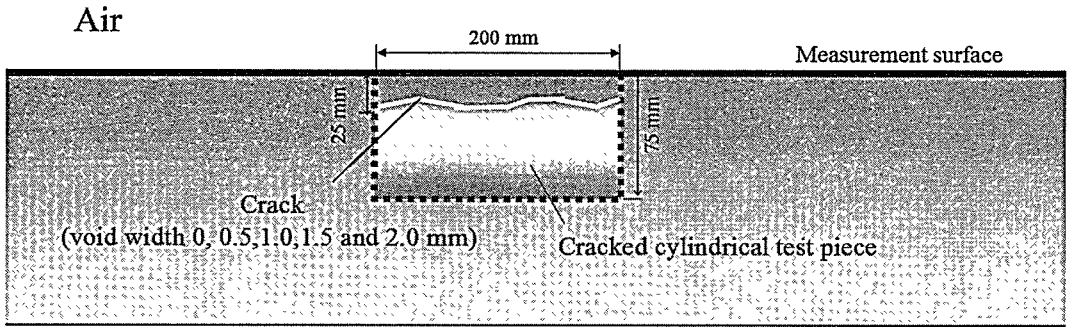


Fig.4 Image of the cross section of the concrete wall test piece

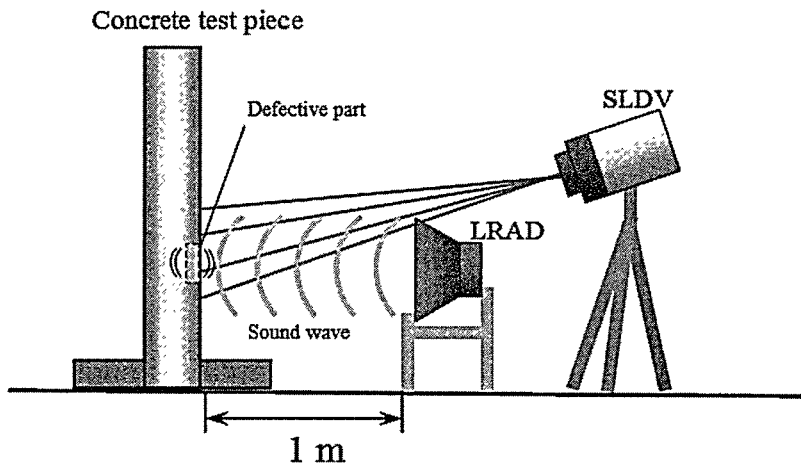


Fig.5 Experimental setup

- (1) 円柱形のコンクリート試験片 ($\phi 100 \times 200 \text{ mm}$) を割裂引張強度試験により二つに割裂する。
- (2) 測定面をフラットにするため、割裂した二つの試験片のうち片方を半分にカットする。
- (3) 割裂した二つの試料の x-y 断面の輪郭位置にスペーサを挿入することで、内部の間隙を再現する。
- (4) これらの模擬クラックを壁型コンクリート供試体の型枠に設置後、コンクリートを流し込み、模擬ひび割れを有した壁型のコンクリート供試体 ($2.0 \times 1.5 \times 0.3 \text{ m}^3$) を製作する。流し込むコンクリートが隙間に侵入するのを防ぐためエポキシ

接着剤を表面に塗布し、固定する。

以上の手順を持って4つの模擬クラックを製作した。それぞれ0.5、1.0、1.5、2.0 mmと内部での間隙幅が異なる。Fig.4はコンクリート供試体の断面図をイメージしたものである。ひび割れのそれぞれの大きさは $200 \times 100 \text{ mm}$ 、深さ25 mmである。割裂させてない円柱コンクリートテストピースも埋設してある。これは、ひび割れでなく、円柱コンクリート試験片自体を埋設したことによる影響を調べるため比較用に用意した。

3.2 実験セットアップ

実験セットアップ図をFig.5に示す。実験

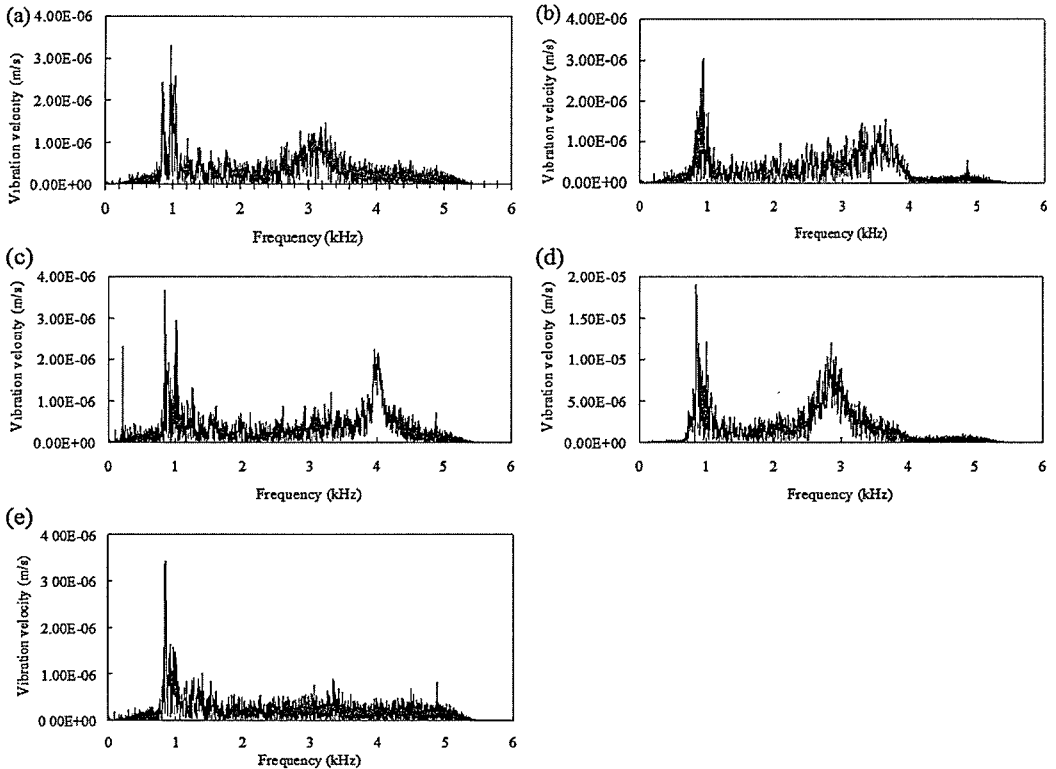


Fig.6 Vibration velocity spectra on the defective part. (a) Void width : 2.0 mm, (b) Void width : 1.5 mm, (c) Void width : 1.0 mm, (d) Void width : 0.5 mm and (e) Void width : 0 mm (Solid)

は室内で行った。音源と供試体間の距離は1 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持続時間 1.8 s の 500-5000 Hz の周波数帯域を持ったリニアアップチャープを用いた。出力した音圧はコンクリート表面付近で 110-120 dB 程度あり、これは騒音計を用いて調整している。

3.3 実験結果と考察

Fig.6 に埋設物上の振動速度スペクトルを示す。Fig.6 (a) - (d) はそれぞれ割裂した円柱試験片上のもので、Fig.6 (e) は割裂させずに埋設した円柱コンクリート試験片上のものである。図中ピンクの線は欠陥位置に隣接した健全部上、青線は欠陥部上（埋設部

上）の振動速度スペクトルである。全ての図から、1 kHz 周辺でピークが見られるが、これは SLDV ヘッド自体の共振周波数である。この実験は密室で行われたため、加振時の音圧による影響が強く出てしまっている。Fig.6 の (a) - (d) を比較すると、2000 から 4000 Hz の帯域間でそれぞれピークが見られる。各ピーク周波数が異なるが、これは割裂したコンクリート試験片の断面が複雑な形状をしているため、内部で互いに接触し合っていることが原因であると思われる、それぞれの試験片における接触具合が影響していると思われる。ここで、Table 1 に示す供試体のコンクリートの物性値を用いて (1) 式より矩形平板 ($100 \times 200 \times 25 \text{ mm}^3$) の一次固有振動数を計算する。厳密解より得られる一次の固有振動数は 4435 Hz であり、実測値と近い値を示している。一方で Fig.6 (e) では、(a) か

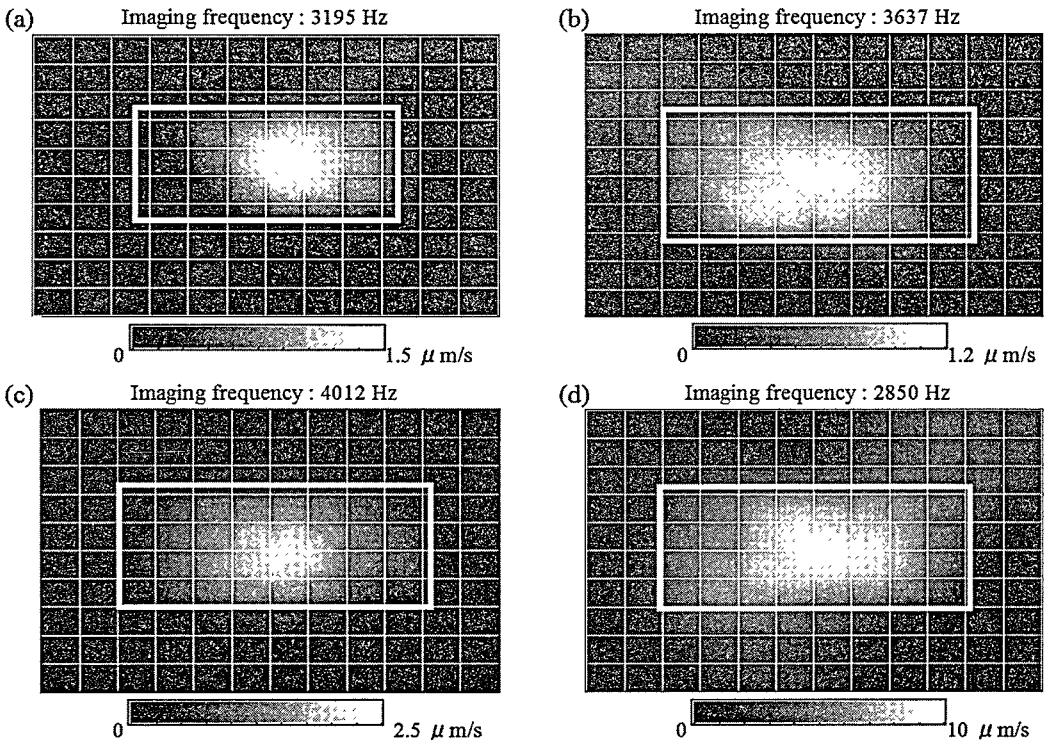


Fig.7 Imaging results of the vibration velocity distribution. (a) Void width : 2.0 mm, (b) Void width : 1.5 mm, (c) Void width : 1.0 mm and (d) Void width : 0.5 mm. The white solid lines indicate the actual position of the cracked models

ら (d) のような応答は見られない。したがって、円柱試験片自体を埋設したことによる影響はほぼなく、Fig.6 (a) から (d) の応答は空隙による剥離欠陥の板振動を捉えていることになる。

Fig.7 に各試料の共振周波数の振動速度分布映像を示す。図中の白い枠は埋設物の位置を示している。このように、全ての試料において、欠陥中心からの明瞭な応答が得られている事が、振動速度分布からも確認することが出来た。以上の実験結果より今回製作した欠陥試料のようにコンクリート壁面の表層部にわずかな空隙があれば、空洞欠陥と同様に検出出来ることを確認した。

4. まとめと今後の課題

今回、音響探査法による模擬ひび割れを有

したコンクリート供試体を用いた探査実験を実施した。今回用意した試料の中で一番薄い間隙幅のものは 0.5 mm であるが、これが問題なく検出できたことから、実構造物におけるひび割れのような非常に薄い空気層で生じた剥離欠陥も検出出来ると思われる。今後の課題としては、音響探査法における欠陥検出アルゴリズムおよび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 23 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.