特集≫ 橋梁

構造物点検のための音波照射加振による 遠距離非接触音響探査法

30 m を超える高さの橋梁床版に対する適用性検討

杉 本 恒 美·歌 川 紀 之·川 上 明 彦

遠距離音波照射加振による非接触音響探査法の検討を行っている。本手法はコンクリート構造物の表層 付近に存在する内部欠陥を長距離から検出可能であり、原理的にたわみ共振を利用しているために叩き点 検の代替手法として期待されている。そこで、今回は因島大橋東高架橋において、30mを超える高さに ある橋梁床版に対する非接触音響探査法の遠距離検証実験について紹介する。実験は2016年、2017年と 1年の間隔をおいて2回行われ、欠陥部の進行状態が確認できるかどうかについて検討を行った。実験結 果より欠陥部の劣化状態が進行していることが確認され、本手法が実際に遠距離から適用可能であること が明らかになった。

キーワード:非接触音響探査, 音波照射加振, たわみ共振, 振動エネルギー比, マルチトーンバースト波, 高架橋

1. はじめに

2018 年 8 月に起きたジェノバ市にあるモランディ 橋の崩壊は衝撃的なものであったが,これはイタリア 国内における慢性的な道路行政に対する予算不足が原 因であるとされている。我が国の場合は無関係である と思いたいところであるが,少子高齢化が進みつつあ る現在,将来的にコンクリート構造物の補修・点検に 十分な予算が確保できるかどうかは極めて不透明な状 況であると言える。

一方で、従来のコンクリート構造物の点検手法は、 目視もしくはハンマーを用いた叩き点検がいまだに主 流であるというのが実情である。しかしながら、国内 の少子高齢化の進行に伴い、熟練の叩き点検作業者の 不足が目立つようになってきている。これは叩き点検 作業自体が発生音の違いを耳で聞き分けるという経験 と勘を必要とする作業であるがために、一朝一夕には 作業者を育成できないことに起因している。そのた め、作業経験が少なくても簡単に使用できるような 様々な定量的な手法の開発が進められてきている。し かしながら、提案されてきた多くの手法(超音波,電 磁波レーダ、打音法)は、測定対象面に測定機材自体 を接触もしくは近接させる必要があるために足場や高 所作業車を必要とするという問題点を抱えており、実 際の作業性の改善には結びついていない。そのため、 遠距離から非接触かつ従来の打音法と同等な検査が可 能な点検手法の開発が望まれている。

計測対象面に長距離から非接触で探査できる手法と しては、既に赤外線カメラを用いた手法やパルスレー ザを用いた衝撃加振法などが提案されている。前者の 赤外線カメラを用いれば非接触で対象面の温度分布を 計測すること自体はできる¹⁾。しかし,温度変化の少 ないトンネル内では、検出時にヒーター等の加熱が必 要となるため、高い天井部の検査には適していない。 また、一般的には日照等による温度変化の影響を受け やすいという問題点がある。日照等の影響を避けるた めにあえて5~8µmの波長帯域に感度を持たせた赤 外線カメラを用いる報告²⁾もあるが、その波長帯域 の赤外線は大気中の減衰も大きいため、10m以上の 遠距離での計測にはあまり適していない。さらに、測 定結果は表面近傍の温度分布のみを示しているため, 原理的に叩き点検の代替方法としては不十分と思われ る。一方で後者のレーザ照射加振を用いたレーザリ モートセンシング法³⁾では遠距離からの計測が可能 であるが、大出力レーザを複数使用するために検査時 の安全性が課題となっている。さらにコンクリートの 場合には融点が低いために、表面を破壊してしまわな いように極短時間のレーザ照射加振しかできない。そ のため、大電力に見合った有効な振動エネルギーを加 えることが出来ていないという欠点がある。

そのため、我々は音波照射加振によるたわみ共振をレー ザドップラ振動計(LDV:laser Doppler vibrometer) で検出するという非接触音響探査法を提案し、10 m 遠方からでもコンクリート供試体内にある空洞欠陥を 検出できることを示した⁴⁾。その後,実用上の欠陥検 出性能を向上させるために、シングルトーンバースト 波、時間周波数ゲート⁵⁾,振動エネルギー比⁶⁾および スペクトルエントロピーを用いた欠陥検出アルゴリズ ム^{7).8)}などを考案した。しかしながら、音波照射の ような極めて弱い加振力で欠陥部を振動させるために は欠陥部の共振現象を利用する必要があり、場所によ り異なる共振周波数を探すために計測時間が長くなる という問題点があった。そこで、計測高速化のために 1回の音波放射に複数周波数を用いたマルチトーン バースト波を考案した⁹⁾。今回は、この非接触音響探 査法を実際のコンクリート構造物である高架橋への適 用性について検討した。

2. 非接触音響探査法の概要

(1) 基本セットアップ

図一1に非接触音響探査法の基本セットアップを 示す。音源としては5m以上の距離では主に長距離 音響放射装置(LRAD)を使用する。発生した音波に より測定対象壁面を励振し、励振時の壁面上の振動速 度を高感度の LDV もしくはスキャニング振動計 (SLDV: Scanning LDV) を使用して2次元的な振動 速度分布を計測する。もし、壁面内部に水平方向のひ び割れなど欠陥が存在すると、その欠陥部上は健全部 に比べると曲げ剛性が低下するため、音波のような微 弱な力でもたわみ共振を発生させやすくなっている。 一方で音波照射加振により発生できる圧力は、ハン マー加振の約100分の1程度でしかない。しかしなが ら、欠陥部のたわみ共振周波数を利用すれば、そのよ うなごく弱い力であっても計測対象の表面近くに存在 する欠陥を検出することが可能である。ただし、その ためには送信音波の中に欠陥部のたわみ共振周波数が 含まれている必要がある。

(2) 音波送信方法

欠陥部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, -





(a) シングルトーンバースト (STNB) 波, (b) マルチトーンバースト (MTNB) 波

般的にその周波数は未知であるため、本手法では欠陥 部のたわみ共振周波数を探す必要がある。一方で、高 感度の LDV 自体が計測対象からの反射音波による振 動で S/N 比 (Signal to Noise ratio) が低下してしま うのを避けるために、連続的な波形ではなく間欠的な 波形で計測することが望ましい。そのために図-2(a) に示すような1回の送波で1つの周波数を使用するシ ングルトーンバースト (STNB:Single ToNe Burst) 波, 図-2(b)に示すような1回の送波で複数の周波数を 使用するマルチトーンバースト (MTNB: Multi ToNe Burst) 波などが考案された^{9),10)}。どちらも欠陥部の たわみ共振を発生させるために同じ周波数を一定時間 駆動させていることおよび、欠陥探査に必要な周波数 帯域をカバーするように設定するなどの特徴がある。 必要とする周波数範囲にも依存するが20mを超える 遠距離になると、反射音波が戻ってくるまでに時間的 な余裕があるために、必要な周波数帯域すべてを短時 間に送出することが可能となる。そのため特に遠距離 での高速計測には MTNB 波が適していると言える。

(3) 送信波形例

今回の橋梁実験では離隔が 30 m 以上であったため に,高速計測に適した加振用音波としてはマルチトー ンバースト波を使用した。波形例を図—3 に示す。 2016年はパルス長さ5 ms,周波数範囲 300 ~ 4000 Hz の周波数範囲を持つマルチトーンバースト波(300 ~ 2000 Hz および 2100 ~ 4000 Hz の 2 群構成,波形全 体の時間長さ 400 ms),2017年は同じパルス長さで



図--3 実際に使用した MTNB 波の全体波形 (a) 2016 年に使用した MTNB 波 300-4000 Hz (全体の波形長さ 400 ms), (b) 2017 年に使用した MTNB 波 300-2000 Hz (全体の波形長さ 200 ms)

周波数範囲 300 ~ 2000Hz の周波数範囲を持つマルチ トーンバースト波(300 ~ 2000 Hz の1 群構成,時間 長さ 200 ms)を使用した。周波数範囲を変更した理 由は後述の 2016 年度の実験結果から亀裂欠陥のもの によると思われる周波数ピークが主に 2000 Hz 以下に 存在することが判明したためである。通常,たわみ共 振の場合,欠陥の面的な規模が大きくなるほど周波数 は低下すること,およびコンクリート内部に発生した 亀裂欠陥は大きくなることはあっても自然に小さくな ることは考えられないことなどの理由からここでは低 い周波数のみに加振する周波数範囲を変更した。

(4) 振動エネルギー比

実際のコンクリート構造物内に発生する欠陥は複雑 な形状をしていることが多く,複数の共振ピークを持 つ場合がある。そのような場合には、単一の共振周波 数のみを映像化する欠陥検知アルゴリズムでは欠陥規 模を明らかにすることができないことが想定される。 しかしながら、ある周波数範囲での振動速度のパワー スペクトルの和を振動エネルギーに対応する値である とすると、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。

$$[VER]_{dB} = 10\log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{health}) df}$$
(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, f₁ および f₂ 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 若干のばらつきがあることが考えられるが, ここでは 計測された健全部中で振動エネルギーが最も低い値を PSD_{health} として計算する。

橋梁での遠距離計測実験

(1) 実験セットアップ

非接触音響探査法が実際に遠距離から、欠陥部の進 展があるかどうかを判定するスクリーニング検査に使 用できるかどうかを検討するために、2016年および 2017年と2年連続して広島県尾道市にある因島大橋 東高架橋にて探査実験を実施した。実験セットアップ 図および写真を図-4に示す。音源およびSLDVは 橋梁のほぼ真下に配置し、計測対象面までの計測距離 は約33.5mであった。なお、音源としてはLRAD-300X(LRAD Corp.)、SLDV としては PSV-500 Xtra



図―4 高架橋における実験セットアップ^{10),11)} (a) セットアップ図, (b) 全体写真

(Polytec Corp.) を使用した。計測箇所は定期点検で, 浮きがあると判定された箇所である。図—5に計測箇 所の写真(写真は 2016 年当時)および 2016 年および 2017 年の計測範囲図を示す。2016 年と 2017 年では, 計測領域がややずれてはいるが,どちらも打音点検で 浮きが判定された目視できる細い亀裂を領域左側に含 むように設定されている。領域の大きさは,2016 年は 約720 × 560 mm² で,計測ポイント数は77 (11 × 7, 計測ピッチは約72 × 93 mm²),2017 年は約1260 × 520 mm²で計測ポイント数は135 (15 × 9,計測ピッチ は約90 × 65 mm²) である。なお,図中の白線の交点 がスキャンした位置である。加振用音波としては,前節 で紹介したマルチトーンバースト波を使用した。なお, アベレージ回数については 2016 年では 3 回, 2017 年で は 5 回で計測した。なお, 計測にかかった時間は 2016 年では約 224 秒, 2017 年では約 490 秒程度であった。

(2) 実験結果

(a) 振動速度スペクトル

2016年および 2017年における健全部および欠陥部 と思われる個所の振動速度スペクトルを図-6に示 す(黒色線:欠陥部,灰色線:健全部)。測定箇所は それぞれ,図-5中における〇印および×印が示す 位置である。図中の 630 Hz 付近と 1500 Hz 付近にあ



図-5 計測範囲 (a) 2016 年, (b) 2017 年





図-7 振動エネルギー比(300-2000 Hz)の分布図(a) 2016年,(b) 2017年



図-8 振動エネルギー比(300-2000 Hz)の分布図(2)(a) 2016年,(b) 2017年

るピークは,事前の検討でスキャニング振動計内にあ るガルバノミラーの共振であることが判明している。 それ以外の 300 ~ 500 Hz 付近および 1150 Hz 付近に ある共振ピークが健全部にはないもので,欠陥部に起 因するものであると推測される。

(b) 振動エネルギー比を用いた映像結果

図-7振動エネルギー比(300~2000 Hz)を用いた映像結果例を示す。また,2016年と2017年で計測領域が異なるため,比較のためにあえて同じ領域のみを切り出した結果例を図-8に示す。ただし,SLDVのヘッド共振周波数帯域(630 Hz,1.5 kHz)付近は積分から除いている。なお,図中の白点線は写真から判断できる亀裂位置を示している。2016年より2017年の方が亀裂が伸びており,2017年の映像結果からはちょうど亀裂に挟まれた領域で振動エネルギーが高くなっていることがわかる。また,2016年には左側の亀裂部しか確認できなかったが,映像からは2017年に右側に発生した亀裂位置の振動エネルギー比もやや高く表示されており,内部的に剥離が進行していたことがわかる。これは図-6において,2017年の方が共振周波数が低くなっていることからも言える。

(c) ハンマー加振時の振動エネルギー比

2016年の実験時には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 測用レーザ光の近くとし,音圧を下げた LRAD の音 をトリガ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-9(a)および(b) 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 300 ~ 2000 Hz としている (レーザヘッドの共振周波数帯域もそのまま積分)。図



(a) 計測位置, (b) ハンマー加振 (300-2000 Hz), (c) 音響加振 (300-2000 Hz)

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



図-10 計測領域の写真 (a) 叩き落とし前, (b) 叩き落とし後

は非接触音響探査法により得られた結果である図―9 (c)と同様な傾向を示していることがわかる。

(3) 実験後の内部の状況

今回の実験箇所で進展が確認された欠陥箇所は,補 修工事中であったことから本実験終了後にたたき落し て状況を確認した。剥離前と剥離後の写真を図—10 に示す。図より,鉄筋腐食に起因する剥離が発生して いたことが確認できる。なお,調査箇所は補修を予定 した箇所であり,現在は補修を終えている。

4. おわりに

今回の実験結果より実際の橋梁において 30 m を超 える離隔であっても,音波照射加振を用いた高速非接 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,2016 年および 2017 年と2 年にわたり同じ個所を計測したことから, 欠陥の進展状況の把握やスクリーニングに本手法が有 効であることも実証された。なお,適用距離は 30 m が限界であるというわけではなく,音源および LDV のレーザ出力に応じてさらに遠距離での計測も可能で あると思われる。

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,強力超音波音源もしくは小型 音源自体を UAV 等に搭載すれば解消することが既に 明らかになっている^{12),13)}。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。

JCMA

《参考文献》

- M. R. Clark, D. M. McCann and M. C. Forde : Application of Infrared Thermography to the Non-Destructive Testing of Concrete and Masonry Bridges, NDT&E International, 36 (4), pp. 265-275, (2017).
- 2) 阿瀬弘紀, 佐藤大輔, 鄭子揚, 阪上隆英:5-8µm 波長帯に感度を 有する赤外線カメラの実用化に関する研究, 実構造物における反射低 減効果および剥離検出性の確認, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.9-10 (2018).
- 3) 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).
- 4) 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).
- 5) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura, Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Concrete Structures -Improvement of Signal-to-noise Ratio by using Tone Burst Wave Method-, Proc. of 2013 IEEE IUS, pp.1303-1306, (2013).
- 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).
- 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).
- 8) K.Sugimoto, T.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda, and A.Kawakami, Detection of internal defects of concrete structures based on stastical evaluation of healthy part of concrete by the noncontact acoustic inspection mehtod, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 57, 07LC13, (2018).
- T.Sugimoto, K.Sugimoto, N.Kosuge, N.Utagawa, K.Katakura : Highspeed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.56, 07JC10, (2017).
- 10) 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,39, pp.1849-1854, (2017).
- 11) 杉本恒美,杉本和子,歌川紀之: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,一マルチトーンバースト波を用いた橋 梁における検証―,建設施工と建設機械シンポジウム論文集,pp.149-154, (2017).
- 12) 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).
- 13) 杉本恒美,杉本和子,上地樹,歌川紀之,黒田千歳:コンクリート非 破壊計測のための非接触音響探査法に関する研究一音源搭載型 UAV を用いた外壁検査の効率化に関する検討一,音響秋季講論集,pp.741-742,(2018).



[筆者紹介] 杉本 恒美(すぎもと つねよし) 桐蔭横浜大学大学院 工学研究科 教授



歌川 紀之(うたがわ のりゆき)
佐藤工業㈱
技術研究所
上席研究員

川上 明彦(かわかみ あきひこ) 本州四国連絡高速道路㈱ しまなみ尾道管理センター 橋梁管理役