

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

——音源搭載型ドローンを用いた外壁検査——

Study on noncontact acoustic inspection method for concrete non-destructive inspection—Outer wall inspection using sound source mounted drone—

上地 樹*・杉本 恒美¹・歌川 紀之²・黒田 千歳²

*¹ 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

² 佐藤工業(株)技術研究所

(2020年3月14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、そのことが大きな社会問題となっている。これは、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り、重大な事故に結びつく危険性が存在しているためである。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おり、一般にも広く認識されるようになってい

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、打音検査が多く用いられている。これはハンマ等を用いて検査対象面を直接打撃し、その時に発生した音から検査者が、欠陥か健全かを判断する手法である。この手法で必要なものは、検査者と打撃を行う道具のみであり、簡便な検査が可能なことから、現在までに広く普及している。しかしながら、近年では高架橋や高層ビル等、巨大な建造物が溢れているため、直接打撃が困難な場所が多く、高所作業車や仮設足場が必要である等、簡便な検査が困難である。また、この手法では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、空中放射音波による音響加振とレーザドップラ振動計(LDV: Laser Doppler Vibrometer)によるレーザ振動計測を用いた、非接触による非破壊探査法である非接触音響探査法の研究を行っている¹⁻⁹⁾。その過程で、コンクリート構造物にはデザイン性および独自性を高めるために外壁タイルが使われているものが有り、検査方法に同様

* UECHI Itsuki: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama. 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

² UTAGAWA Noriyuki and KURODA Chitose: Sato Kogyo Co., Ltd.

の問題を抱えていることを改めて認識することになった。このことから、我々が提案している非接触音響探査法を用いて、外壁タイル内部の空隙や剥離等の欠陥が検出可能か事前に検証実験を行った結果、本手法が適用可能であることが確認された。

今回の実験では、非接触音響探査法の新たな試みとして音源を搭載したドローン（無人航空機、UAV: Unmanned Aerial Vehicle）を用いて計測を実施した¹⁰⁻¹²⁾。ドローンは近年市場規模の拡大が著しく、ドローンを用いたサービスの増加など、今後の発展が期待される分野である。今回は、加振用音源をドローンに搭載することで非接触音響探査法における汎用性の向上を試みた。

II. 非接触音響探査法

非接触音響探査法の概念図を図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接触することなく、構造物内部の欠陥検査が可能な方法である。

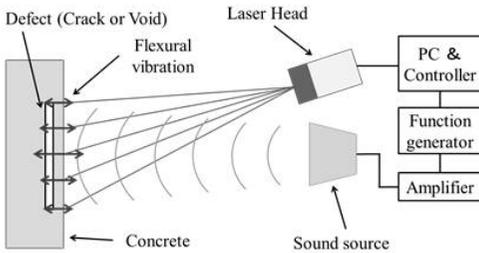


図1 非接触音響探査法の概念図

本手法を用いた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ものである。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、その表面部分が板状の構造になり、その部分においてたわみ振動が励起さ

れる。これにより欠陥が存在する場所では振動が大きくなり、健全な場所と振動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困難である。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。前述した、欠陥部表面の板状構造における固有振動数と同様の周波数の音波を放射することで、共振現象を励起させ少ない力で対象を振動させることが可能になる。

構造物内部に発生した欠陥を正方形であると仮定した場合の、単純支持されたたわみ振動の共振周波数 fr の定義式を(1)に示す¹³⁾。式(1)において、 h は外壁表面から欠陥までの深さ(板厚)、 a 欠陥における一辺の長さ(辺長)、 E はヤング率、 ρ は密度、 ν はポアソン比を表している。式(1)より、共振周波数は欠陥の深さに比例し、辺長に反比例する事が確認出来る。

$$fr = \frac{19.74h}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \dots\dots\dots(1)$$

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。そのため、ある程度音圧を与えることで加振におけるエネルギーを増加させる必要がある。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。

我々が提案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面にたわみ共振を励起させ、それにより発生した各測定点

における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、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、長距離からの計測および定量的な検査が可能であること、およびトーンバースト波と時間一周波数ゲートを用いることで高いS/N比を実現しているため、交通振動の影響はほとんど受けないことなどが挙げられる。

今回実施した手法は、前述した様にドローンに音源を搭載しての計測である。探査原理としては従来の非接触音響探査法を踏襲しているが、異なるのは音源が自由に移動可能な点である。非接触音響探査法は計測距離が長くなると計測可能な音圧を維持するために、それに比例して放射音波の音圧を増加させる必要がある。放射音波は可聴域であるため、必然的に周囲への騒音が問題になってくる。そこで、音源をドローンに搭載することで音源を計測対象に近接させることが可能になり、それに伴う放射音波の音圧増加を抑制することが期待できる。

Ⅲ. 実験機器

1. ドローン

計測に使用した音源搭載型ドローンを図2に示す。ドローンを用いて非接触音響探査法を行うためには音源を搭載する必要があるが、そのためにはある程度ペイロードの大きな機体が必要である。そこで、今回の計測のために選定した機体はMATRICE 600 PRO (DJI Co., Ltd.) である。この機体の最大ペイロードは6 kg であり、音源等を十分に積載可能である。

なお、この機体には音響加振を行うためのフラットスピーカ (FPS1030M3F1R, FPS Inc.)、放射音波を受信するためのFM 受信機、計測対象までの距離を計測するためのレーザ距離計、および音波照射位置の確認用レーザ

などが搭載されている。また、飛行可能時間は約20分である。



図2 音源搭載型ドローン

2. レーザドップラ振動計

計測対象の振動を計測するためのレーザドップラ振動計にはPSV-500 Xtra (Polytec GmbH) を使用した。PSV-500 Xtra は高出力の半導体レーザ (1550nm, 出力10mW) を使用しており、高い受光感度を持ち、長距離での計測を可能としている。また、レーザ光の安全基準はクラス2 (eye safe) であり、安全面でも問題はない。さらにスキヤニング機能を有しており、複数点の計測も非常に高速に行うことが可能である。



図3 PSV-500 Xtra

3. 外壁タイル供試体

計測対象に設定した外壁タイル供試体 (2000W×1600H mm²) を図4、模擬欠陥の埋設位置を図5に示す。供試体には模擬欠陥として、0.5 mm 厚のPET 樹脂板 (A, C) および、0.5 mm 厚の発泡ポリスチレン

シート (B, D) + 0.5 mm 厚のテープが埋設されている。模擬欠陥までの埋設深さはタイル表面から約 9 mm である。模擬欠陥の大きさは、50 mm 角、100 mm 角、150 mm 角および 200 mm 角の 4 種類の大きさが存在する。

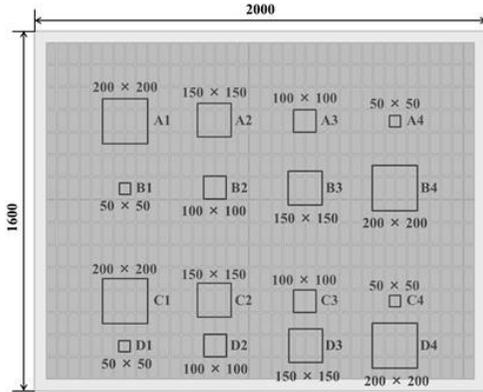


図4 外壁タイル供試体

A, C: PET 樹脂板 B, D: 発泡ポリスチレンシート

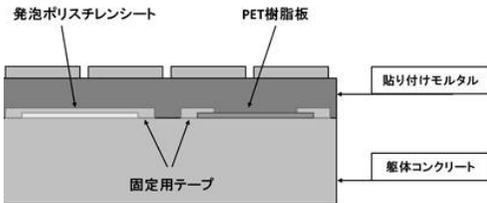


図5 模擬欠陥埋設位置図

IV. 実験方法

1. 実験セットアップ図

実験セットアップ図を図 6 に示す。実験では約 3 m のコンクリート構造物の上に、クレーンを用いて外壁タイル供試体を吊り上げた。そして供試体の高さまでドローンを飛行させた状態で音波を放射し、レーザドップラ振動計により走査を行った。計測中は音響加振を行うドローンが離隔距離 4 m 程度の位置で飛行し、レーザドップラ振動計は約 11.1 m の距離に設置した。但し、ドローンは風などの影響で移動してしまい、離隔距離

に変化が生じている状態での計測である。なお、この時レーザの計測時の仰角は約 13.6° である。計測時の加算平均回数は 5 回に設定した。

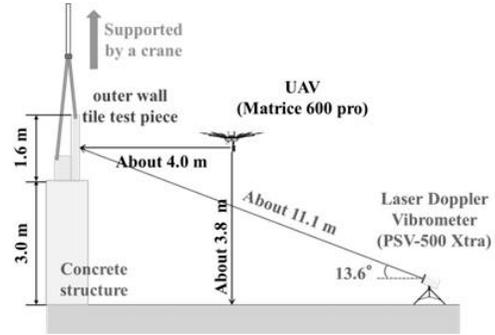


図6 実験セットアップ図

2. 計測範囲

計測時の走査範囲図を図 7 に示す。計測範囲は縦 1.4 m、横 1.6 m 程度に設定した。計測点数は縦 21 点、横 25 点の計 525 点である。各計測点の間隔は 70 mm 程度となっている。図中における白線の交点がレーザによる計測位置である。

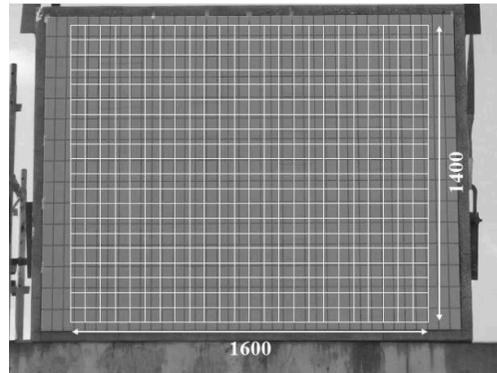


図7 計測範囲図

3. 使用波形

音響加振に使用した波形を図 8、その波形の周波数特性を図 9 に示す。この波形は周波数範囲 500 - 4100 Hz、パルス幅 3 ms、変調周波数 200 Hz のマルチトーンバースト波である。なお、この波形はチャープ波ではな

く、単一の周波数の波形を連続的に配置しているものである。また、計測時の音圧は5 m先で90 dB程度の大きさになる様に設定された。

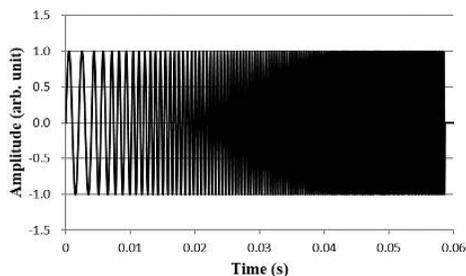


図8 マルチトーンバースト波の波形

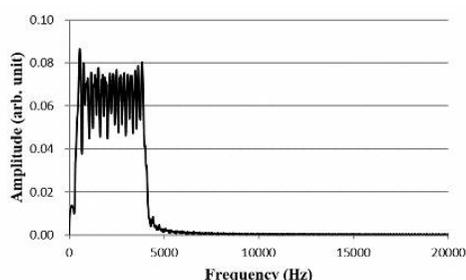


図9 使用した波形の周波数特性

V. 結果と考察

1. 振動速度スペクトル

音源搭載型ドローンを用いた非接触音響探査法により検出された、200 mm角、150 mm角および100 mm角の各欠陥部における代表点の振動速度スペクトルを図10～12に示す。ただし、欠陥部ごとに卓越した周波数ならびに振動速度の値が異なるため、図中で表示されている周波数範囲ならびに振動速度の最大値はそれぞれ異なっている。

これらの結果において、欠陥部の共振周波数である卓越した反応が各々の結果で検出されたことから、本手法により欠陥部の検出が可能であることが確認された。しかし、検出された周波数に着目すると、全ての大きさの欠陥において、欠陥の大きさが等しいにも拘

わらず、共振周波数が大きく分けてA、CおよびB、Dの二つに分かれるという結果が確認された。この原因として、これらA、C（PET樹脂板）およびB、D（発泡ポリスチレンシート）は埋設されている模擬欠陥が異なっており、この差異が共振周波数の分離原因と考えられる。

卓越した反応における振動速度の値に着目すると、欠陥部の大きさが小さいほど振動速度が低下していることがわかる。ノイズレベル自体はそれほど変化しないため、S/N比も同様に低下しているといえる。

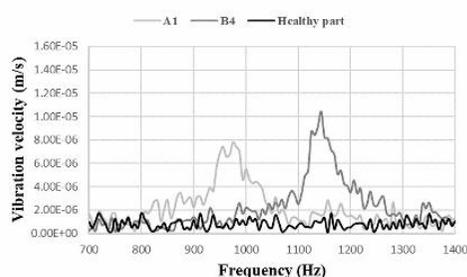


図10 振動速度スペクトル：200 mm 角

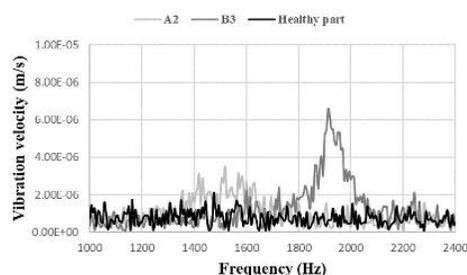


図11 振動速度スペクトル：150 mm 角

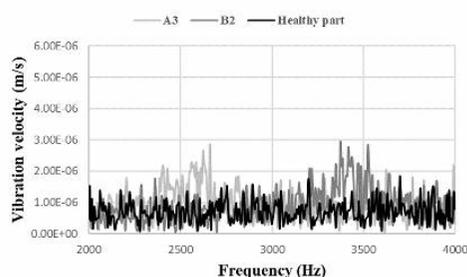


図12 振動速度スペクトル：100 mm 角

2. 振動エネルギー比

検出された結果について振動エネルギー比 (VER: Vibration Energy Ratio) を用いて検討を行った。振動エネルギーを用いる利点として、共振周波数の異なる複数の欠陥を包括的に検出可能である点が挙げられる。振動エネルギー比の定義を式 (2) に示す。

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{each}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{min}) df} \dots (2)$$

PSD (Power Spectral Density) *each* は各計測点のパワースペクトル密度、PSD *min* は各計測点におけるパワースペクトル密度の最低値を示している。

振動エネルギー比分布を **図 13** に示す。黒色に近いほど振動エネルギーが高く、対象面における振動の振幅が大きい事を表している。前述したようにたわみ共振を利用して欠陥検出を行っているため、振動エネルギーが高い場所が欠陥部の可能性が高い場所である。この結果では、模擬欠陥の位置と振動エネルギーの高い位置が重なっており、外壁タイル供試体における模擬欠陥が二次元的に検出されている。なお、50 mm 角の欠陥に関しては共振周波数が 10 kHz を超えることが事前に判明している。これを計測することにより生じる、放射音波の周波数範囲拡大による波形の全体時間の延長、それに伴う計測時間の増

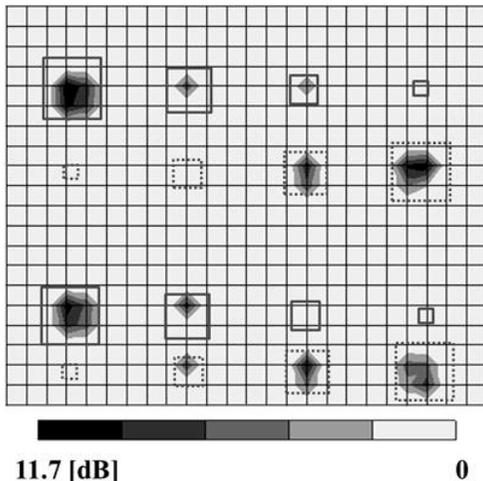


図 13 振動エネルギー比分布図 (800-3400 Hz)

加を避けるため、計測時間短縮を目的としてこの計測では対象から外している。

また計測密度に関しても、前述した様に各計測点の間隔は 70 mm 程度となっており、50 mm 角の模擬欠陥を確実に捕捉するためには間隔を 50 mm 以下にする必要がある。しかし、こちらも計測密度を上げると計測点数が増え計測時間が増加するため、一回り大きな 100 mm 角の模擬欠陥が捉えられる計測間隔に設定した。

VI. まとめ

今回は、外壁タイル供試体を対象に音源搭載型ドローンを用いた非接触音響探査法の検証実験を実施した。実験結果より、たとえ自然風の影響を受けたとしても音源の指向性範囲内であれば、飛行中のドローンからの音波照射加振による欠陥探査が可能である事を確認した。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費若手研究 (B) 17K12991 の助成を受けて実施されたものである。

【参考文献】

- 1) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino: Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Non Destructive Inspection using SLDV and LRAD, IEEE Int. Ultrasonics Symp. (2011), p.744.
- 2) 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, (2011).

- 3) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Concrete Defect Detection—Study on the Defect Defection using the Realistic Crack Model and the Angle Dependence, IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2012), p.94.
- 4) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: Study on non-contact acoustic imaging method for concrete structures—Improvement of signal-to-noise ratio by using tone burst wave method, IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2013), p.1303.
- 5) 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., 52, 07HC12, (2013).
- 6) 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., 53 (2014) 07KC15.
- 7) K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C.Kuroda and K. Katakura: Defect-detection algorithm for noncontact acoustic inspection using spectrum entropy, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.54, 07HC15, (2015).
- 8) T. Sugimoto, K. Sugimoto, N.Kosuge, N. Utagawa and K. Katakura, High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave , Jpn. J. Appl. Phys., Vol.56, 07JC10, (2017).
- 9) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Utagawa, C.Kuroda: Detection of resonance frequency of both the internal defects of concrete and the laser head of a laser Doppler vibrometer by spatial spectral entropy for noncontact acoustic inspection, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.58, SGGB15, (2019).
- 10) 杉本恒美、杉本和子、上地樹、歌川紀之：外壁検査のための音源搭載型 UAV を用いた高速非接触音響探査法、コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019, pp.1901-1906, (2019.7).
- 11) 杉本恒美、杉本和子、上地樹、歌川紀之：ドローンからの音波照射加振を用いた外壁の非接触音響探査, コンクリート工学, 57, 9, pp.681-686, (2019.9)
- 12) T. Sugimoto, K. Sugimoto, I. Uechi, N.Utagawa and C. Kuroda: Outer wall inspection by noncontact acoustic inspection method using sound source mounted type UAV, Proc. of the Int. Congress on Acoustics (2019 ICA), pp.8188-8195, (2019.9)
- 13) A.W. Leissa: Vibration of plates, NASA, SP-160, U.S. Government Printing Office, Washington DC, (1964).