JCMA 報告

 $\begin{array}{c} \mathbb{C} \left(\begin{array}{c} \mathbb{C} \left(\mathbb{C} \right) \\ \mathbb{C} \left(\mathbb{$ 論文賞

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

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⁾。

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

ここで、aは半径、h は板の厚み、Eはヤング率、 ρ は 密度, v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 100 dB 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。

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 75 mm に埋設された欠陥(発泡スチロール板(300 × 300 × 25 mm³))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ヘッ ドから対象面までの距離は5mおよび5.4m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





time





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ったため、S/N 比4dBであるのに対し、今回の提案手法では19dBと、 従来法に比べ15dBの改善が行われたことがわかる。

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10m 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1.5×2.0× 0.3 m³である。供試体には深さ5cmの位置に300×300 ×25 mm³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LRAD300X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1998 Hz)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0.6 × 0.7 m²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、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(1998 Hz)

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25 mm 厚)を埋設したコンクリート供試体(2 × 1.5 × 0.3 m³)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50 mmのものが深さ 10,20,40及び60 mmに、直径100 mmのものが深さ 20,40,60,80 mmに直径150,200および300 mmのも のが深さ40,60,80,100 mm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 ンクリート供試験体からの離隔はそれぞれ5m, 5.4mで ある。



4.3 円形欠陥モデルの実験結果

5 m 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

表一1 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 | - | - | ∆ × | ∆ × | × × | × × |
| 直径 100 | s <u> </u> | x x | × × | × × | ∆ O5430Hz | - |
| 直径 150 | × × | x x | ∆ ∆4958Hz | ∆ O4449Hz | - | - |
| 直径 200 | × ∆4557Hz | × ∆4389Hz | O O3733Hz | O O2762Hz | - | - |
| 直径 300 | O ∆3155Hz | O ∆2734Hz | O O2106Hz | O O1449Hz | - | - |

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。

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,実際に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(φ 100 × 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1つを半分にカットする。
- ③割裂させた2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 25 mm 程度, 欠陥寸法は100 × 200 mm²となる。加えて φ 150 × 300 mm 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 50 mm,欠陥寸法は 150 × 300 mm² 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 cm³)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 25 mm. 欠陥寸法 100 × 200 mm² 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。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。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、ここで示す剥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× 300 mm²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。



映像化周波数:3572 Hz,スキャンポイント数77(7×11)

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。ここで、ωは角周波数を表す。

$$VER = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \left(X_{defective_part}(\omega) \right)^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \left(X_{health_part}(\omega) \right)^2 d\omega}$$
(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1kHz以下に存在する SLDV の共振周波数のノイズが 完全に取り切ることが出来ないため、ここではfiを1.35 kHz, f2を8kHz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(40 mm ~ 100 mm)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、 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(図―10(a)の点線が閾 値である 3.6 dB を示す)。



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



図-11 ボックスカルバートでの実験風景

- 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。

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 m 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3 ms、変調インターバル 200 Hz、パルス間インターバル50 ms、開始一終了周波数 1500-6500 Hz、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4dB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 0.6 × 0.6 m² 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2m 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 50 ms, 開始-終了周波数 500-5500 Hz, 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50ms 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3m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-13 実験風景 (a) 橋梁外観 (b) セットアップ

図一14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。図一14(a)は 音響探査法によるエネルギー比分布、図一14(b)は打音 法による厚さ分布である。図一14(a)中のエネルギー比 の高い位置(4dB以上)と図一14(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 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。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。

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。

JCMA

《参 考 文 献》

- 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㈱, 東京, 2006.9
- 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

杉本 恒美

桐蔭横浜大学大学院

歌川 紀之

佐藤工業㈱技術研究所

片倉 景義 明篤技研