

論文

コンクリート非破壊検査のための
非接触音響探査法に関する研究

——長距離計測の検討（Ⅱ）——

Study on non-contact acoustic inspection method for concrete
non-destructive inspection: Study about long distance measurement (II)上地 樹¹・小菅 信章²・杉本 和子¹・杉本 恒美*

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2018年3月17日 受理)

I. はじめに

日本列島は、ユーラシアプレート、北アメリカプレート、太平洋プレート、フィリピン海プレートの四つから形成された弧状列島である。そのため山岳地帯が多く、トンネルや橋梁などのコンクリート構造物が多数存在している。また、これらと同様に高度経済成長期において爆発的に都市化が進んだため、高層ビルなど多くのコンクリート製の建造物が立ち並ぶことになった。しかし、現在この時期に建造されたコンクリート構造物が耐用年数を迎えつつあり、そのことが大きな問題となっている。コンクリート構造物の経年劣化に伴い剥離や剥落が発生する可能性があるため、重大な事故に結びつく危険性が存在している。したがって、現在コンクリート構造物に対する維持管理を目的とした、欠陥検査技術の重要性が叫ばれているのである。

現在、コンクリート構造物内部の欠陥を把握する検査方法として、ハンマ等を用いて検査者が直接打撃して、発生した音から欠陥が

健全かを判断する打撃法が多く用いられている。しかしこの方法では、直接打撃が困難な場所において、高所作業車を使用するか足場を組む必要があるなど検査の難易度が高くなる。また検査者の耳で判断を行うため、検査の判定結果が検査者の技量に依存してしまい、判定結果にバラつきが生じる等の問題点が存在している。

そこで我々は、音響加振とレーザドップラ振動計 (LDV: Laser Doppler Vibrometer) を用いた、非接触による非破壊探査法である非接触音響探査法を提案している¹⁻¹⁰⁾。

この手法を用いて、試験体を始め小規模橋梁やトンネル等を対象に、多くの検証実験が行われてきた。これらの実験の多くは計測距離が5~10 mであったが、最近では試験体を対象に20~30 m以上の距離からの計測を行っている。これらの実験において、非接触音響探査法を用いて長距離でも十分に計測可能である事が確認された。

そこで次の段階として、今回は実際に供用中の広島県尾道市を通過する瀬戸内しまなみ海道 (尾道・今治ルート) における因島大橋

* SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ UECHI Itsuki and SUGIMOTO Kazuko: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

² KOSUGE Nobuaki: Department of Medical Engineering, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

の床版下面を対象に、非接触音響探査法を用いて計測実験を行った。計測は橋梁の下から行われたため、床版下面までの離隔距離が30 m以上ある状況下での長距離計測となった。今回の計測は日中に行われたため、自動車等が橋梁を通行している中での実験となった。

II. 非接触音響探査法

非接触音響探査法概念図を図1に示す。非接触音響探査法とは、音響加振とレーザ計測を用いることで対象に近接することなく検査が可能な方法である。計測の流れとしては、まずスピーカから放射された音波により能動的に対象面を励振させる。そして次に、励振されている場所の振動速度を、レーザドップラ振動計により計測を行うという手順である。

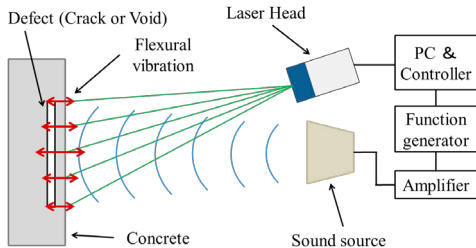


図1 非接触音響探査法概念図

構造物に対して加振が行われた際に、その計測対象面内部に空隙および剥離等の欠陥が存在していた場合、その表面部分ではたわみ振動が励起される。これにより欠陥が有る場所では振動速度が上昇し、健全な場所と振動速度に差異が生じるため、欠陥部の位置を特定することが可能になる。ただし、この手法は音波による加振を行っているため、打音法におけるハンマによる直接加振に比べて、非常に小さなエネルギーしか対象に与えることが出来ない。そのため、ただ音波を当てるだけではコンクリート製の構造物等を励振させることは難しい。そこで重要になるのは、対象の共振現象を利用するという方法である。

たわみ振動の定義式を(1)に示す。たわみ振動の共振周波数 f_r は単純支持された円盤のたわみ振動で近似する事が可能である。式(1)において、 h はコンクリート表面から欠陥までの深さ、 a は半径、 E はヤング率、 ρ は密度、 ν はポアソン比を表している。

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

我々の手法で利用しているこのたわみ振動だが、コンクリート内部に欠陥が存在する場所のたわみ振動の共振周波数(固有振動数)は、式(1)から100 Hz～10 kHzの範囲に存在する事が推定される。また、過去の実験からも同程度の周波数範囲に、欠陥部の共振周波数が多く存在する事が確認されている。音響加振時にはこれらの共振周波数範囲の音波を放射することで、計測対象面でたわみ共振を励起させ欠陥部を検出することが可能になるのである。

また、音響加振を行う際に重要なことがもう一つ存在している。それはスピーカから放射されている音の音圧である。前述した様に非接触音響探査法で使用している音波のエネルギーは微弱であるため、ある程度音圧を与える必要がある。これは、今までの研究結果から検査対象面で100 dB前後必要であることが確認されている。この音圧の値は、対象の欠陥規模や材質にもある程度左右されており、90 dB程度でも検出可能な物も存在している。

非接触音響探査法は、この様に音波を用いて計測対象でたわみ共振を励起させ、それにより発生した振動分布の差異をレーザドップラ振動計により計測し、欠陥部を検出する手法である。

本手法の利点としては、まず音響加振とレーザドップラ振動計を用いて計測を行うため、長距離からの検査が可能である点が挙げられ、加えて機器を用いて能動的に計測を行うため、定量的な検査も可能である点が挙げられる。

Ⅲ. 実験方法

今回の計測では供用中の実橋梁における床版下面を対象に長距離計測を実施するため、加振音源には高出力の音源である長距離音響発生装置（LRAD：Long Range Acoustic Device, LRAD-300X, LRAD Corp.）、対象面の振動を計測するレーザドップラ振動計には長距離計測でのスキャンが可能になった超高感度スキャニング振動計（PSV-500-Xtra, Polytec Corp.）を用いて計測を行った。それぞれの図を、**図2**および**図3**に示す。

計測現場における実験セットアップ図を**図4**に示す。加振音源であるLRAD-300Xは計測対象面から約33.5 m、レーザ計測を行

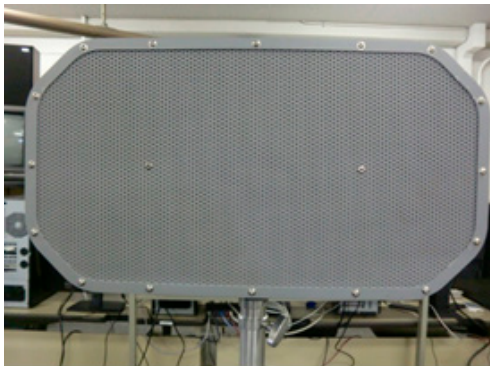


図2 長距離音響発生装置 (LRAD-300X, LRAD Corp.)



図3 超高感度スキャニング振動計 (PSV-500 Xtra, Polytec Corp.)

う PSV-500 Xtra は約 33.6 m の位置に設置し、ほぼ真下から床版下面を対象に非接触音響探査法を行った。

非接触音響探査法により計測した範囲を**図5**に示す。今回設定した範囲は事前に打音法を行い、欠陥が存在する可能性がある場所を選択した。計測範囲内には目視可能な亀裂が存在しており、その周辺で空隙および剥離が発生していると考えられる。計測ポイント数は縦7ポイント、横11ポイントの計77ポイント、計測範囲は縦約570 mm、横約720 mmに設定した。計測時の加算平均回数は3回、対象面での音圧は約100 dBに設定した。音響加振に使用した波形を**図6**に示す。

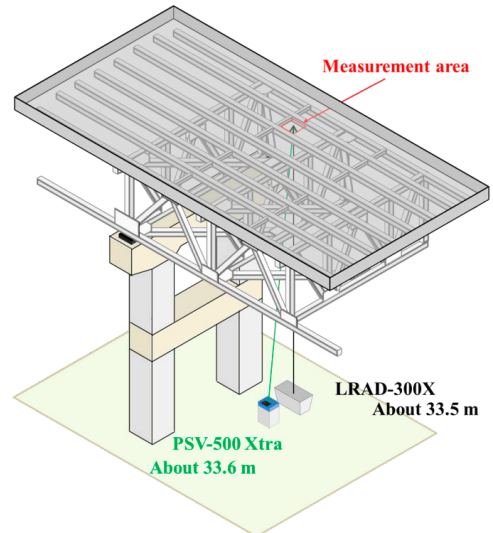


図4 実験セットアップ図

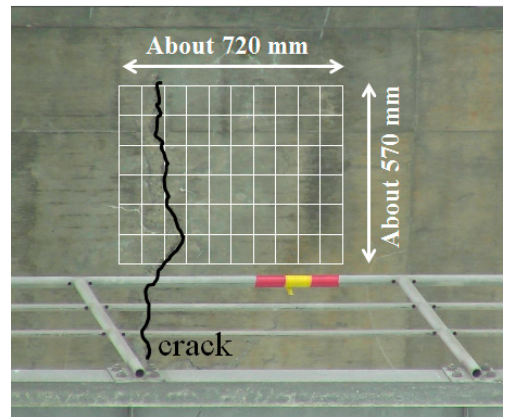


図5 計測範囲図

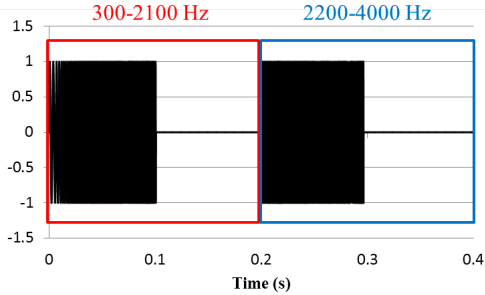


図6 マルチトーンバースト波波形

今回計測に使用したのはマルチトーンバースト波である¹¹⁾。今回の波形は100 Hz刻みに300 Hzから4000 Hzまで二群に分けて連続的に並べて波形である。この時のパルス幅は5 ms、パルス群間インターバルは200 msに設定した。

IV. 結果と考察

非接触音響探査法により検出された結果の振動エネルギー比の分布図を図7に示す。振動エネルギー比の定義式を(2)に示す(VER: Vibration Energy Ratio, PSD: Power Spectrum Density)。式(1)において、 f_1 および f_2 は、それぞれ下限周波数と上限周波数を示している。

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

図7では、明度が低いほど振動エネルギー比が高い事を表している。この結果において、亀裂付近を中心に明度が低くなっており、この部分で振動エネルギーが上昇している事が分かる。前述した様に、内部に欠陥が存在するとたわみ共振が生じ、振動速度が上昇するため、それに伴い振動エネルギーも増加することになる。今回の非接触音響探査法により得られた結果では、亀裂周辺の内部に欠陥が広がっている可能性が高い事を示している。また欠陥部の反応は亀裂部分から右側に進む

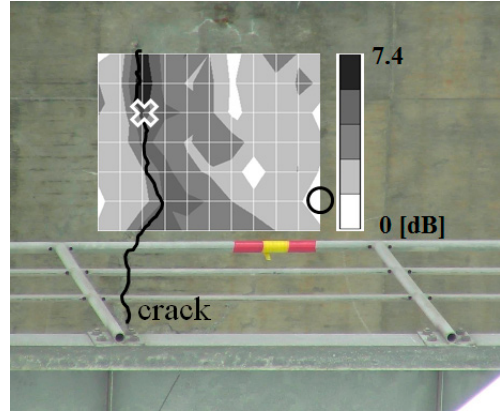


図7 振動エネルギー比分布図(300-600 Hz)

に従い段々と低下している事から、内部剥離の深度が大きくなっていると推測される。この事から、亀裂が発生した原因と推測される鉄筋の位置が亀裂部分より右側に存在していると考えられる。

図7において、目視できる亀裂上の欠陥と思われる箇所(図中白×部)と、図中右側でほとんど振動しておらず健全部と思われる箇所(図中黒丸部)の振動速度スペクトルを図8に示す。図8においては黒実線が欠陥部、灰実線が健全部を示す。

これらを比較した結果、500 Hz以下に欠陥部と推測される反応が検出されている事が確認された。図中において600 Hzと1500 Hz周辺に存在する反応は、今回計測に使用したPSV-500 Xtraの共振である。

今回の実験では因島大橋における作業用通路に上がることが出来たため、音響加振の代わりに計測対象面をハンマで直接加振し、そ

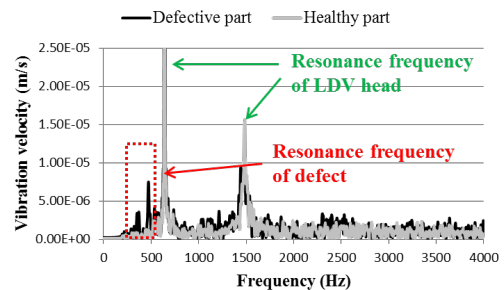


図8 振動速度スペクトル図

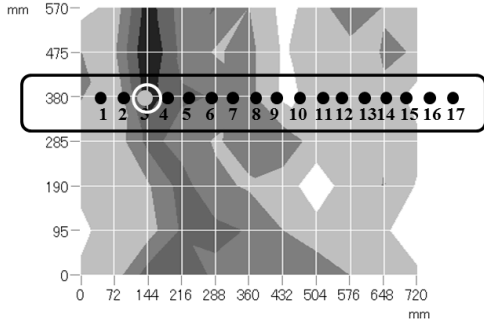
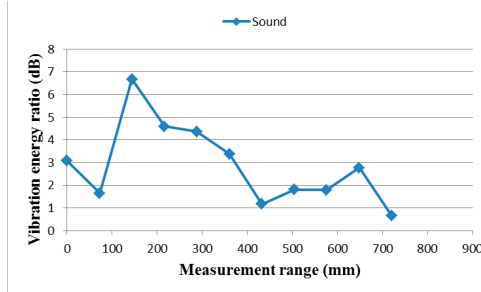


図9 ハンマ加振計測位置図

の時の振動を PSV-500 Xtra で計測を行い非接触音響探査法との比較を行った。図9にハンマ加振時における計測位置を、非接触音響探査法の振動エネルギー比分布の図上に示す。作業用通路でのハンマ加振は、計測位置の関係からライン上での計測となった。

ハンマ加振時および音響加振時（非接触音響探査法）における振動エネルギー比を図10に示す。(a)がハンマ加振時、(b)が音響加振時の結果である。音響加振時の振動エネルギー比は、ハンマ加振時の計測位置に近い上から3行目（380 mm）のデータを使

(a) ハンマ加振



(b) 音響加振

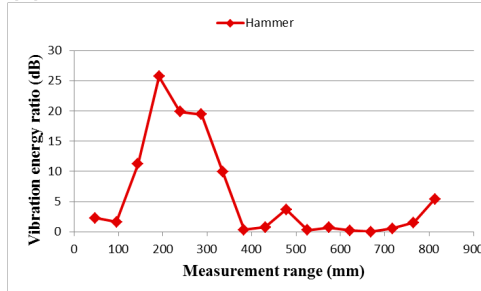


図10 振動エネルギー比（300-600 Hz）

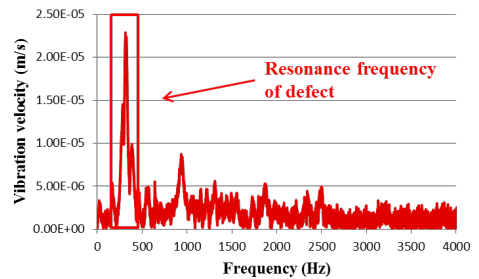
用した。両データを比較すると、100～200 mmの間で振動エネルギーの上昇が見られ、そこから下降するという類似した傾向が確認された。

次に、両手法により検出された振動速度スペクトルについて比較を行った。比較を行った点は図9における左から三つ目の点である。両結果の振動速度スペクトルを図11に示す。こちらも(a)がハンマ加振時、(b)が音響加振時の結果である。これらの結果を比較すると、検出された両手法のデータにおいて300 Hz付近に反応が存在する事が確認された。計測位置が僅かに異なるため周波数にも多少差異はあるが、同様の現象である欠陥部のたわみ共振が検出されたと考えられる。

V. まとめと今後の課題

今回は実橋梁を対象として、非接触音響探査法を用いた長距離計測の検証実験を行った。実験の結果、30 m程度の離隔距離で欠陥部の検出が可能である事が確認された。今後の

(a) ハンマ加振



(b) 音響加振

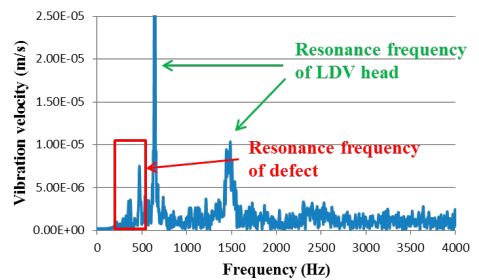


図11 振動速度スペクトル図（300-600 Hz）

課題としては、音響加振時の周囲への騒音対策が必要になると考えられる。

Utagawa and K. Katakura, *JJAP*, Vol.56, 07JC10, (2017).

謝辞

*実験場所を提供して頂いた、本州四国連絡
高速道路株式会社の川上明彦様に感謝いたします。

【参考文献】

- 1) R. Akamatsu and T. Sugimoto: *Acoust. Soc. Jpn. Spring. Meet.* 3-8-7 (2011) p.1569 [in Japanese].
- 2) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: *Jpn. Soc. Civil. Eng.* 66 (2011) p.1569 [in Japanese].
- 3) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: *Proc. of the 10th Int. Symp. on New Tech. for USMCA* (2011) p.104.
- 4) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino: *IEEE Int. Ultrasonics Symp.*, (2011), p.744.
- 5) R. Akamatsu, T. Sugimoto, H. Kawasaki, N. Utagawa and S. Tsujino: *Proc. of the 10th SEGJ Int. Symp.* (2011) p.84.
- 6) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, and K. Katakura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.52, (2013) 07HC12.
- 7) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: *IEEE Int. Ultrasonics Symp.*, (2012), p.94.
- 8) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: *IEEE Int. Ultrasonics Symp.*, (2013), p.1303.
- 9) K. Katakura, R. Akamatsu, T. Sugimoto, and N. Utagawa: *Jpn. J. Appl. Phys.* 53 (2014) 07KC15.
- 10) K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda and K. Katakura, *JJAP*, Vol.54, 07HC15, (2015).
- 11) T. Sugimoto, K. Sugimoto, N. Kosuge, N.