

音響探査法を用いたコンクリート表層の欠陥探査

－移動測定の試み－

Defect exploration of concrete surface layer using acoustic inspection method - Test of moving detection -

キーワード

非破壊検査, 音響探査法, 移動測定,
浮き・剥離

歌川 紀之*, 黒田 千歳*, 二瓶靖和**

杉本和子***, 杉本恒美***

研究概要

これまで音響探査法を用いたコンクリート表層部の浮き剥離欠陥の検査を実施してきた。音響探査法はコンクリート表層から離れた場所で測定ができるため、足場や高所作業車を用いずに、トンネル覆工の天端部や橋梁床版の背面の調査が可能である。しかし、実構造物の調査において、一か所に測定器を配置した測定では、調査範囲が限定されるので、移動しながら測定する方法が求められていた。そこで、本研究ではスピーカと複数のレーザドップラ振動計を一体化し、それを台車に載せたシステムを延長方向に走らせることで音響探査法を実施した。速度 1km/h 程度の走行時に、得られたデータに対しノイズを軽減する処理を用いることにより、円形空洞（φ300-40, 60）の有無を検知できることが分かった。

ABSTRACT

Acoustic inspection method for concrete surface layer have been applying to detect imperfection of concrete surface. The acoustic survey method can be applied for un-contact and keeping distance to concrete surface. So, it has been applying for tunnel crown part and underneath of bridge deck slab, etc. However, to carry out actual concrete structures, measuring instruments is only set one position for measurement, it is limited to measure the inspection area. Thus, self-moving measuring instruments was demanding. Therefore, system is that a speaker and multiple laser Doppler vibrometers were combined and mounted on bogie. Then, the measuring was carried out passing the bogie to measuring direction. The surveyed result was that circular shape void (φ300-depth40mm and 60mm) which is mounted in the concrete could be detected as applying noise reduction processing to measurement data while the bogie passing speed as 1 km/h.

1 目的

著者らは、非接触音響探査法により打音法の代替となる技術の開発を進めてきた¹⁾⁻¹²⁾。音響探査法は、スピーカで加振を行い、その振動をレーザドップラ振動計で測定することにより、コンクリート表層の欠陥を抽出する手法であり、従来の打音法とは異なり、構造物に近づかずに検査ができるため、足場や高所作業車を使わないで、離れた位置からの点検が可能となる。そのため、検査効率率は向上する。ただし、トンネルや橋梁など長さがある構造物については、限定された範囲を超える場合にレーザドップラ振動計やスピーカを延長方向に盛替えをしながらの検査となるため、検査時間がかかることになる。例えば、地下発電所の

天端部の延長方向10m×円周方向15mの領域の測定では盛替えは円周方向3回、延長方向5回で15回となり、1日程度の時間がかかることが分かっている。機器の盛替えの配置例を図-1に示す。

そこで、ここでは、スピーカおよびレーザドップラ振動計を停止せずに移動させながら測定する方法（移動測定）を検討した。

本研究では、円形空洞の試験体に対し、レーザドップラ振動計 LDV (Laser Doppler Vivrometer) を数台と加振用スピーカを1台、台車に搭載し、台車を1~2km/hのスピードで移動させながら、「移動測定」を行い、相互相関関数を用いたデータ処理を行い、欠陥の検知が可能であるかを検討した。

* 技術センター 土木研究部, ** 富士フィルム株式会社, *** 桐蔭横浜大学

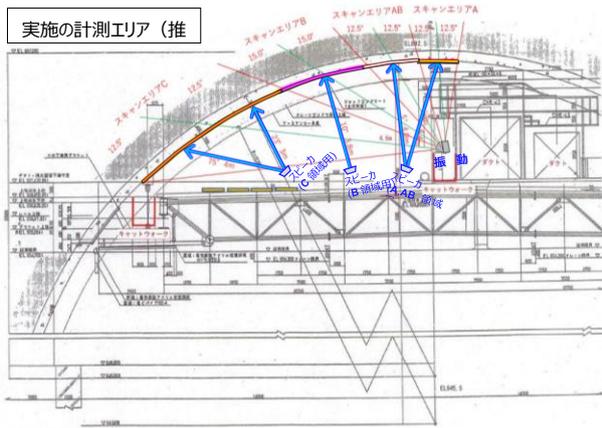


図-1 システムの盛替え（地下発電所天端の吹付面の事例）

2 音響探査法の広領域測定への適用

現地で実構造物を対象に、打音調査を行う場合、広い範囲をまんべんなく検査するケース（浮き、剥離によるコンクリート片の落下を防止する）と限られた狭い範囲を詳細に検査するケース（過去の検査で浮き、剥離がみられ、それを監視する）が考えられる。従来の音響探査法では、スキャン機能をもつレーザードップラ振動計 SLDV（Scanning Laser Doppler Vivrometer）を用いることにより、限定された範囲を詳細に調査することは可能となる。一方、広い範囲、例えばトンネル覆工などを対象とした場合、覆工までの距離（トンネルの大きさ）にもよるが、延長方向にも円周方向にも盛替えが必要となり、足場の設置はないものの検査速度という観点では時間がかかる作業となる。一方、打音検査と同時に行われるトンネル覆工の目視検査の高速化という観点では、ビデオ撮影技術を用いて、円周方向にカメラを配置した車を走らせながら、全断面の撮影を行い、それをトンネル展開図に変換する技術が実施されている。

音響探査法をこのような広範囲（特にトンネルのように延長方向が長い）の検査に用いるために、スピーカと LDV を1対のシステムと考え、検査面と平行に移動させながら、測定する移動方式を考えた。スキャン方式に用いる SLDV では、測定点を移動（例えば格子状に）するため、レーザの方向をミラーで制御しており、ミラーの振動がノイズの原因の一つになっていた。移動方式、スキャン方式、混合方式との違いを表-1に示す。スキャン方式と混合方式のシステム例を図-2、3に示す。なお、混合方式は、構想されプロトタイプは作られたものの実現されていない。

3 移動測定実験セットアップ

移動方式を確かめるため、検査面（欠陥を有するコンクリート壁面）に平行にスピーカ（LRAD-100X, Genasys Inc.）と LDV（VGO-200, Polytec GmbH）4台を同時に動かしながら測定することとした。図-4にセットアップの模式図、

表-1 3方式の比較

	概要	適用事例	長所	短所
移動方式 図-4	スピーカと LDV 数を1対のシステムと考え、移動させながら測定を行う。	トンネルの延長方向の測定	広範囲の測定が LDV を数台用意すると、可能	レーザ光に入ってくるノイズの影響が大きい。
スキャン方式 図-2	スピーカによる加力範囲を SLDV で測定する。スピーカについては UAV など移動させる可能性はあるが、SLDV は移動させない。	トンネルや橋梁の一部の測定	SLDV の測定範囲、スピーカの加力範囲であれば、その領域を細かく測定することができ、小さな剥離を見つけることも可能	広範囲の測定に限界がある
混合方式 図-3	円周方向に移動させながら、スキャン方式の測定を行う	トンネル目地部などの円周方向の測定	移動方式とスキャン方式のメリットを兼ね備える。	トンネル延長方向の測定では盛替えが必要。



図-2 スキャン方式（SLDV と LRAD の組み合わせ）橋梁床版の測定事例⁷⁾



図-3 混合方式（SLDV と LRAD を回転させる）

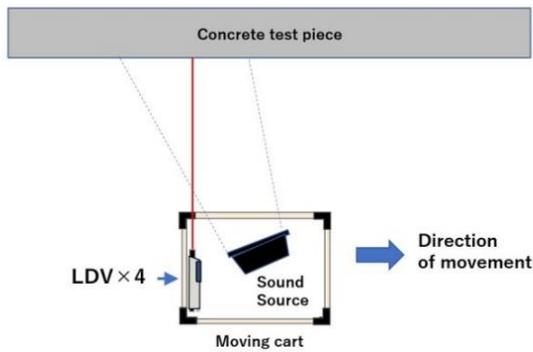


図-4 実験セットアップ (平面図)

図-5に組み立てられた LRAD と LDV からなる測定システムを示す。測定システムは台車の上にフレームを組んで、LRAD と LDV を配置した。LRAD からの振動により LDV が振動しないように LRAD をフレームにゴムで支持し、LDV はスピーカフレームと独立させた。台車はレールの上を一定速度で動かすものとする。今回は、測定区間で一定の速度(1.01,1.59,2.08km/h)となるように人力で移動させた。なお、この速度はレーザー距離計で測定された。

試験体については、図-6に示す円形空洞欠陥試験体(1500mm×2000mm×300mm)を用いた。20個の欠陥のうち、深さ40mm, 60mm, 80mmの位置に、厚さ25mmの発泡スチロールの円形板(φ300)を配置させた3種類の空洞欠陥試験体を検査対象とした。図に示すように3つの空洞欠陥試験体はほぼ平行な位置に配置されており、4台のLDVのうち、1台のレーザーは健全部に残りの3台は欠陥上を平行に移動するように配置した。4台のレーザーの間隔は10cmである。

LRAD で発生させた加振波形を図-7に示す。コンクリート表面で120dB に設定し、周波数範囲500-4100Hz のマルチトーンバースト波でパルス幅3msec, 周波数インターバル200Hz, 波形全体長さ59msec を用いた。

音響探査法は、打音法と異なりコンクリート面を局部的に振動させる方法ではなく、面的に振動させる方法である。また、打音法のように1波目で評価するのではなく、波全体に着目し、その周波数応答に着目している。

4 移動測定におけるデータ処理方法

移動方式では、LRAD, LDV が動いているため、ある測定点に着目すると、スピーカから発生する信号(周波数)が十分に長く継続しておらず、振動は生じにくく、ノイズも大きく欠陥の振動を捉えることが難しい。得られた振動を図-8に示す。そこで、図-9示すような信号処理を行った¹³⁾。

- ① 500Hz のトーンバースト (20msec) を 120msec ごとに 3 回発生させたトリプルトーンバースト波 (図-9(b)-1) と測定結果全区間 (図-9(a)) を乗じて、積分することにより各時間の相互相関関数 $C_{12}(t, 500\text{Hz})$ (図-9(c)-1) を求める。

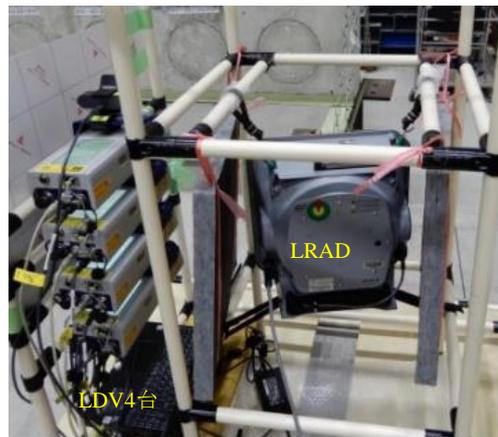


図-5 LRAD と LDV を台車の上に組んだ状況

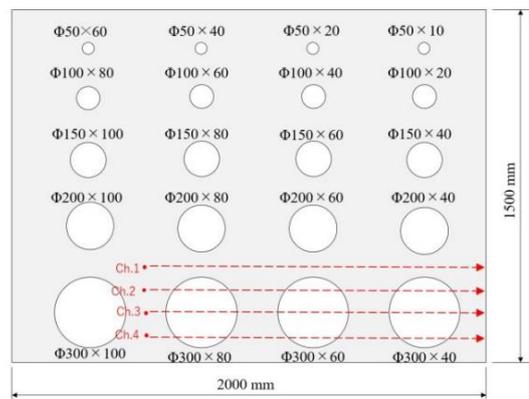


図-6 対象とした試験体と LDV のレーザー通過位置

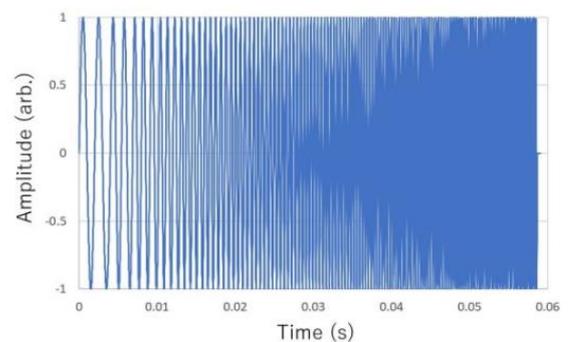


図-7 加振波形 (500~4100Hz のバースト波)

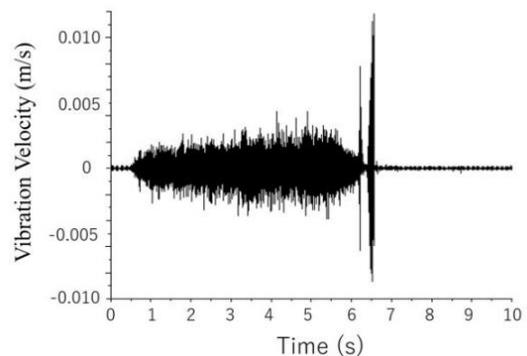


図-8 $v=0.28\text{m/sec}(1.01\text{km/h})$ で移動しながら LDV で測定された波

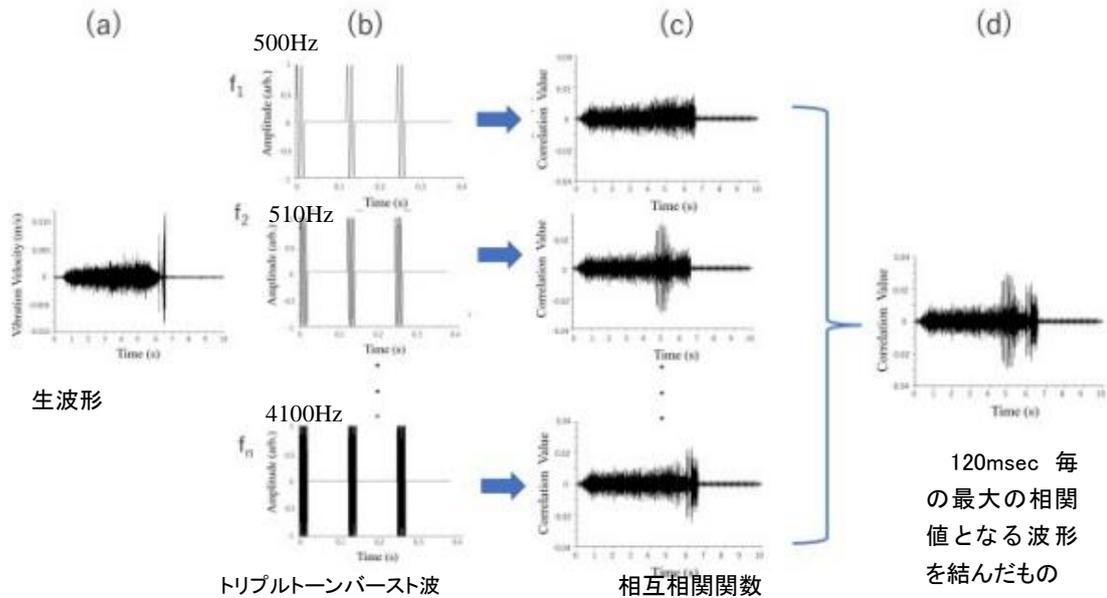


図-9 相互相関関数を用いたデータ処理方法

$$C_{12}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_1(t+t_0)\phi_2(t_0)dt_0 \quad (1)$$

トーンバースト波の周波数を 510Hz にし、①と同様な処理を行い、相互相関関数 $C_{12}(t, 510\text{Hz})$ (図-9(c)-2) を求める。

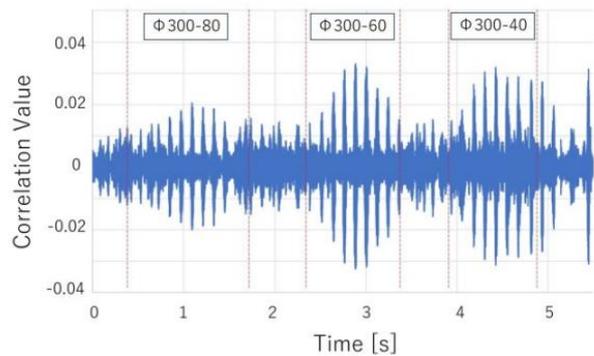
- ② 同様に 4100Hz まで繰り返す。 $C_{12}(t, 4600\text{Hz})$ (図-9(c)-N)
- ③ 送波間隔毎 (今回は 120ms 毎としている) に最大の相関値を示す周波数の相関波形を採用していき、映像化に使用するための相関波形を合成する (図-9(d))。

得られた図-10から、欠陥部に対応した相互相関関数の固有周波数の振動が大きくなっており、周波数帯を選ぶことにより、相互相関関数の空間的な分布から欠陥位置を抽出することができることがわかる。

また、120msec 間 (3.4cm) の相互相関関数の周波数ごとの平均値の最大値の周波数 (図-11) に着目すると、欠陥部 (直径30cm) で連続的に特定の固有周波数で振動している (図中1秒は28cm の距離を表す) ことが分かる。ただし、これは、振動の大きさを示していることにはならず、より、特定の周波数 (例えば固有周波数) に近いことを示している。欠陥と健全を区別するという目的で、欠陥部の固有周波数が分かっている場合は、このような方法で、固有振動をしている箇所を抽出する方法も考えられる。

5 移動測定結果

台車の速度は1.01km/h, 1.59km/h, 2.08km/h の3段階に変化させた。4台の LDV の振動測定結果 (加振波形) とトリプルバースト波から、相互相関関数を求め、120msec ごとの最大の相関値の波形の2乗値を映像化した結果を図-12



1秒は28cmの長さに対応

図-10 相互相関処理を用いて得られた波形

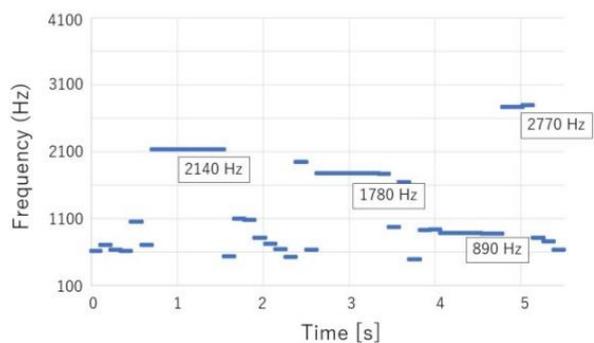
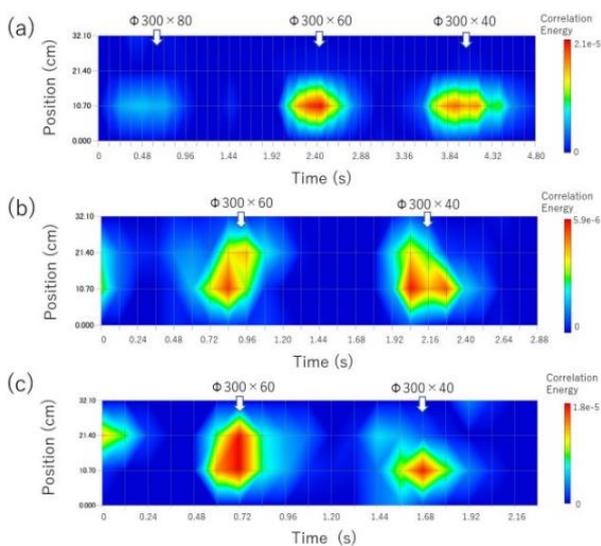


図-11 120msec 間の相互相関関数の平均値が最大となる周波数

に示す。ここでは周波数領域を820~920Hz, 1730~1830Hz, 2080~2180Hz, 2740~2840Hz に限定した。これらの結果から、1~2km/h の移動計測で、φ 300-40, φ 300-60の欠陥については検知することが可能であることが分かった。



(a)移動速度 0.28m/sec(1.01km/h)

(b)移動速度 0.44m/sec(1.59km/h)

(c)移動速度 0.58msec(2.08km/h)

図-12 測定結果

6 まとめ

音響探査法の移動計測の可能性について検討した。その結果、直径300mmの深さ40mm、60mmの空洞欠陥については、相互相関関数処理を用いることにより、速度1～2km/hの移動計測が可能であることが分かった。

今後、ソフト、ハードのノイズ対策を検討して、性能向上を目指す予定である。

参考文献

- 1) 歌川紀之, 赤松亮, 杉本恒美: 音響探査法を用いたコンクリート構造物の健全性評価, 佐藤工業技術研究所報, No.36, pp.15-20, 2011.
- 2) 歌川紀之, 片倉景義, 赤松亮, 杉本恒美: 音響探査法を用いたコンクリート構造物の健全性評価(2), 佐藤工業技術研究所報, No.37, pp.13-18, 2012.
- 3) 歌川紀之, 片倉景義, 赤松亮, 杉本恒美: 音響探査法を用いたコンクリート構造物の健全性評価(3)—トーンバースト波とタイムゲートを用いたS/N比の改善—, 佐藤工業技術研究所報, No.38, pp.15-22, 2013.

- 4) 歌川紀之, 片倉景義, 赤松亮, 杉本恒美: 音響探査法を用いたコンクリート構造物の健全性評価(4)—現地構造物への適用—, 佐藤工業技術研究所報, No.39, pp.7-12, 2014.
- 5) 歌川紀之, 黒田千歳, 前田幸男, 片倉景義, 上地樹, 杉本和子, 杉本恒美: 音響探査法を用いたコンクリート構造物の健全性評価(5)—強力超音波音源の適用—, 佐藤工業技術研究所報, No.40, pp.5-10, 2015.
- 6) 歌川紀之, 黒田千歳, 前田幸男, 上地樹, 小菅信章, 杉本和子, 杉本恒美: 音響探査法を用いたコンクリート構造物の健全性評価(6)—マルチトーンバースト波を用いた高速非接触音響探査—, 佐藤工業技術研究所報, No.41, pp.9-13, 2016.
- 7) 歌川紀之, 黒田千歳, 前田幸男, 上地樹, 小菅信章, 杉本和子, 杉本恒美, 川上明彦: 非接触音響探査法を用いたコンクリート構造物の健全性評価(7), 佐藤工業技術研究所報, No.42, pp.1-6, 2017.
- 8) 歌川紀之, 黒田千歳, 上地樹, 杉本和子, 杉本恒美, 森岡宏之: 非接触音響探査法を用いたコンクリート構造物の健全性評価(8)—地下発電所吹付コンクリート覆工への適用—, 佐藤工業技術研究所報, No.43, pp.28-36, 2018.
- 9) 歌川紀之, 黒田千歳, 上地樹, 杉本和子, 杉本恒美: 非接触音響探査法を用いたコンクリート構造物の健全性評価(9)—UAVを用いた音響探査法による構造物外壁の調査—, 佐藤工業技術研究所報, No.44, pp.21-26, 2019.
- 10) 歌川紀之, 黒田千歳, 上地樹, 杉本和子, 杉本恒美, 森岡宏之: 非接触音響探査法を用いたコンクリート構造物の健全性評価(10)—地下発電所吹付コンクリート覆工への適用(2)—, 佐藤工業技術研究所報, No.45, pp.1-7, 2020.
- 11) 歌川紀之, 黒田千歳, 上地樹, 杉本和子, 中川裕, 高木均, 坂本憲昭, 杉本恒美: 非接触音響探査法を用いた地表面探査技術に関する研究—探査原理に関する基礎実験—, 佐藤工業技術研究所報, No.46, pp.51-56, 2021.
- 12) 歌川紀之, 黒田千歳, 杉本和子, 杉本恒美: 音響探査法の吹付コンクリート構造物への適用, 佐藤工業技術研究所報, No.47, pp.7-12, 2022.
- 13) 日野幹雄: スペクトル解析新装版, 朝倉書店, 2010.