

報告 非接触音響探査法による吹付けコンクリートにおける欠陥検出

杉本 恒美*1・杉本 和子*2・黒田 千歳*3・森岡 宏之*4

要旨: 音波照射加振により発生するたわみ共振を利用して、計測対象物の表面近くに存在する剥離や空洞欠陥を検出可能な非接触音響探査法の検討を行っている。既に長距離音響発生装置とレーザドップラ振動計を用いて 30m 超の離隔でも欠陥検出が行えることが判明している。従来はトンネル覆工や橋梁等を対象としてきたが、今回は吹付けコンクリートに対する本手法の適用性を確認するために、既設の地下発電所の大空洞内において検証実験を行った。打音法による欠陥判定結果と 80%超の整合性が確認できたことから、本手法の吹付けコンクリートへの適用性についての見通しが得られた。

キーワード: 非接触音響探査, 長距離音響発生装置, レーザドップラ振動計, 吹付けコンクリート

1. はじめに

コンクリート構造物の表面近傍に存在する剥離や劣化の程度を調査する方法としては、すでに様々な手法が開発されてはいるものの、多くの調査手法は検査対象物に接触もしくは極めて接近して使用しなければならないために、足場や高所作業車を必要とするという問題点を抱えている。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となる点検手法の開発が期待されている。実際に 5m 以上の遠距離から非接触計測が行える非破壊検査法としては、赤外線カメラを用いた赤外線法、パルスレーザを加振源とするレーザリモートセンシング法¹⁾および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などが挙げられる。1 番目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る。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。2 番目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、基本的に金属面の検査に適した手法である。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困難である。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。

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。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²⁻¹³⁾。

一方で、地下発電所の空洞内の吹付けコンクリートでは、堀削時および経年変化によるひび割れの発生や小規模の表面剥離が確認されている。安全のために、天井部のひび割れに対しては天井クレーンを利用した定期的な打音点検を実施している例もあるが、足場等の構築無しでは直接打撃が困難となっているため、遠距離非接触で実施できる点検法の開発が求められている。しかしながら、地下大空洞内の吹付けコンクリートは、従来用いてきた一般的なコンクリート供試体や実コンクリート構造物とは表面状態が大きく異なり、表面の不陸がかなり大きい。すなわち、加振力およびレーザ戻り光が安定しないなどの影響により計測が安定しない可能性が考えられた。そのため、吹付けコンクリートの欠陥探査に対する非接触音響探査法の適用性を検討するために、東京電力ホールディングス(株)の既設の地下発電所空洞内の側壁を対象とした検証実験を実施した。

2. 非接触音響探査法の概要

2.1 基本セットアップ

非接触音響探査法の基本構成を図-1 に示す。音源としては LRAD もしくは強力超音波音源¹⁰⁾等を使用し、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スキャニング振動計(SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer)もしくは 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

*1 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科教授 博士(工学) (正会員)

*2 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科客員研究員 博士(工学)

*3 佐藤工業株式会社 技術研究所 主任研究員

*4 東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所 土木・建築エンジニアリングセンター 博士(工学)

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。そのため本手法では、音波照射加振を用いたたわみ共振現象を発生させることにより、打音法と同じたわみ振動を発生させ、計測対象の表面近くに存在する欠陥を検出することができる。

2.2 音波送信方法

前節に述べたように、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パースト波、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パースト波などが考案された^{4),5)}。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一度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マルチトーンパースト波が適していると言える。なお、周波数を多く含んでいるという意味だけを考えてみると白色雑音やチャープ波の方が最適に思われるが、そのような波形を実際に使用してみると、結果的に計測される振動速度の S/N 比が劇的に低下してしまうという問題が明らかになっている。これは送信信号に含まれる特定のたわみ共振周波数成分が少ないために、効率的な励振が出来ていないことを示していると思われる。

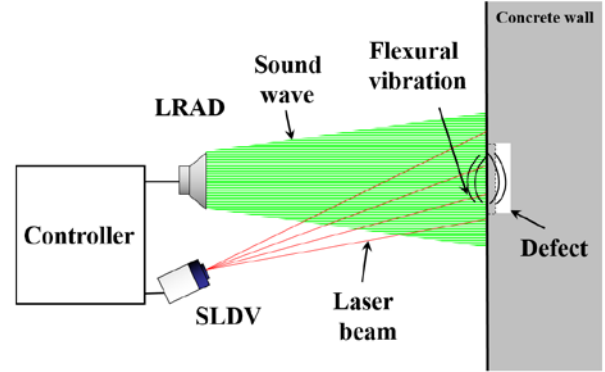


図-1 非接触音響探査の基本構成図

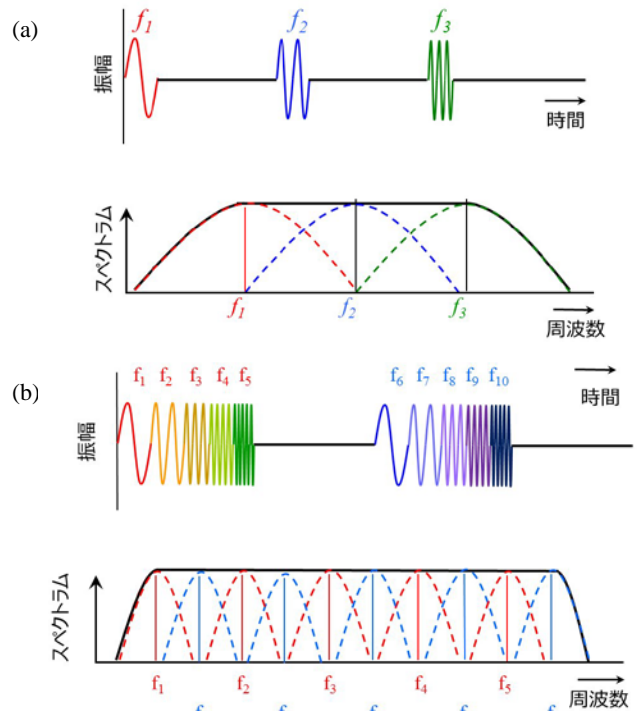


図-2 トーンパースト波の模式図

(a) シングルトーンパースト波, (b) マルチトーンパースト波

3. 吹付けコンクリートに対する適用性実験

3.1 調査箇所について¹⁴⁾

本研究における吹付けコンクリートの調査箇所は、神流川発電所内の地下大空洞である。この空洞は、最大断面部で高さ 51.4 m、幅 33 m、断面積 1,400 m²の卵型空洞であり、主要な岩盤補強工は PS アンカーおよび吹付けコンクリートである。今回は、あくまでも非接触音響探査法の吹付けコンクリートに対する適用性の確認のため、最初から天井部を計測するのではなく、従来の点検手法

前の打音点検により欠陥ありと判定された場所が選ばれており、ここでは調査箇所 A,B のように呼称して区別する。なお、調査箇所 A は厚さ 24 cm(8cm×3層)で、第2層のみプレーン、それ以外は SFRC (鋼繊維補強)、調査箇所 B は厚さ 32cm (8cm×4層)で第3層のみプレーン、それ以外は SFRC となっている。参考のために地下大空洞建設時の吹付けコンクリート配合表を表-1 に示す。との比較が容易な側壁部で実験を行った。調査箇所は事

表-1 神流川発電所地下大空洞で用いられた吹付けコンクリートの配合表

	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	スチールファイバー E	混和剤 A
SFRC	15	18	58.2	69	221	380	1187	537	80	5.20
プレーン	15	12	58.3	65	204	350	1179	641	—	3.15

3.2 実験に使用した機材と波形等について

今回の実験で使用した主な機材は、音源としてはLRAD (LRAD Corp.), LDVとしてはRSV-150 (半導体レーザー, 1550 nm, 10 mW, Polytec Corp.) およびPSV-400-H4 (He-Ne レーザ, 633 nm, 1 mW, Polytec Corp.)を使用した。PSV-400-H4は面的なスキャンが可能なスキャンング振動計であるが、レーザー出力と波長の関係でRSV-150の方がコンクリート面の計測には優れている。そのため、PSV-400-H4の面的スキャン時に、RSV-150を手動で追従させることにより、RSV-150による面的スキャンデータも同時に取得している。

計測用の送信波としては周波数範囲 300~5,000 Hz, パルス長 5 ms, インターバルタイム 50 ms, 複数の周波数を使用するマルチトーンバースト波を用いた。また、計測対象面の音圧は約 100 dB (2 Pa) 程度とし、5 回平均/ポイントで計測した。また、比較検証を目的として、一般的な打音検査に加えて、打撃音定量評価手法であるインパクトハンマーとフード付マイクロホンを用いた振幅値比法¹⁵⁾による計測も併せて実施した。なお、計測間隔はどちらも 10 cm 程度を採用している。

3.3 実験結果¹⁶⁾

(1) 調査箇所 A

調査箇所Aにおける離隔5 m時の非接触音響探査法の実験セットアップを図-3に、計測範囲写真を図-4に示す。計測範囲は50×50 cm², 計測ポイント数は9×9の81ポイントに設定した。なお、白枠はPSV-400-H4のスキャンエリア、交点はスキャンポイント位置を示している。調査箇所Aにおける時間&周波数ゲート処理後の振動速度スペクトル例を図-5に示す。計測位置は測定領域の中央である(図-3中の白○と白×部、欠陥部、健全部に対応)。図より1 kHz付近に吹付けコンクリート欠陥部の共振と推定される振動速度ピークが検出されていることがわかる。図-6に既存手法による欠陥判定として、打音検査の結果、および振幅値比法による欠陥深さ推定の結果を示す(目視できる表面亀裂も黒い実線として描かれている、以降の図も同様)。打音検査結果はハンマーで叩いた音を検査者が判断して欠陥、不明瞭および健全

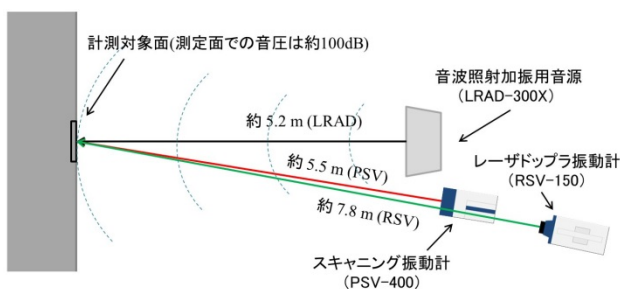


図-3 調査箇所Aにおける実験セットアップ

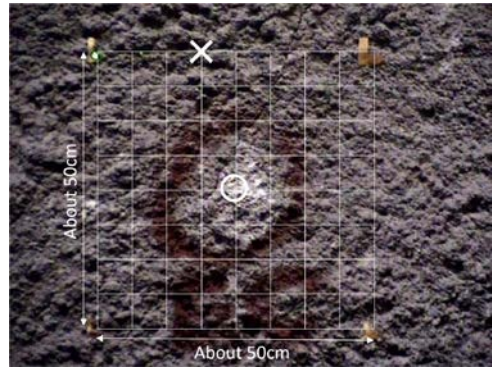


図-4 調査箇所Aの写真

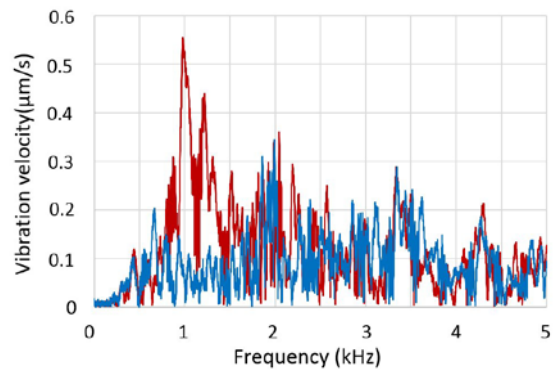


図-5 調査箇所Aの振動速度スペクトル

(赤線：図-4 白○部, 青線：図-4 白×部)

の3つに分類する手法を複数回実施することにより平均化処理を行ってマッピングしたものである。また、非接触音響探査法による欠陥検出結果例として図-7に最大振動速度を示す978.8Hzにおける振動速度分布図および最大振動速度を示す周波数を含む100Hz帯域を積分した場合の振動エネルギー比の分布を示す。どの図でも共通して、測定領域の中央部および中央部から左下にかけての領域での振動エネルギーが大きいことが見て取れる。

(2) 調査箇所 B

調査箇所Bにおける実験セットアップ図を図-8に示す。計測対象面から約5.1 mの位置に、出来るだけ音波が垂直に当たるように音源であるLRAD-300Xを設置した。さらに、計測用のレーザードップラ振動計としてRSV-150を計測対象面から約6.9 mの位置に配置した。図-9に計測範囲および実験風景の写真を示す。計測範囲は約50×50 cm²で、中央上部から左上部にかけて吹付けコンクリートの欠陥(浮き)が確認されている。計測ポイント数は9×9の81ポイントに設定した。なお、白枠交点がLDVによる計測位置を示している。調査箇所におけるゲート処理後の振動速度スペクトル例を図-10に示す。計測位置は図-9中の、吹付けコンクリートの欠陥(浮き)が確認されている白丸部である。図より930 Hz付近に吹付けコンクリート欠陥部のたわみ共振周波数と推定される振動速度ピークが検出されている。なお1.9 kHz付近にある

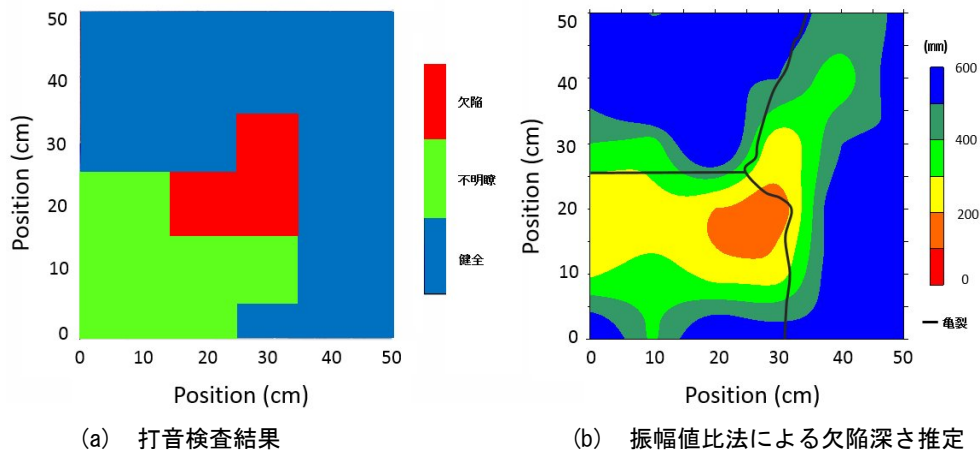


図-6 既存手法による欠陥判定

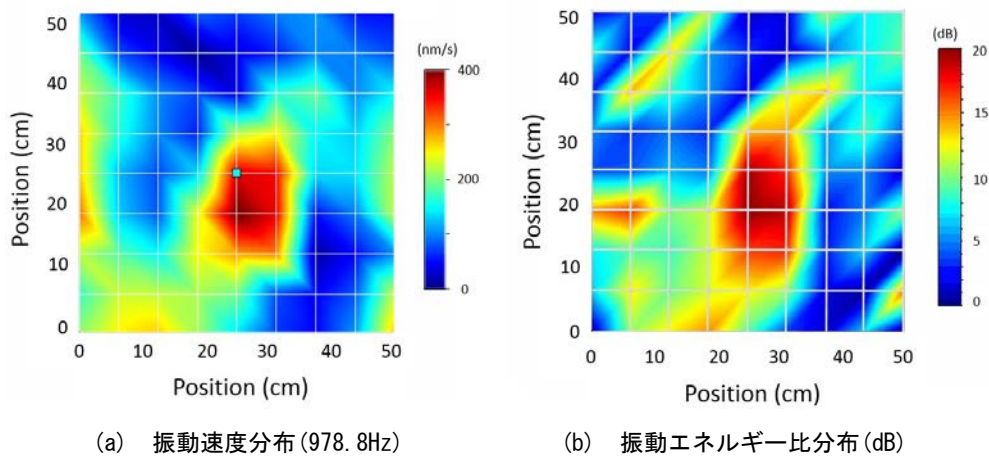


図-7 非接触音響探査法による欠陥判定

ピークは事前の室内実験より計測用 LDV である RSV-150 のレーザヘッドの共振周波数であることが判明している。

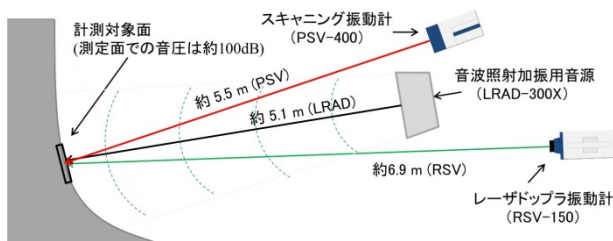


図-8 調査箇所Bにおける実験セットアップ

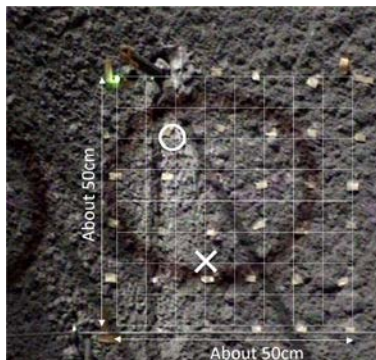


図-9 調査箇所 B の写真

図-11 に打音検査の結果、および振幅値比による欠陥深さ推定の結果を示す。いずれも、計測範囲の中央上部から左上部に欠陥が存在することが確認された。また、非接触音響探査法による欠陥検出結果例として図-12 に、最大振動速度を示す932.7Hzにおける振動速度分布図および最大振動速度を示す周波数を含む100Hz帯域(900~1000Hz)を積分した場合の振動エネルギー比の分布を示す。音響探査法による振動速度分布、振動エネルギー比分布は、いずれも計測範囲の中央上部から左上部において大きな値となり、従来法の結果と一致した。

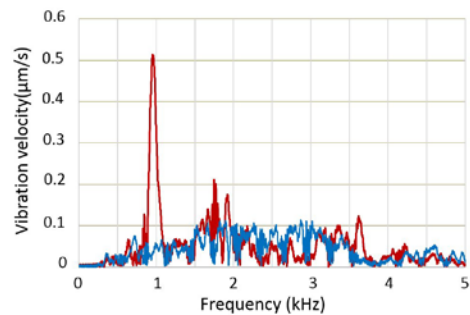


図-10 調査箇所Bの振動速度スペクトル
(赤線：図-9 白○部，青線：図-9 白×部)

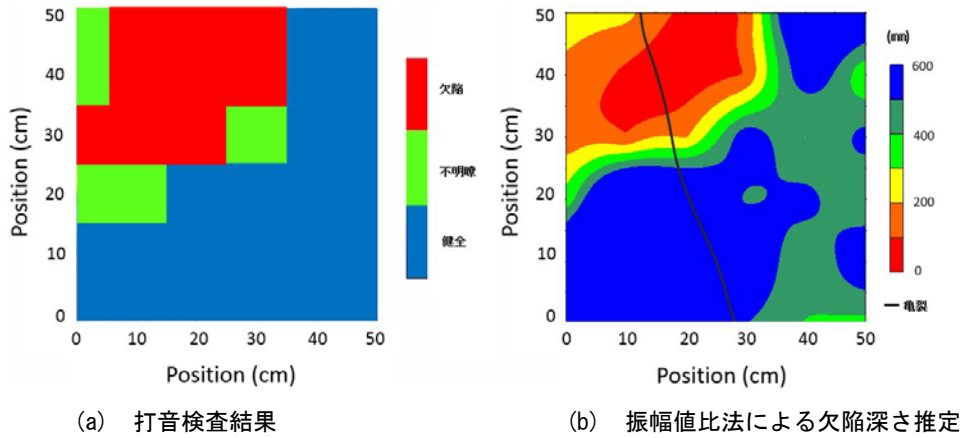


図-11 既存手法による欠陥判定

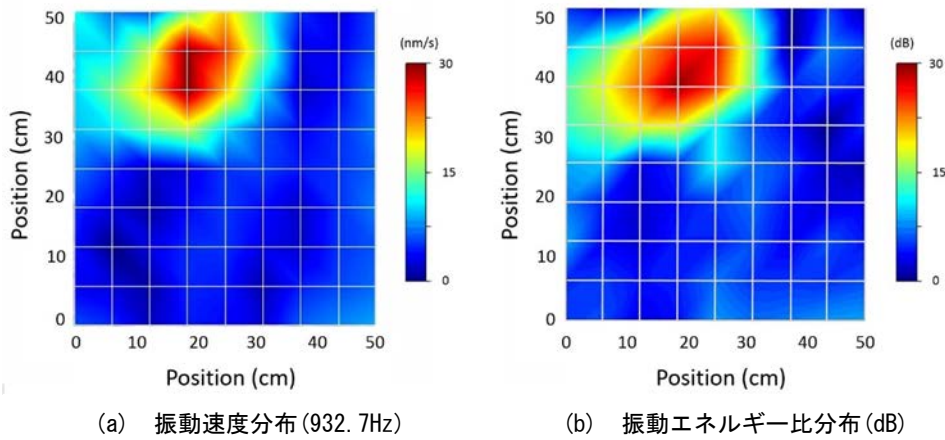


図-12 非接触音響探査法による欠陥判定

これらは、既存手法により確認された吹付けコンクリートの欠陥箇所とよく整合していることがわかる。

(3) 打音検査を基準とした正答率

前節の検討により得られた非接触音響探査法による振動エネルギー比分布の結果に対して打音検査法による探査結果を基準とする判定結果の正答率を算出した。算出方法としては、以下のような手順を用いた。最初に、打音検査位置とレーザ計測位置が異なるため、打音検査位置における振動エネルギー比を、近傍のレーザ計測位置からの距離の逆数を重みとした重み付き平均による内挿法を用いて算出した。次に、振動エネルギー比による浮き・剥離判定として閾値を調査箇所毎に決め、打音検査の結果と比較し、打音検査で「健全」以外に判定されている場合に、本手法における振動エネルギー比が、設定した閾値を越えた場合のみを正解とし、調査箇所毎の全計測点に対する正解の数の割合を「正答率」と定義した。また、吹付けコンクリートの表面は通常のコンクリート構造物と比べて凹凸が大きく、打撃による表面劣化状態も場所により異なっていた。調査箇所毎に健全部における振動速度の平均値も大きく異なっていたため、各調査箇所における振動エネルギー比の平均値+2dB程度を、その調査箇所における閾値として使用した。結果を

表-2に示す。表より、平均で87.5%の正答率であり、打音検査法とほぼ整合する結果が得られていることがわかる。吹付けコンクリート健全部の音響振動特性に関する十分な知見がまだ得られていないことや、表面状態に起因したノイズ等がまだ十分に除去できていないことを考慮すると、今後、非接触音響探査法を用いた吹付けコンクリートに対する欠陥判定基準を明確にすることができれば、さらに高い判定率での欠陥判定が可能になることが予想される。

表-2 打音検査法を基準とした正答率

調査箇所	A	B	平均
振動エネルギー比の平均値(dB)	7.8	10.7	-
使用した閾値(dB)	10	13	-
正答率 (%)	89	86	87.5

4 まとめと今後の課題

非接触音響探査法の吹付けコンクリート面に対する適用性について確認するために、既設地下発電所空洞内の側壁の3箇所吹付けコンクリートに対して検証実験を行った。事前の予測としては、吹付けコンクリートの不陸の度合いによっては、加振力およびレーザ戻り光が

安定しないなどの影響により計測が安定しない可能性が考えられた。しかしながら、非接触音響探査法による欠陥判定結果は、どの箇所においても既存の打音検査等による欠陥判定結果とほぼ整合しており、遠距離から非接触計測が可能という特長を持つ本手法の吹付けコンクリートに対する適用についての見通しを得ることができた。今後は、実用化に向けて、離隔を変化させた場合の影響確認、振動エネルギー比算定のための積分範囲の合理的な設定方法、現場点検への適用可能性等について、更に検討を加える必要がある。

参考文献

- 1) 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), pp519-524, 2012.10
- 2) T.Sugimoto, R.Akamatsu, N.Utagawa and S.Tusjino : Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Non Destructive Inspection using SLDV and LRAD, Proc. IEEE IUS, pp.744-747, 2011.10
- 3) 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
- 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, Proc. IEEE IUS., pp.1303-1306, 2013.7
- 5) 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, 2014.7
- 6) 杉本恒美, 赤松亮, 歌川紀之, 片倉景義: コンクリート非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2062-2067, 2014.7
- 7) 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, 2014.11
- 8) 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, 2015.7
- 9) 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, コンクリート工学会年次論文集 pp.1753-1758, 2015.7
- 10) 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, 2015, pp.398-401, 2015.9
- 11) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 片倉景義: 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の検討, コンクリート工学会年次論文集 pp.2103-2108, 2016.6
- 12) Tsuneyoshi Sugimoto, Kazuko Sugimoto, Noriyuki Utagawa, Kageyoshi Katakura : High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave, *Jpn. J. Appl. Phys.*,Vol.56, 07JC10, 2017.7
- 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, 2017.7
- 14) 甲斐郁寛, 唐澤卓己, 杉崎直人: 大断面空洞における吹付けコンクリートの打音測定および周波数分析を用いた保守管理手法について, トンネル工学報告集, 第24巻, I-8, pp.1-6, 2014.11
- 15) 歌川紀之, 御崎哲一, :トンネル覆工コンクリート診断, 一打音法及び非接触診断技術一, 日本音響学会誌 69巻3号, pp127-132, 2013.3
- 16) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 黒田千歳, 金子岳夫, 森岡宏之, 志岐仁成, 中川貴之: 地下大空洞内の吹付けコンクリートに対する非接触音響探査法の適用性検討, トンネル工学報告集, 第27巻, I-8, pp.1-10, 2017.11