

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——

Study on non-contact acoustic inspection method for concrete
non-destructive inspection: Study about long distance measurement

上地 樹・小菅 信章・杉本 和子・杉本 恒美

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2017年3月18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存在している。それらの多くが高度経済成長期に建造されたものである。しかし、この時期に建造されたコンクリート構造物は耐用年数を迎えつつあり、その事が問題となっている。コンクリートの劣化に伴い、剥離・剥落が発生し重大な事故に結びつく可能性が存在しているのである。この事から、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。

現在の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、ハンマー等を用いて検査者が直接打撃して発生した音から、欠陥か健全かを判断する打音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では、高所作業車が必要であるなど検査

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する等の問題点が存在している。

そこで我々は、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.) とスキヤニングレーザドップラ振動計 (SLDV : Scanning Laser Doppler Vibrometer, PSV-400-H4, Polytec Corp.) 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¹⁻¹¹⁾。

現在に至るまで、非接触音響探査法を用いて試験体をはじめ、実際のトンネルや高架橋を対象として多くの検証実験が実施されてきた。これらの対象の多くは計測距離が5~10 mである。この範囲の距離での計測が多い理由は、トンネル等を対象にしていたため、現状ではそれ以上の距離での計測が必要なかったためである。また、計測に使用していたPSV-400-H4が長距離計測にあまり向いていなかったことも、理由の一つである。しかし、山岳地帯の多い日本では高さ30 mを超える橋梁が多く存在している。そのため、我々が

提案する非接触音響探査法は、これらの構造物にも対応していく必要がある。またこのような構造物を対象に遠距離から非破壊検査が可能になれば、非接触音響探査法の適用性の幅が広がり、検査の簡略化や定量的な検査が可能になると考えられる。

そこで今回は長距離での計測においても非接触音響探査法が適用可能かどうか、検証実験を行った。実験では長距離計測に適した長距離レーザドップラ振動計（RSV-150, Polytec Corp.）を用いて計測を行った。RSV-150はレーザに赤外光を用いることで、赤色光を用いたPSV-400-H4よりもS/N比が向上し、さらにレーザ出力も10倍の10 mWであるため、より精密な計測が可能となっている。計測対象には、円形空洞試験体を用いて検証実験を行った。

II. 非接触音響探査法

非接触音響探査法の基本実験セットアップを図1に示す。非接触音響探査法を用いた検査方法だが、まず加振音源であるスピーカから音波を放射して、検査対象面を加振する。そして励振された対象面の振動速度をレーザドップラ振動計で計測するという手法である。

対象面内部に空隙や剥離などの欠陥が存在した場合、その部分でたわみ振動が生じる。それにより、欠陥部と健全部では振動速度に差異が発生し、欠陥部の位置を特定することが可能になる。ただし、欠陥部のたわみ振動の共振周波数で加振を行わないと共振がおきにくい。そのため、対象の欠陥における共振周波数が未知である場合、広い周波数帯域の音波で加振を行う必要がある。この手法は音波による加振方法を用いているため、対象を励振させるエネルギーとしては非常に小さい。音響加振ではコンクリートなどを対象にした場合、ごく微弱な振動しか励起できないが、共振を利用したたわみ振動によって欠陥部を

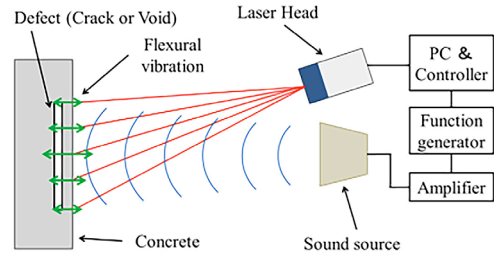


図1 非接触音響探査法の基本実験セットアップ

効率的に励振させることが可能であり、それにより欠陥部と健全部の差が明確になり、それらの判別が可能になるのである。

また、音響加振を行うため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。前述した様に加振を行う音波のエネルギーは微弱であるため、ある程度音圧を上げる必要がある。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。

本手法の利点としては、音響加振とレーザ計測を組み合わせることで非接触による検査が可能であるという事が挙げられる。さらにコンクリート表面の振動速度を計測することにより欠陥部と健全部を識別するという手法のため、定量的な検査が可能であるといった点が大きく挙げられる。

III. 実験方法

1. 実験セットアップ図

計測対象として、円形空洞試験体（直径300 mm、深さ40 mmの模擬欠陥）を設定した。内部には発泡スチロールが埋設されており、模擬空洞欠陥になっている。図2に円形空洞試験体の図を示す。大きさは縦1.5 m、横2 m、幅0.3 mとなっている。今回の非接触音響探査法を用いた振動計測を行うためのレーザドップラ振動計であるRSV-150を図3、音響加振を行うためのスピーカである

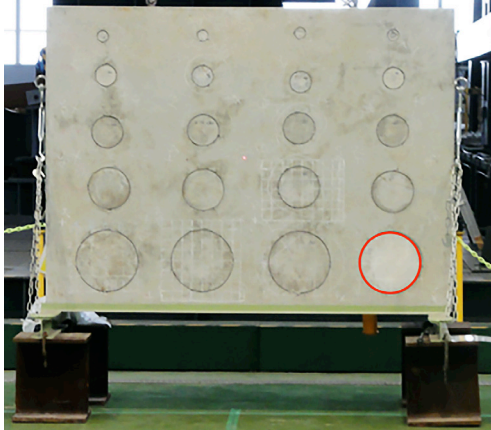


図2 円形空洞試験体 (2 × 1.5 × 0.3 m³)



図3 RSV-150 (Polytec Corp.)

LRAD-300X は図4に示す。

実験セットアップ図を図5に示す。加振用音源である LRAD-300X を試験体から離隔させ、正対する形で設置し、その後ろに計測用レーザである RSV-150 を設置した。この状態で非接触音響探査法を実施し、欠陥の検出が可能か検証を行った。なお、計測距離は 15 m と 30 m の二通りを行い、それぞれ検討を行った。

2. 加振用音波

今回の実験では、音響加振を行うための音波にシングルトーンバースト波を用いた。図6にシングルトーンバースト波形、図7に拡大イメージ図を示す。シングルトーンバー

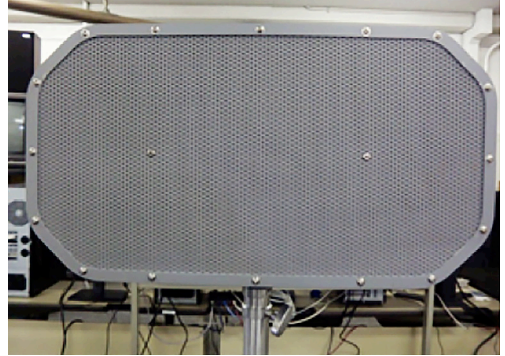


図4 LRAD-300X (LRAD Corp.)

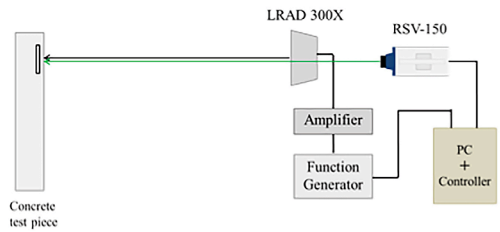


図5 実験セットアップ図

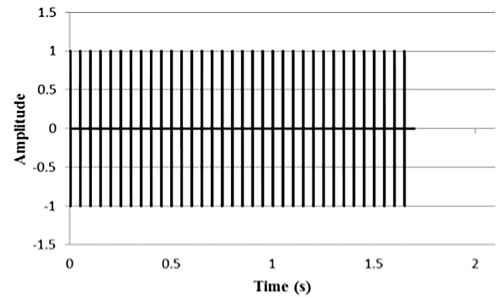


図6 シングルトーンバースト波

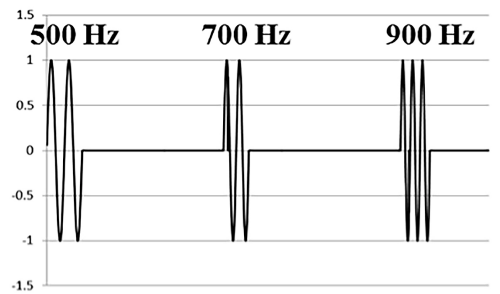


図7 拡大イメージ図

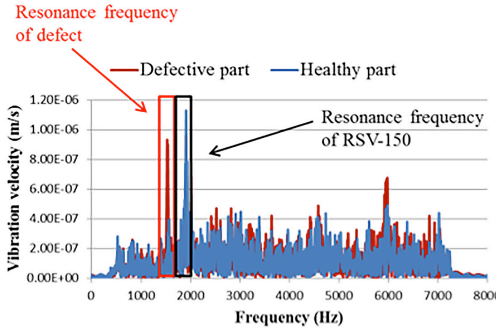


図8 振動速度スペクトル（計測距離 15 m、加算平均無し）

スト波とは、中心周波数の異なるバースト波を、逐次的に送信することにより、欠陥探査に必要とされる広帯域の周波数成分を得ることができる波である。今回実験に使用した波形は、周波数範囲が 500 Hz から 7100 Hz まで、200 Hz 刻みに周波数に変調されるものである。このときのインターバルは 50 ms、パルス持続時間は 3 ms、音圧は検査対象面で 100 dB になるように設定された。

IV. 結果と考察

1. 計測距離 15 m

計測距離 15 m における非接触音響探査法により得られた振動速度スペクトルを図8に示す。この実験では加算平均は行わず、一回での計測で振動速度を検出した。欠陥部と健全部の振動速度スペクトルを比較すると、1500 Hz 付近に健全部には無い反応が欠陥部のスペクトルにおいて検出された。これが今回の欠陥部におけるたわみ共振の反応であると考えられる。これにより、計測距離 15 m では欠陥部のたわみ共振が検出可能であることが確認された。

なお、その隣にも大きな反応が存在しているが、これは今回計測に使用した RSV-150 のレーザーヘッドの共振によるピークであると考えられる。非接触音響探査法は、音響加振により検査対象面を励振して、レーザーによりその振動速度を計測するという手法である。

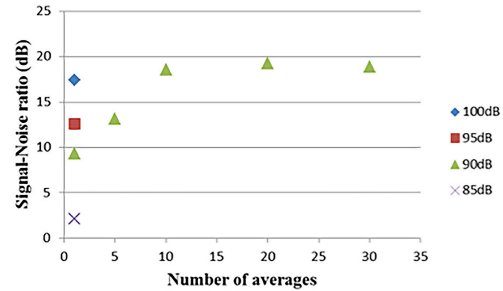


図9 音量と加算平均回数に関連図

しかし、その加振用音波によりレーザーヘッドも同時に共振する場合がある。しかし、検出されるレーザーヘッドの共振は常に一定であるため、欠陥の共振周波数とその周波数から外れていれば問題はないと考えている。

次に、この距離で音圧と加算平均回数を変化させて、計測結果に与える影響について検証を行った。これらの比較には S/N 比を用いた。S/N 比の定義を式(1)に示す。この時の S は共振周波数の振動速度ピーク値、N は 2000–7000 Hz の振動速度平均値に設定された。

$$S/N \text{ (dB)} = 20 \text{ LOG}_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \quad \dots\dots(1)$$

S/N 比による音圧と加算平均回数の比較結果を図9に示す。この結果から、音圧が上がるほど S/N 比の値は高くなり、加算平均回数が上がると同じように S/N 比が上昇する傾向が存在することが確認された。しかし、加算平均回数を変化させた比較結果については、10 回ほどで S/N 比が頭打ちになるような傾向が見られた。

まず、音圧が上昇するにつれ S/N 比が向上する理由については、音量が上がることで加振力が上がり、欠陥部における共振の振動速度が上昇したためであると考えられる。また加振力が上昇しているにもかかわらず、S/N 比が上昇しているという事はノイズ部分の値はあまり変化していないと考えられる。

次に加算平均回数による変化の影響につい

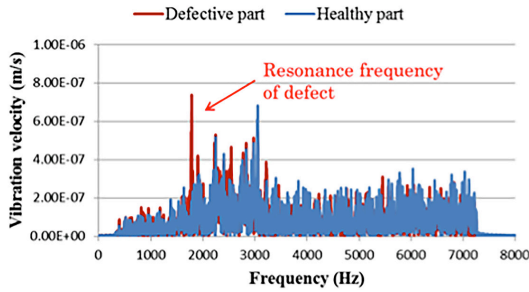


図 10 振動速度スペクトル (計測距離 30 m、加算平均無し)

では、加算平均回数が増えることでノイズ部分がキャンセルされて、S/N 比が上昇したと考えられる。S/N 比が頭打ちになった原因としては、コンクリートを対象にした RSV-150 を用いた計測の S/N 比の限界が存在したためであると考えられる。加算平均を行うことでノイズ部分を減少させることは出来るが限界は存在するため、S/N 比が頭打ちになるのは必然であると考えられる。

2. 計測距離 30 m

約 30 m の距離から非接触音響探査法により検出された振動速度スペクトルを図 10 に示す。この結果において、健全部のスペクトルからは確認出来ない、たわみ共振と思われる反応が欠陥部のスペクトルで確認された。このことから、30 m 程の距離からでも非接触音響探査法を用いて欠陥の検出が可能であることが確認された。

図 10 における計測距離 30 m の結果と、図 8 における計測距離 15 m の結果を比較すると、30 m の結果において RSV-150 の共振である 1900 Hz の反応が明確に検出されないことが大きく異なる。これは計測対象が計測機器から大きく離隔されていたため、レーザーヘッド側に反射してくる音波が減少し、レーザーの共振が弱まったと考えられる。

次に、二次元的にコンクリート面をスキャンし、検出された結果から振動速度分布図を作成した。その分布図を図 11 に示す。図中における黒い丸枠が欠陥の位置を示している。

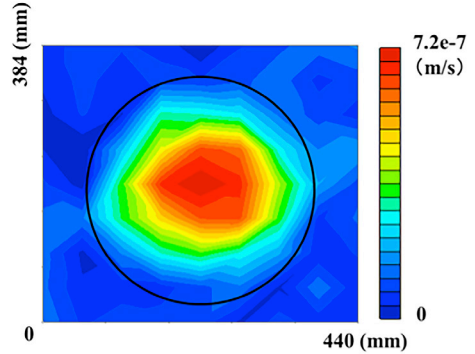


図 11 振動速度分布 (1783 Hz)

計測ポイント数は 9×9 の計 81 ポイントであり、加算平均は行っていない。またこの図では、赤色ほど振動速度の値が高いことを表している。この結果において、振動速度の値は中心程高くなる傾向が検出された。これはこの部分で欠陥部におけるたわみ共振が発生したため、このような結果になったと考えられる。このことから、計測距離が 30 m 離れていても、二次元的にスキャンを行い欠陥部を検出することが可能であることが分かった。

V. まとめと今後の課題

今回は、円形空洞試験体を対象に非接触音響探査法による長距離計測の検証実験を行った。実験の結果、約 30 m という長距離からでも欠陥部の検出が可能であることが確認できた。

また、計測距離 15 m において、音圧と加算平均回数の変化による影響について検証実験を行った。この結果から、S/N 比を向上させるためには、放射音波の音圧と加算平均回数を調整することで S/N 比が大きく向上することが確認出来た。

今後は、周囲環境騒音および計測時間の高速化等の改善を図りながら、本手法の実用化に向けての検討を引き続き行っていく予定である。

【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) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, and K. Katakura: *Jpn. J. Appl. Phys.* 52 (2013), 07HC12.
- 10) K. Katakura, R. Akamatsu, T. Sugimoto, and N. Utagawa: *Jpn. J. Appl. Phys.* 53 (2014), 07KC15.
- 11) K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C.Kuroda and K. Katakura: *JJAP*, Vol.54, (2015), 07HC15.