

33. コンクリート構造物非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法

桐蔭横浜大学大学院
佐藤工業(株)技術研究所
明篤技研

○ 杉本 恒美
歌川 紀之
片倉 景義

1. はじめに

現在、トンネルや橋などのコンクリート表層部欠陥の検査手法として打音検査が主流である。しかし、この方法ではハンマーを用いて直接コンクリートに打撃を加える必要があるため、人の手の届かないような場所の検査は困難である。そのため、高出力指向性音源による空中放射音波を用いた全く新しい遠距離非接触音響探査法の検討を行ってきた¹⁻³⁾。本手法は、通常の打音法と同じたわみ共振を利用した手法であるため、将来的には打音検査を置き換える手法となる可能性が非常に高い。ここでは円形モデル供試体を用いた検出可能な欠陥の平面規模および深さ、剥離試験体を用いた剥離欠陥の検出および実際のコンクリート構造物における探査結果等について紹介する。

2. 遠距離非接触音響探査法の計測原理

2.1 非接触音響探査法の概要

非接触音響探査法の概要図を図1に示す。音源から発した平面波音波により測定対象壁面を励振し、励振時の壁面上の振動速度をLDV (Laser Doppler Vibrometer) により光学的に計測する。もし、壁面内部に水平方向のひび割れなど空隙欠陥が存在していたとすると、その欠陥部上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っている。例えば欠陥部分の形状を円形と想定した場合、単純支持した円板と近似できる。そのときの一次固有振動数は下式で表される⁴⁾。

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

ここで、 a は半径、 h は板の厚み、 E はヤング率、 ρ は密度、 ν はポアソン比である。(1)式からわかるように、欠陥部のたわみ振動の固有振動数は板の厚みに比例し、半径の二乗に反比例する。

本研究ではLDVとしてはスキャニング機構を備えたスキャニング振動計 (SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer: Polytec Corp., PSV400-H4) を、音源としては通常のラウドスピーカと異なり100dB以上の音圧を10メートル以上離れた場所で

も発生できる長距離音響発生装置(LRAD; Long Range Acoustic Device, LRAD Corp., LRAD-300X)を用いる。

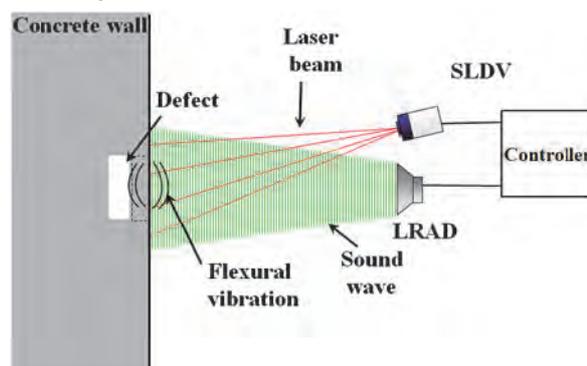


図1. 非接触音響探査法の基本構成図

2.2 トーンバースト波を用いたS/N比改善

欠陥部を励振させるための加振用音波として、持続時間の長いチャープ信号(例: 持続時間 2s、500-5000 Hzの広帯域のLinear up chirp波)を用いると、壁面からの反射波の影響で計測用のレーザーヘッドが振動し、それがS/N比に悪影響をもたらすことが明らかになっている。しかしながら加振用の音波と計測用のレーザー光の伝搬速度の差を利用して、対象壁面からの反射波がレーザーヘッドに到達する前に計測を終了させることにより、上記の問題を回避してS/N比を改善することが可能となる。そのため、本研究では図2に示すように異なる中心周波数帯をもつ短いパルス波を逐次送信することで、チャープ波と同等の広帯域の周波数成分を得ることができる広帯域トーンバースト波を送信波として採用することにした。

壁型コンクリート供試体(1.5×2.0×0.3 m³)内の深さ75mmに埋設された欠陥(発泡スチロール板(300×300×25 mm)を用いて、トーンバースト波の検証実験を行った。計測に使用した広帯域トーンバースト波は各パルス幅3 ms (Bandwidth: 330 Hz)で、パルス間インターバルは100 msである。各パルスの中心周波数は500-5100 Hzの範囲で200 Hzずつ変調し、全体で170-5430 Hz程度の周波数成分を有している。音源から対象面およびレーザーヘッドか

ら対象面までの距離は 5 m および 5.4 m である。計測点は欠陥部の中心部の 1 点のみである。計測された欠陥部上の時間ゲート適応後の振動速度スペクトル例を図 3 に示す。従来の加振用音波としてチャープ波を用いると光学系の振動ノイズが取り除くことができなかつたため、S/N 比 4 dB であるのに対し、今回の提案手法では 19 dB と、従来法に比べ 15dB の改善が行われたことがわかる。

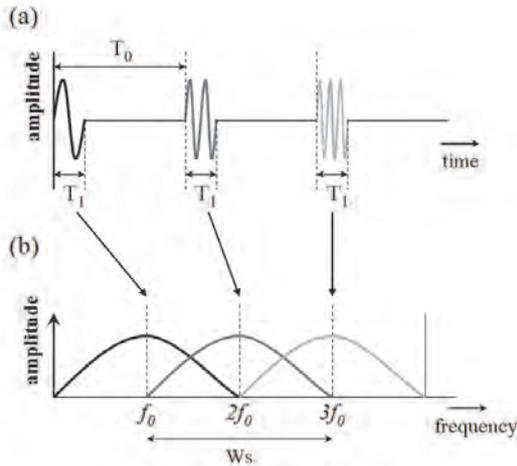


図 2. 広帯域トーンバースト波の概要図
(a)時間波形、(b)振動速度スペクトル

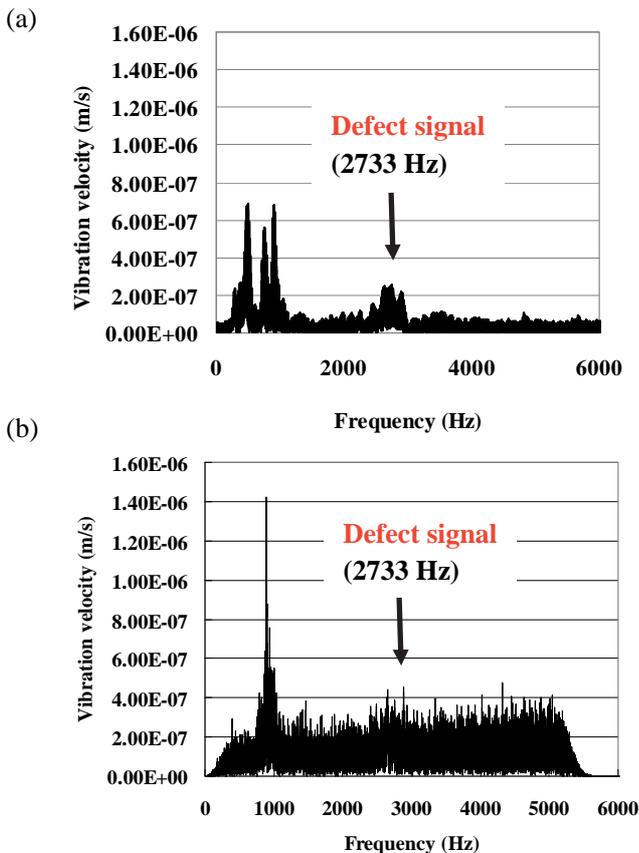


図 3. 欠陥部上の振動速度スペクトルの例
(a) トーンバースト波+ゲート処理後
(b) チャープ波

3. 遠距離からの欠陥検出実験

SLDV と LRAD を組み合わせることにより、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。音源とコンクリート供試体間は 10 m に設定した。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。実験に用いたコンクリート供試体の大きさは $150 \times 200 \times 30 \text{ cm}^3$ である。供試体には深さ 5 cm の位置に $30 \times 30 \times 2.5 \text{ cm}^3$ 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 4 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 4 (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 $60 \times 70 \text{ cm}^2$ の大きさで、計測ポイント数は 195 (13 \times 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、本手法による欠陥検出が可能であることを確認した。

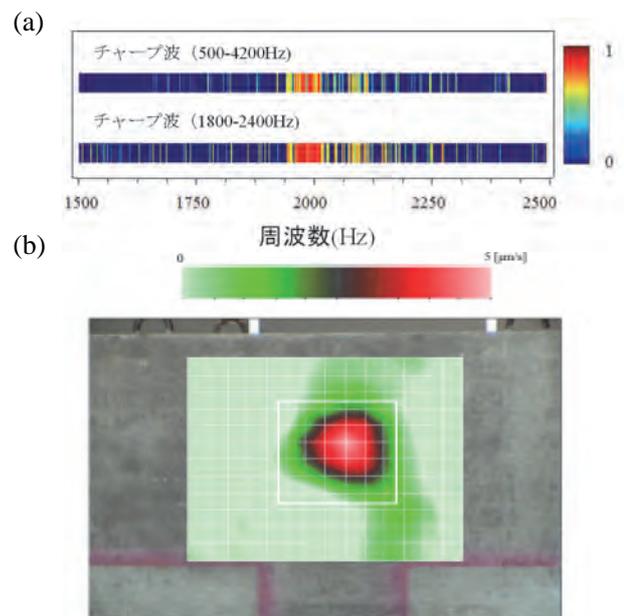


図 4. 10m の離隔での探査結果例
(a) 振動速度スペクトルの輝度表示例、
(b) 振動速度分布(1998Hz)

4. 検出可能な欠陥の大きさ及び深さについて⁵⁾

4.1 円形欠陥モデル

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（2×1.5×0.3m³）を製作した（図 5 参照）。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。

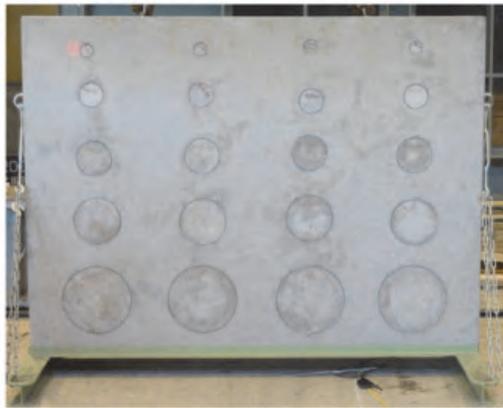


図 5. 円形欠陥モデルを埋設したコンクリート供試体(発泡スチロール 25 mm厚を埋設)

4.2 実験セットアップ

実験セットアップ図を図 6 に示す。LRAD は欠陥部に正対させ、SLDV は LRAD のやや後方に配置した。コンクリート供試体からの離隔はそれぞれ 5m、5.4m である。

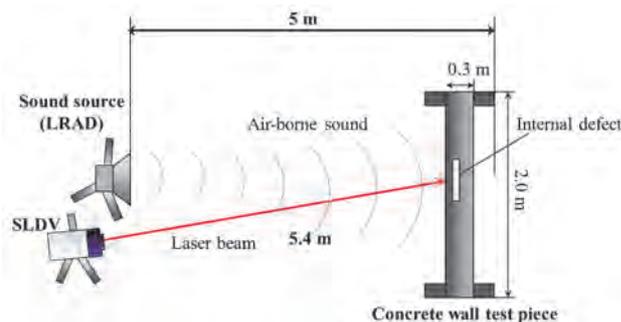


図 6. 実験セットアップ

4.3 円形欠陥モデルの実験結果

5m の離隔からの探査結果を表 1 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名でブライントテストを行い、○は検出可能, Δ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, Δ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

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 1 円形欠陥モデルの検出結果

(上段：岩検ハンマーによる叩き点検結果)
(下段：非接触音響探査法による検出結果)

(mm)	深さ100	深さ80	深さ60	深さ40	深さ20	深さ10
直径 50	—	—	Δ	Δ	×	×
直径 100	—	×	×	×	Δ ○5430Hz	—
直径 150	×	×	Δ ○4958Hz	Δ ○4449Hz	—	—
直径 200	×	×	○ Δ4557Hz	○ Δ4389Hz	—	—
直径 300	○ Δ3155Hz	○ Δ2734Hz	○ ○3733Hz	○ ○2762Hz	—	—
			○ ○2106Hz	○ ○1449Hz	—	—

5. 剥離試験体での検出結果

前節の検討では空洞欠陥を模擬するために 25 mm 厚の発泡スチロールを用いた。しかしながら、実際のコンクリート内部の欠陥としては大きな空洞欠陥よりも、鉄筋部が錆びて膨張することにより生じる剥離欠陥の方が現実的であると思われる。一方で、非接触音響探査の探査原理は、コンクリート表層部のたわみ共振によるものであるため、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可能である。そのため、欠陥の検出精度はその間隙幅には依存しないということが想定される。そこで、剥離欠陥を模擬した供試体を製作して探査可能かどうかの検討を行った。

5.1 剥離欠陥モデルの作成方法

剥離欠陥モデルは壁型供試体(150×200×30 cm³)にひび割れを有した小型供試体(以下ひび割れモデル)を埋設することで再現した。ひび割れモデルの製作手順を以下に示す。

- 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幅を調整。
- ④ エポキシ接着剤を亀裂部周囲に塗布。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。

埋設したひび割れモデルは 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25mm程度、欠陥寸法は100×200mm²となる。加えてφ150×300mmの円柱状テストピースを用いて製作したはく離モデルもそれぞれ4種類上記の手順により用意した。この試料のひび割れ深さは50mm、欠陥寸法は150×300mm²である。これらの試料を埋設したコンクリート供試体(200×150×30cm³)を製作して実験に使用した(図7参照)。実験セットアップ自体は前節と同じである。

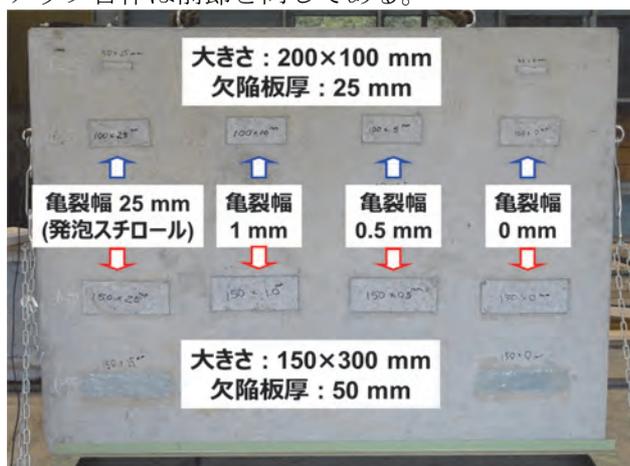


図7. 剥離欠陥モデルを埋設したコンクリート供試体

5.2 剥離欠陥モデルの実験結果

欠陥部(埋設位置の中心)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ものを図8に示す。図8(a)は深さ25mm、欠陥寸法100×200mm²のものである。図中の発泡スチロールおよび間隙幅1.0mmでは3.5kHz周辺で明確な応答が見られる。0.5mmと0mm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1.0mm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。図8(b)は深さ50mm、欠陥寸法は150×300mm²の結果である。図8(a)と比べると欠陥自体が深いため、全体的な振幅は小さいが、図8(a)と同様に間隙幅0mmのものであってもピークを確認することが出来る。これらの結果から、ここで示すはく離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った。なお、両グラフともに1kHz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。また、図9に間隙幅0mm、深さ50mm、欠陥寸法150×300mm²の割裂試験体に対する非接触音響探査法による探査結果例を示す。図より間隙幅0mmであってもわずかな空気層があれば本手法により検出可能であることがわかる。

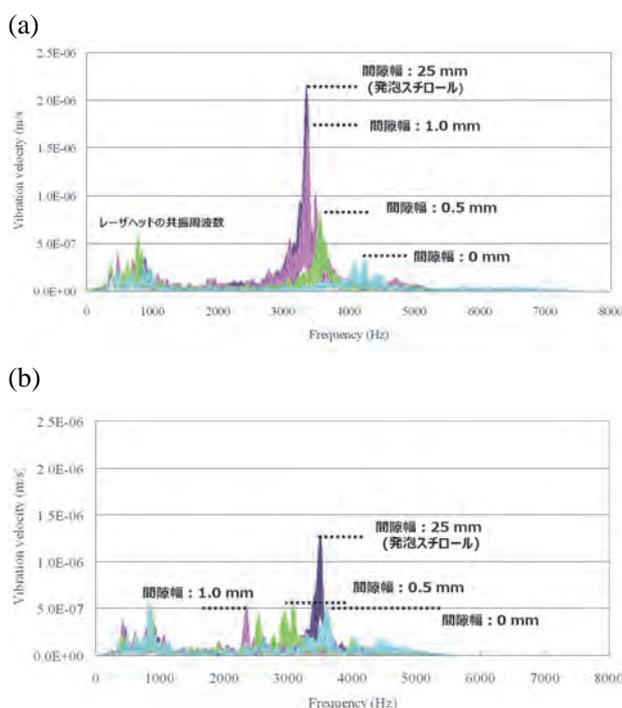


図8. 各欠陥試料上での振動速度スペクトル
(a) 深さ25mm, 欠陥寸法100×200mm²,
(b) 深さ50mm, 欠陥寸法150×300mm²

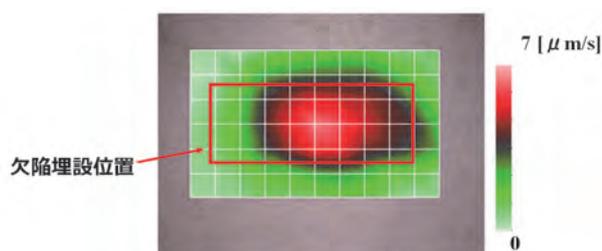


図9. 間隙幅0mmの振動速度分布図
映像化周波数:3572 Hz,
スキャンポイント数77(7x11)

6. 振動エネルギー比を用いた欠陥検出

6.1 振動エネルギー比の定義

実際のコンクリート構造物に見られる欠陥の形状は深さや大きさも一様ではなく複雑であるため、したがって検出される振動速度スペクトルも、前節の剥離欠陥モデルの試験結果同様に複数のピークをもつことが考えられる。そのため、欠陥検出アルゴリズムとして単一のピークを検出するというだけでは不十分である。しかしながら、欠陥部が振動した場合には健全部に比べて振動エネルギーが大きくなることが考えられるため、ここでは健全部を基準とした振動エネルギー比を用いた欠陥検出を考える。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て、振動エネルギー比を(2)式のように定義する。

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

6.2 振動エネルギー比による欠陥検出の検討

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図 10 (a)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 1.35 Hz、 f_2 を 8 kHz としている）。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。図 10 (b)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、φ200 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（図 10 (a)の点線が閾値である 3.6dB を示す）。

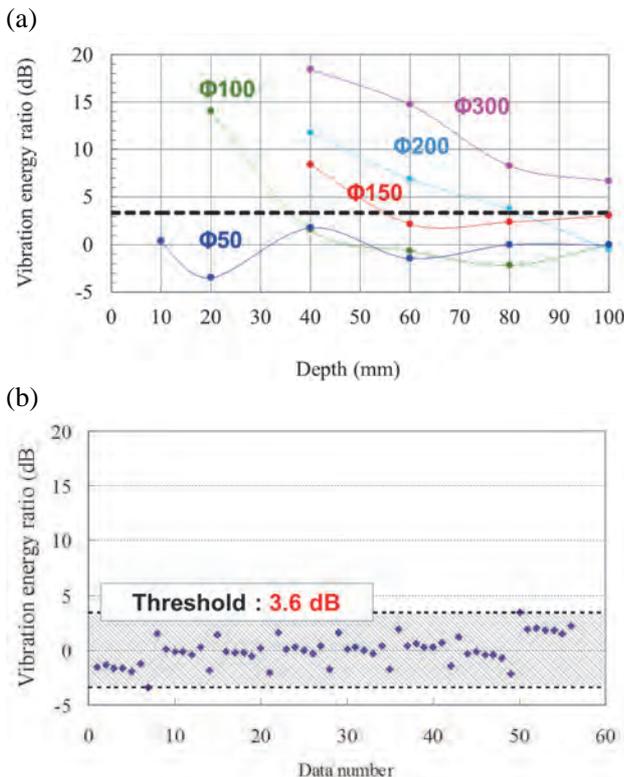


図 10. 振動エネルギー比の計算結果
(a)円形欠陥部上、(b)健全部同士

7. 実コンクリート構造物での検出結果例

7.1 ボックスカルバート

探査対象とした北陸自動車道のボックスカルバートを図 11 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海側側壁である。



図 11. ボックスカルバートでの実験風景

叩き点検結果および非接触音響探査法による振動エネルギー比の映像結果を図 12 に示す。図中に示された地表面から高さ 1.7 m の赤枠のエリアを対象とした。1 回の測定規模は 1.0×1.0 cm 程度とし、4 エリアに分け測定した。1 エリアのスキャンポイント数は 5×5 ポイントである。音源から対象面までの距離は 4 m 程度である。床および天井面反射による干渉を抑えるため、床面から音源の高さは 2 m と設定した。SLDV のレーザヘッド位置も同様な距離、高さに設定し、良好な受光感度を得るため、各測定エリアに対し正対させている。送信波形は広帯域トーンバースト波である（持続時間 3ms、変調インターバル 200Hz、パルス間インターバル 50ms、開始—終了周波数 1500-6500Hz、コンクリート表面での音圧は 100 dB 程度）。加算平均回数は 1 点につき 10 回とした。

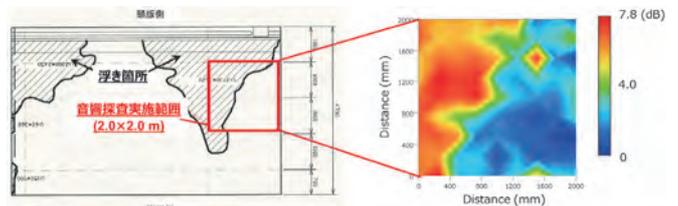


図 12. 叩き点検(右)および非接触音響探査法(左)による調査結果(斜線部:浮き)

振動エネルギー比の基準となる健全部のデータは、今回測定された全スキャンデータの中から、最も振動エネルギーが小さい物を用いた。図から、海側に比べ、陸側の側壁の方が高いエネルギー比を示している。健全部とのエネルギー比 4 dB を欠陥判定の閾値とすると、図中の左半分はほぼ欠陥部と判定される。叩き点検において浮きと判定された部位と音響探査法によりエネルギー比率が高く

判定された部位は非常に近く、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。

7.2 RC床版

探査対象とした RC 床版のある橋梁の外観を図 13 に示す。実験日は特に車両規制等はなく、トラック等が走行している状態で行った。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海側の RC 床版(図 13 (a) 中奥側)で、床版は図 13 (b)に示すよう下面側から計測した。1 回の測定規模は 60×60 cm 程度とし、これを延長方向に繰り返し、合計 9 エリア測定を行った。1 エリアのスキャンポイント数は 6×5 ポイントである。音源から対象面までの距離および SLDV から対象面までの距離は 2 m および 2.2 m である。送信波形は広帯域トーンバースト波である(持続時間 3ms、変調インターバル 200Hz、パルス間インターバル 50ms、開始—終了周波数 500-5500Hz、コンクリート表面での音圧は 100 dB 程度)。点数が多いため、測定速度の効率を考慮しパルス間インターバルは 50 ms と通常の半分に設定した。出力時の音圧は 100 dB 程度である。加算平均回数は 1 点につき 10 回とした。対象面までは 3 m と、簡便な足場があれば手の届く高さであったため、この時マイクロホンを用いた打音法による計測も比較用に実施した。

図 14 に探査結果を示す。非接触音響探査法の結果は振動エネルギー比による評価を行った。基準となる健全部のデータは、今回測定された全スキャンデータの中から、最も振動エネルギーが小さい物を用いた。図 14 (a) は音響探査法によるエネルギー比分布、図 14 (b) は打音法による厚さ分布である。図 14 (a) 中のエネルギー比の高い位置と図 14 (b) の薄く判定された位置を比較すると、概ね位置関係が合致している事がわかる。

8. まとめと今後の課題

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、コンクリート供試体および実コンクリート構造物を用いた検討を行った。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 0 mm 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。さらに主に実コンクリート構造物を用いた実験結果から、本手法がたたき点検法と同程度の精度で欠陥検出を実施可能であることが明らかになった。

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。

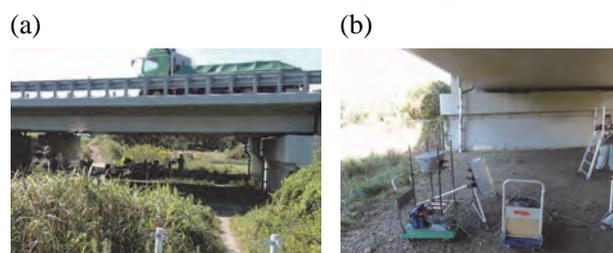


図 13 実験風景 (a) 橋梁外観 (b) セットアップ

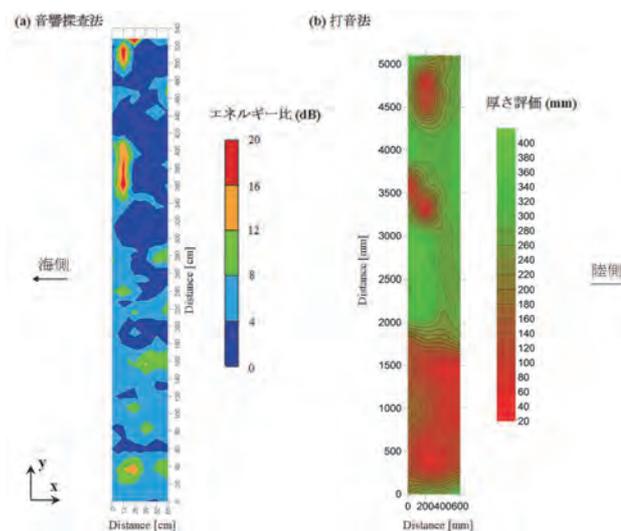


図 14 RC 床版の探査結果例 (a)音響探査法 振動エネルギー比分布, (b)打音法 厚さ評価分布

謝辞

本研究は平成 22-25 年度の国土交通省、委託研究「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) Tsuneyoshi Sugimoto, Ryo Akamatsu, Noriyuki Utagawa and Syuichi Tsujino : Non Contact Long Distance Exploration Method for Concrete using SLDV and LRAD, J. Acoust. Soc. Am, 131 (4): p.3462, 2012
- 2) 赤松亮、杉本恒美、歌川紀之、辻野修一：長距離音響発生装置を用いた非接触欠陥検出法の検討、コンクリート構造物の非破壊検査、Vol.4, pp.31-36, 2012
- 3) 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
- 4) 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
- 5) K.Katakura, R.Akamatsu, T.Sugimoto, and N.Utagawa : Study on detectable size and depth of defects in noncontact acoustic inspection method, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.53, 07KC15, 2014