

32. インフラ点検のための音波照射加振による高速非接触音響探査法

マルチトーンバースト波を用いた橋梁における検証

桐蔭横浜大学大学院
桐蔭横浜大学大学院
佐藤工業(株)技術研究所

○ 杉本 恒美
杉本 和子
歌川 紀之

1. はじめに

2012年12月に発生した笹子トンネル天井板落下事故がきっかけとなり、広く一般大衆にも我が国の高度経済成長期に建設された多くのコンクリート構造物に対する維持管理の重要性が認識されるようになってきている。コンクリート構造物表面のクラックや劣化の程度を調査する方法としては、画像処理法、レーダ法、マイクを使用した打音法など様々な手法が開発されているが、実際の点検時には計測対象面に接触するか、ほぼ接触に近い状態での計測が必要であり、いまだに目視点検と叩き点検が主流であるというのが現状である。特に叩き点検の場合には、点検時に足場や高所作業車を必要とするという根本的な問題点を抱えている。そのため、遠距離から非接触かつ従来の叩き点検と同等な検査が可能な点検手法の開発が期待されるようになってきている。

実際に、5m以上の遠距離から非接触で行える非破壊検査手法としては赤外線カメラを用いた赤外線法とパルスレーザを衝撃波源とするレーザリモートセンシング法^{1,2)}および本研究室で実施している音波照射加振とレーザドップラ振動計を用いた非接触音響探査法の三手法が現在存在している。最初の赤外線法は基本的に温度の変化や分布を計測する手法であり、原理的にもごく表面に近い亀裂しか検出することはできない。屋外で使用する場合は、日照等の環境条件に依存するほか、温度変化の少ないトンネル内部等で使用する場合はヒータ等を使用してアクティブに加熱する必要がある。高い天井部等での使用は困難であるという問題点が存在している。次のレーザリモートセンシング法は、強力なパルスレーザによる衝撃加振を利用した手法であり、基本的に金属材料の検査には適した手法である。しかしながら、計測対象がコンクリートの場合には測定対象の融点が低い上に、検出対象である欠陥の共振周波数も低いことから、効率的な振動励起を行うことはきわめて困難である。すなわち、大電力を必要とする割には振動エネルギーへの変換効率率はきわめて低いため、

出力を上げすぎるとコンクリート表面に孔を穿ってしまうことになる。さらに、人体に影響がある高出力レーザを複数使用することによる取り扱いの危険性の存在も課題となっている。一方で、著者らが研究開発を行ってきた非接触音響探査法は、従来の打音法と同様に欠陥部のたわみ共振を利用した手法であり、極めてエネルギー効率が高くかつ安全な手法である。似たような手法として、ガスガンによる圧力波^{3,4)}やラウドスピーカによる空中放射音波⁵⁾を用いた手法も過去に提案されてきたが、当時はたわみ共振を利用した効率的な加振法とS/N比の高い計測法に関する検討が不十分であったため、実際に5m以上の離隔における安定的な計測を実現することは出来なかった。

実際に遠距離から音波照射加振によりたわみ共振を効率的に発生させ、かつS/N (Signal to Noise) 比の高い計測を行うには、加振用信号波形の工夫およびそれに応じた信号処理の適用が必要となる。著者らはこの一見困難に思われる課題を、トーンバースト波および時間周波数ゲートを用いることで克服した。実際に市販の低出力(1~10mW)のレーザドップラ振動計であっても5m以上の遠距離において、従来の打音法とほぼ同程度の欠陥検出が可能であることをコンクリート供試体や実コンクリート構造物(鉄道や道路のトンネル覆工および橋梁)を用いて明らかにしてきた⁶⁻¹³⁾。さらに、計測可能な時間帯を有効活用するマルチトーンバースト波を考案することにより、従来よりも高速な計測も実現した¹²⁾。このマルチトーンバースト波は離隔が大きくなると、一度に送波できる周波数帯の数が増えるために計測高速化という面で威力を発揮する。しかし、従来は10mを超えるような遠距離での探査はコンクリート供試体のみでしか実施しておらず、実際のコンクリート構造物では試みたことが無かった。そこで、今回は本州四国連絡高速道路株式会社の管理する因島大橋東高架橋において、実際に30mを超える遠距離計測実験を行い、非接触音響探査法の遠距離計測に関する適用性検討を行った。

2. 非接触音響探査法の概要

2.1 欠陥検出の基本原則

図-1 に示すようにコンクリート構造物の表面近傍に空洞欠陥もしくは亀裂が表面に対して水平かつ平面的に存在していた場合、その欠陥上で板状の構造が存在するとみなすことができる。ハンマーによる叩き点検を実施すると、縦振動とたわみ振動の2種類の振動が発生することになる。

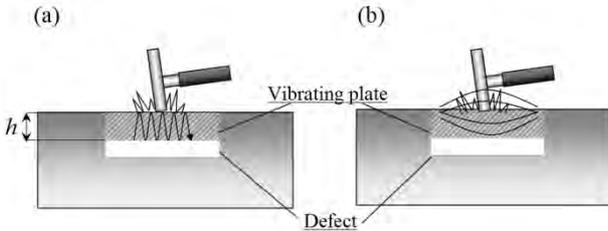


図-1 欠陥部の振動パターン (a)縦振動, (b)たわみ振動

コンクリート中の縦波音速を $3000\sim 4000\text{m/s}$ 、欠陥までの深さ h を $10\sim 100\text{mm}$ 程度とすると縦振動の共振周波数は $15\sim 200\text{kHz}$ となり、ほぼ非可聴域である。一方でたわみ振動の場合は、コンクリートの材料定数（ヤング率、ポアソン比、密度）等に依存するが、その共振周波数は縦振動よりも低く、ほぼ可聴域の周波数となる。そのため、通常、ハンマーを用いた打音法では、このたわみ共振時の発生音を聞いて欠陥の有無を判定していることになる。本手法では音波照射加振によりこのたわみ共振を発生させることにより欠陥を検出する。

2.2 非接触音響探査法の基本セットアップ

非接触音響探査法の基本セットアップ図を図-2 に示す。最初に音源から発した空中放射音波により対象壁面を励振する。次に励振時の壁面上の振動をレーザドップラ振動計(LDV : Laser Doppler Vibrometer) もしくはスキャニング振動計(SLDV : Scanning Laser Doppler Vibrometer) により光学的に検出し、欠陥部と健全部の振動特性の違いから欠陥を検出するという手法である。

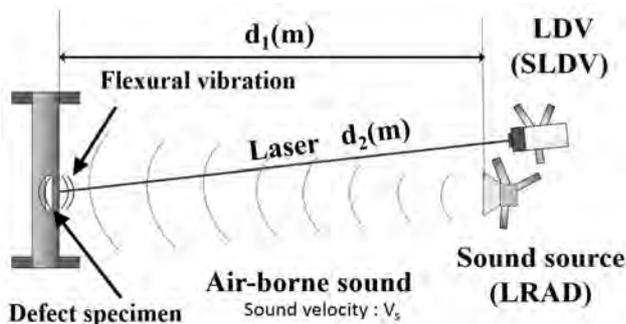


図-2 非接触音響探査法の基本セットアップ

d_1 :音源から測定対象面までの距離
 d_2 :測定対象面からLDVまでの距離

音源としては、指向性が鋭くかつ 5m 以上の遠距離でも 100dB 以上の音圧を発生可能なものとして、長距離音響発生装置(LRAD : Long Range Acoustic Device)もしくは強力超音波音源(UNAS : Ultrasonic Nonlinear Speaker)等を用いることができる。しかしながら、音波照射加振によりコンクリート表面に加わる圧力は、測定表面での音圧が 100dB としても、高々 2Pa 程度でしかない。これは直接ハンマーで叩く打音法に比べると百分の一程度の加振力でしかないことを意味している。

2.3 音波送信方法

欠陥部のたわみ共振を利用すれば、音波照射のような極めて弱い加振力でも振動を発生させることが可能になる。このたわみ共振周波数で振動させるためには、その周波数を含んだ音波を送信する必要があるが、単に広い周波数範囲を含むという理由でノイズ波やチャープ波といった波形を安易に使用すると S/N 比の低い計測となってしまうことになる。その主な理由は計測対象物からの反射音波の影響により、計測用の高感度 LDV 自体が振動してしまうためである。また、極めて弱い加振力によりたわみ共振振動を発生増幅させるためにはその共振周波数による加振をある程度は持続した方が効率的であることも理由の一つである。

(1) シングルトーンバースト波

そこで、著者らは図-3 に示すような中心周波数の異なる短いバースト波を、逐次的に送信するトーンバースト波を考案した⁸⁾。この波形は一回の音波送出時に1つの周波数を使用することから、シングルトーンバースト(STNB : Single tone burst)波と呼称することにする。この波形を用いれば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。同時に送信バースト波間のインターバルを十分長く取ることにより、測定対象に音波が到達してから、計測対象面からの反射音波がレーザヘッドに到達するまでの時間帯(計測可能時間帯)に時間ゲートを適用して、目的信

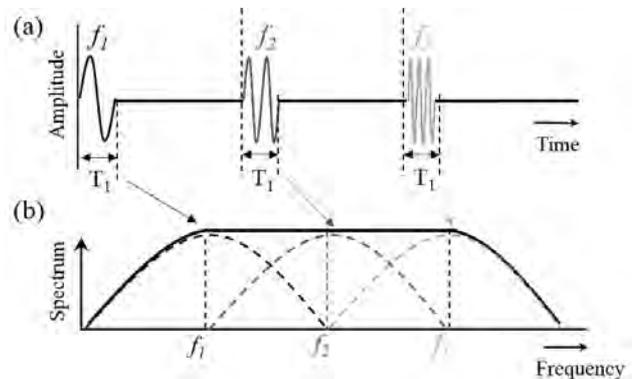


図-3 シングルトーンバースト波の模式図

(a)時間波形, (b)スペクトル

号を抽出することにより LDV の振動による影響を軽減することが可能となる。さらに送信周波数は逐次変化させているために、その周波数に合わせた周波数ゲートも適用すれば、時間ゲートでは除去できないトンネル内等における多重反射の影響すらも低減可能となり、周囲の外乱ノイズに強くかつ極めて高い S/N 比の計測が実現できることになる。

(2) マルチトーンバースト波¹²⁾

計測可能時間帯内であれば、1つの周波数だけでなく複数の中心周波数をもつ短いバースト波が順次連続していても、計測は可能である。このような一回の音波送出時に複数の周波数を含んだ形式の送信波を、マルチトーンバースト(MTNB: Multi tone burst)波と呼ぶことにする。この MTNB 波の模式図を図-4 に示す。

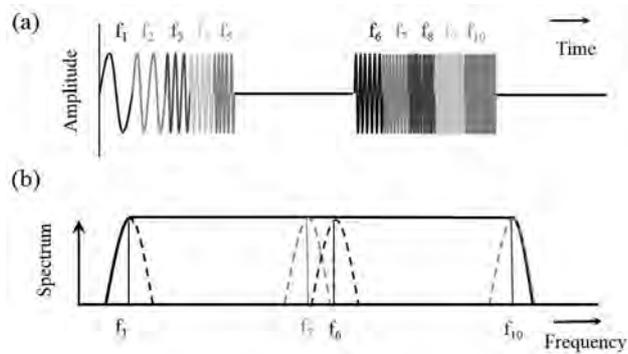


図-4 マルチトーンバースト波の模式図
(a)時間波形, (b)スペクトル

LDV と計測対象面間の距離が大きくなるほど、計測対象面からの反射音波がレーザヘッドに到達するまでの時間は長くなる。すなわち、距離が大きくなるほど、1回の音波送出時に送出可能な周波数帯の数も増えるために、このマルチトーンバースト波を用いることによる計測高速化という面で効果があることを意味している。

(3) 計測時間の比較実験

コンクリート供試体($2 \times 1.5 \times 0.3 \text{ m}^3$)に埋設された模擬空洞欠陥を用いて STNB 波と MTNB 波を用いた場合の計測時間の比較を行った。欠陥部には厚さ 25mm、直径 200φ の発泡スチロールが深さ(かぶり)80mm の位置に埋設されている(図-5 参照)。実験セットアップは図-2 と同じで、 d_1 および d_2 はそれぞれ約 5m および約 5.3m であった。音源としては LRAD-300X(Lrad Corp.), SLDV としては PSV-400-H4(Polytec Corp.)を用いている。測定点数は 35 点、使用した STNB 波のアベリッジ回数は 5 回で、音波の送信間隔は 50ms とした。また比較のために使用した MTNB 波の送信間隔は 30ms のものを使用した。なお、STNB 波と同じアベリッジ回数をさらに短時間で実現するために、

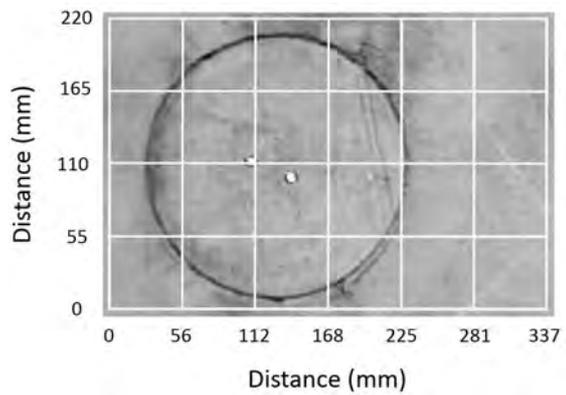


図-5 コンクリート供試体のスキャンエリア図

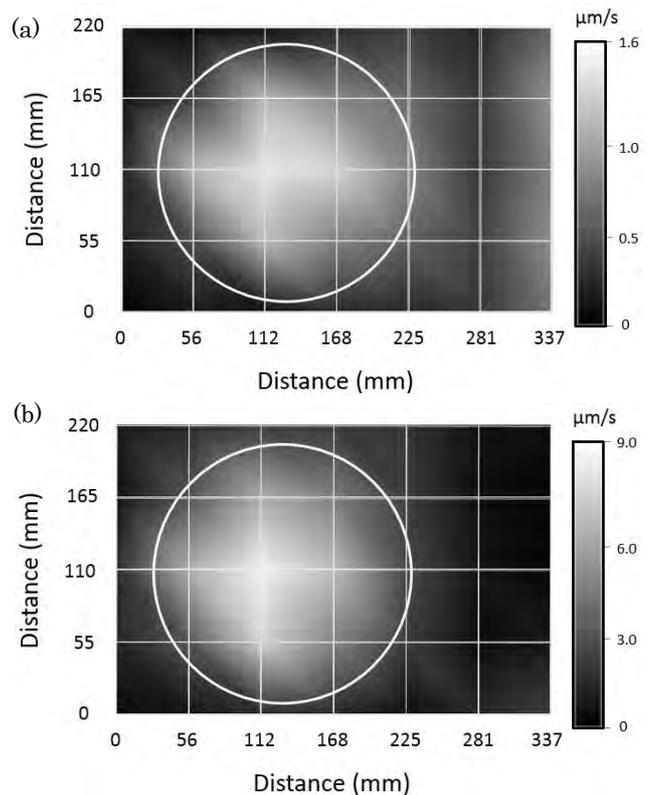


図-6 振動速度(2867.2Hz)の分布図
(a)STNB, (b)MTNB $\times 5$

同じ MTNB 波を 5 回連続して送出した波形(MTNB $\times 5$)を使用している(どちらもパルス長 3ms、周波数範囲 1000-4800Hz、周波数変調インターバル 200Hz とした)。なお、実験時のコンクリート表面近傍の音圧は約 100dB である。

振動速度(2867.2Hz)の分布図を図-6 に示す。白円は欠陥部の大きさと位置を、白線交点はスキャン位置を示している。図より、白円内に振動速度が高い領域が集中していること、および最大値も白円内に存在していることなどが共通していることから、ほぼ同等の欠陥検出が出来ていることがわかる。計測時間は、STNB 波の場合が 210 秒、MTNB 波の場合が 28 秒となり、従来の約 7.5 倍の計測高速化が実現できることを確認できた。

2.4 欠陥検出アルゴリズム^{9,13)}

(1) 振動エネルギー比

実際のコンクリート構造物の欠陥は複雑な形状をしていることが多く、共振周波数のみを使用した映像化では欠陥規模を明らかにできないことが多い。しかしながら、ある周波数範囲での振動速度のパワースペクトルの和が振動エネルギーに対応する値であるとする、欠陥部と健全部には明確な差が生じていることが考えられる。そこで、振動エネルギー比(VER : Vibration Energy Ratio)を(1)式のように定義する。

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{health}) df} \quad (1)$$

ここで、 PSD_{defect} 、 PSD_{health} は欠陥部、健全部のパワースペクトル密度、 f_1 および f_2 は下限および上限周波数である。実際のコンクリート構造物では健全部でもばらつきがあることが考えられるが、ここでは計測された健全部で振動エネルギーが最も低い値を健全部の基準として計算する。振動エネルギー比は欠陥部、計測不良点ともに高い値を示す。

(2) スペクトルエントロピー

計測対象であるコンクリート表面上の汚れや凹凸等の影響でレーザ戻り光が減少すると、受光漏れに起因する光学ノイズが生じる場合がある⁵⁾。このような信号の周波数特性は白色雑音に近い特性を示す。そこで、信号の白色性を表す特徴量であるスペクトルエントロピー H を導入する。これは、信号のスペクトルを確率分布と見なし、情報エントロピーを計算したもので、(2)式で定義される。

$$H = -\sum_f p_f \log_2 p_f, \quad p_f = \frac{S_f}{\sum_f S_f} \quad (2)$$

ここで、 S_f は測定点での振動速度のパワースペクトルである。スペクトルエントロピー H はスペクトルが均一な白色信号では高い値となる。受光漏れによる計測不良点は白色ノイズレベルが高く、健全部では信号レベルは低い特徴的なピークを持たないため、ともに高い値を示すことになる。

(3) 音響特徴量を用いた欠陥検出アルゴリズム

前述の振動エネルギー比とスペクトルエントロピーといった2つの音響特徴量を組み合わせることにより、閾値を適切に選択することができれば、表-1に示すように欠陥部、健全部および計測不良点の識別が可能となる。

表-1 健全部・欠陥部・計測不良点の識別

	振動エネルギー比	スペクトルエントロピー
健全部	低い	高い
欠陥部	高い	低い
計測不良点	高い	高い

3. 橋梁での遠距離計測実験¹³⁾

3.1 実験セットアップ

非接触音響探査法が遠距離でも実際に適用可能であるかどうかを検討するために、広島県尾道市にある因島大橋東高架橋にて探査実験を行った。実験セットアップを図-7に示す。音源およびレーザと計測対象面までの計測距離は約33.5mである。音源としてはLRAD-300X(LRAD Corp.)、SLDVとしてはPSV-500 Xtra (Polytec Corp.)を使用した。計測箇所は事前の叩き点検で、浮きがあると判定された箇所である。図-8に計測範囲図を示す。図の左側には目視できる細い亀裂が入っていることがわかる。図中の白線交点がSLDVによる計測位置を示している。測定点数は77点(7×11)で、計測領域の大きさは約57×72cm²であった。使用した音波はパルス長5ms、300~4000Hzの周波数範囲を持つマルチトーンバースト波を用いた。波形全体の長さは400msでアベレージ回数は3回としたため、全体の計測時間は約224秒であった。

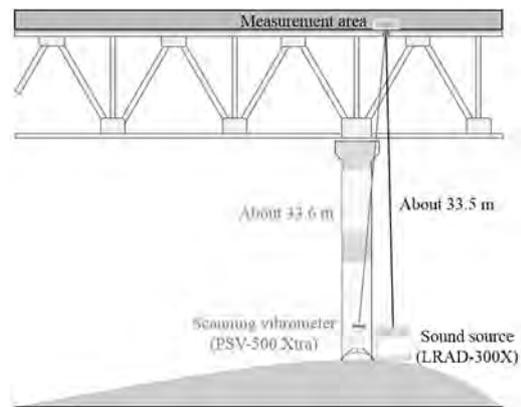


図-7 高架橋における実験セットアップ図

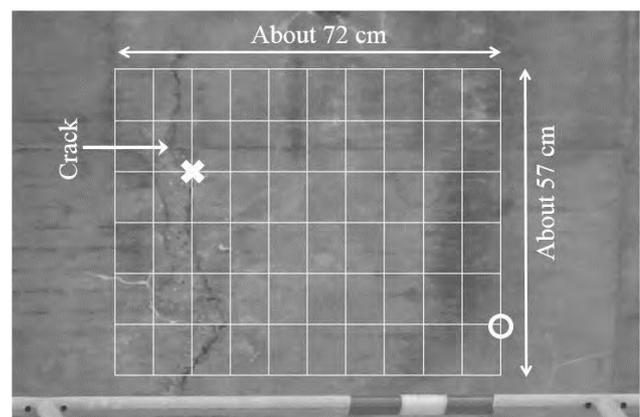


図-8 計測範囲 (57×72cm²)

3.2 実験結果

(1) 振動速度スペクトル

時間&周波数ゲート処理後の振動速度スペクトル例(欠陥部:黒線, 健全部:灰線)を図-9に示す。計測位置は図-8中の白×部と白○部であり、それ

ぞれ欠陥部および健全部と思われる箇所に対応している。図より、630Hz および 1.5kHz に大きな振動速度ピークが見られるが、これは反射音波に起因するスキャニング振動計特有のXY2軸のガルバノミラーによるヘッド共振であることが、事前の確認実験で明らかになっている（無音時の計測では発生しない）。したがって、実際の欠陥部の反応は、灰線に対して黒線のみが飛びだしている500Hz 前後の低い周波数帯域であることがわかる。

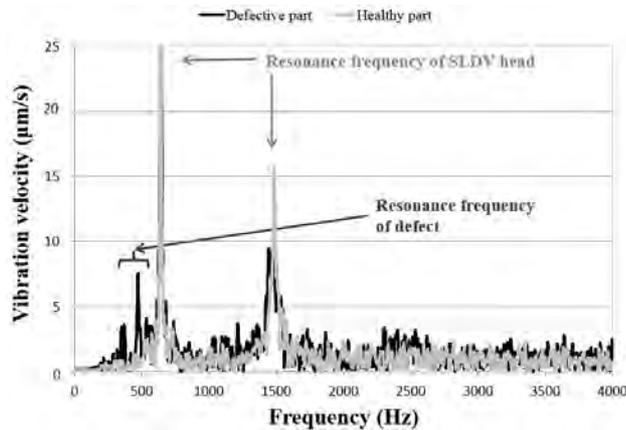


図-9 振動速度スペクトル（黒線：欠陥部、灰線：健全部）

(2)振動エネルギー比分布

振動エネルギー比(300-4000Hz)による映像結果例を図-10に示す。ただし、SLDV (PSV-500Xtra) のヘッド共振 (630 Hz, 1.5 kHz)を除くために300-620 Hz, 640-1480 Hz および 1520-4000 Hz の積分値の合計を使用している。図より、目視できる亀裂のやや右側に強い振動エネルギー比が存在していることが確認できる。

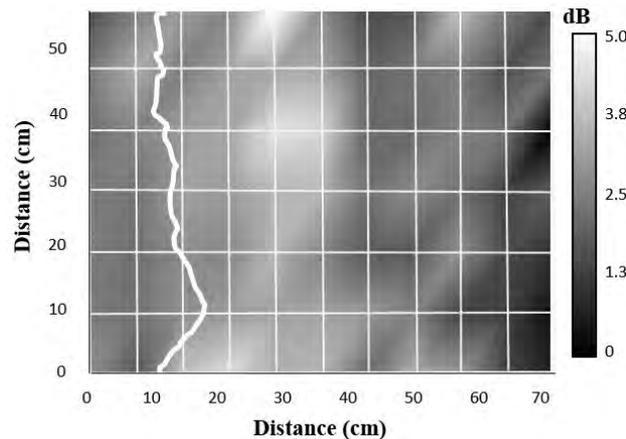


図-10 振動エネルギー比 (300-4000Hz) の分布図

(3)周波数帯域毎の振動エネルギー比分布

次に積分する周波数帯域を300Hz から700Hzまで100Hz 毎に変化させた場合の振動エネルギー比分布の変化を図-11に示す。図より、300~400Hzといった低い周波数帯域では亀裂付近も振動エネルギー比が高いが、周波数帯域が高くなるにつれ

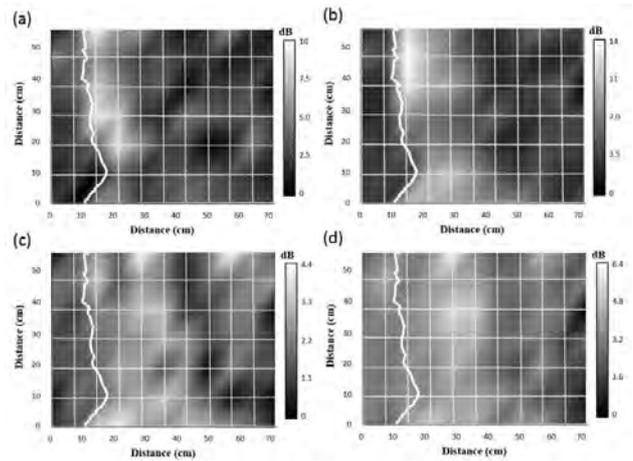


図-11 振動エネルギー比分布の変化

(a) 300-400Hz, (b) 400-500Hz,
(c) 500-600Hz, (d) 600-620Hz+640Hz-700Hz

て亀裂の右側に振動エネルギー比の高い箇所が移動していくことがわかる。これは、目視できる亀裂とコンクリート内部に存在する亀裂がつながっていることを示唆しており、積分する周波数範囲を変化させることで、内部亀裂のつながり具合を推定できることを意味している。

(3)比較用の打音点検結果

振動エネルギー比による映像結果と比較するために、ハンマー加振時の振動速度分布を SLDV により計測した。加振位置は SLDV の計測用レーザー光の近くとし、音圧を下げた LRAD の音をトリガ

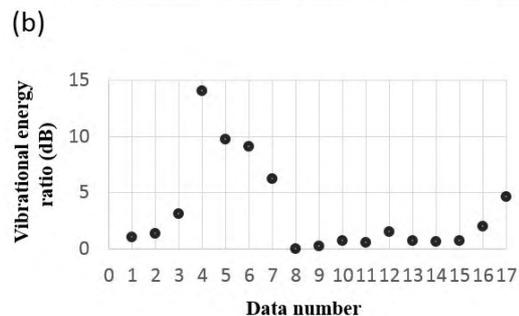
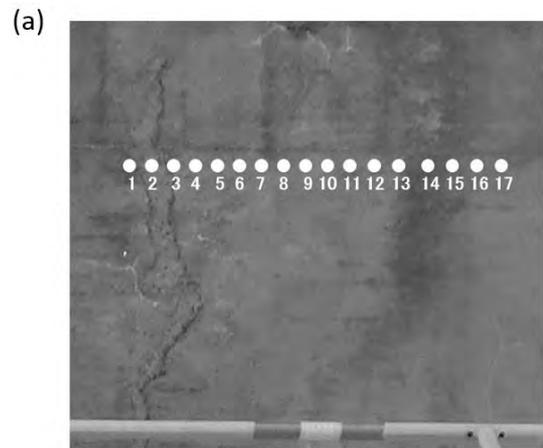


図-12 ハンマー加振による振動エネルギー比
(a)計測位置, (b)振動エネルギー比分布 (100-5000Hz)

用の信号音として利用して3回の加算平均を行った。ただし、高所におけるハンマー加振作業の困難性を考慮して、計測は横方向1ライン(17点)のみで行われた。計測位置およびその位置における振動エネルギー比を図-12に示す。なお、この実験の場合にはSLDVのヘッド共振の影響は無視できるために積分範囲は100-5000Hzとしている。図より、亀裂部のある計測点3から、計測点7にかけて振動エネルギー比が高く、亀裂部の右側に振動エネルギー比が高い箇所があることが確認できる。この結果は非接触音響探査法により得られた結果と同様な傾向を示していることがわかる。

4. まとめ

今回の実験結果より実際の橋梁において30mを超える離隔であっても、マルチトーンバースト波を用いた高速非接触音響探査法により打音法とほぼ同等な欠陥検出が可能であることが確認された。また、特に30mが限界であるというわけでもなく、さらに遠距離での計測も可能であると思われる。以下に、現在までに判明している本手法の特徴を列挙する。

- (1) コンクリート点検時に一般的に用いられている打音法と同じたわみ共振を利用した非破壊検査法であるため、本質的に打音法の代替手法となりうる手法であると同時にエネルギー効率が高い手法であること(小型発電機1台で1日中計測可能)
- (2) 模擬空洞欠陥を埋設したコンクリート供試体を用いた実験結果より、打音法とほぼ同程度の深さと大きさの欠陥を検出できること^{7,8)}。
- (3) 模擬亀裂欠陥を埋設したコンクリート供試体を用いた実験結果より、亀裂幅0mmの欠陥であっても検出可能であること^{6,8)}。
- (4) トーンバースト波と時間周波数ゲートを用いることで高いS/N比を実現し、交通振動やトンネル内残響の影響もほとんど受けないこと。
- (5) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーという2つの音響特徴量を用いた欠陥検出アルゴリズムにより、実コンクリート構造物における欠陥検出にも適用可能であること^{9,13)}。
- (6) 面的加振を用いているために凹凸のある面でも計測可能であること。吹付けコンクリート面においても打音法と同じ欠陥検出精度を実現。
- (7) 音波照射加振を用いているために基本的に安全な手法であること。

本手法には周囲環境騒音や角度依存性といった固有の問題は存在するものの、実はこれらは音源自体に起因する問題であるため、強力超音波音源等を用いれば解消することが既に明らかになっている¹⁰⁻¹¹⁾。このような遠距離から非接触的に打音法

とほぼ同等な検査結果を得ることが可能な高速非接触音響探査法が実現したことにより、今後、世界中の打音点検に変革が起きることが予想される。

参考文献

- 1) Y.Shimada, O.Kotyaev : Development of Laser Based Remote Sensing System for Inner-Concrete Defects, *IEEJ Trans. Electr., Info. & Systems*, 129[7], pp.1192-1197, 2009.
- 2) 島田義則, コチャエフ オレグ, 篠田昌弘, 御崎哲一, 高橋康将, 瀧浪秀元 : レーザを用いたコンクリート欠陥検出の進展, 非破壊検査 61(10), pp.519-524, 2012.
- 3) 森和也, Andrea Spagnoli, 村上敬宣, 鳥越一平 : コンクリート構造物の圧力波を用いた新しい非接触非破壊検査法, コンクリート工学年次論文集 Vol.24, No.1, pp.1473-1478, 2002.
- 4) 森和也, Andrea Spagnoli, 近藤悟朗, 村上敬宣, 鳥越一平 : 衝撃波を用いたコンクリート構造物の非接触非破壊検査法の開発とその自動化に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編 70 巻 695 号 pp. 986-994, 2004.
- 5) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 熊坂和弘 : 局所的な振動特性に着目したコンクリート構造物の空隙検出, 土木学会論文集 No.690/V-53, pp.121-132, 2001.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 杉本恒美, 歌川紀之, 片倉景義 : 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, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.137-142, 2014.
- 9) K.Sugimoto, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda, K.Katakura : Defect-detection algorithm for noncontact acoustic inspection using spectrum entropy, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.54, 07HC15, 2015.
- 10) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 片倉景義 : 強力超音波音源を用いたコンクリート非破壊検査のための非接触音響探査法の検討, コンクリート工学年次論文集 pp.1753-1758, 2015.
- 11) T.Sugimoto, I.Uechi, K.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura : Study on the Non-contact Acoustic Inspection Method for Concrete Structures by using Strong Ultrasonic Sound source, *Physics Procedia*, Vol.70, pp.398-401, 2015.
- 12) T.Sugimoto, K.Sugimoto, N.Kosuge, N.Utagawa, K.Katakura : High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wav, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.56, 07JC10, 2017.
- 13) 杉本恒美, 杉本和子, 川上明彦, 歌川紀之 : 遠距離音波照射加振を用いた非接触探査法の欠陥検出アルゴリズム, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, pp.1849-1854, 2017.