

強力超音波音源を用いた音響探査技術の開発

歌川紀之・黒田千歳・杉本恒美

トンネルや橋梁の点検の際、目視点検や叩き点検が実施される。これらの点検を実施するためには、高所作業車や足場が必要となることや交通規制も必要となる場合もある。また、叩き点検の評価は検査者の主観に頼られることが多かった。音響探査技術を用いることにより叩き点検を離れた場所から実施可能となり、道路トンネルで路面上からトンネル天端の調査が可能となる。さらに、評価ではデジタルデータが用いられ、客観的に欠陥位置の判別がなされるというメリットがある。

キーワード：非破壊検査法、浮き・はく離、トンネル覆工、叩き点検、打音法

1. はじめに

叩き点検を離れた位置から非接触で実施できる「音響探査法」に着目し、開発を進めてきた。本報告ではこれまで用いてきた音源（LRAD：Long Range Acoustic Device）に比較し、指向性が強い強力超音波音源（UNAS：Ultrasonic Nonlinear Acoustic Speaker）を開発し、それを音響探査法へ適用した結果を示す。UNASは、LRADに比較し、探査時の騒音が小さくなること、斜めからの測定、例えば、壁・柱構造の上部を地上から測定する場合の探査範囲が広がることなどのメリットがある。

音響探査法による橋梁桁下面のはく離探査の状況を写真-1に示す。桁下面を地上部にあるスピーカーLRADで発生させた音波により加振し、その振動分布をレーザードプラ振動計SLDVにより測定分析することにより、地上部からコンクリートの浮きや空洞を探査する。一方、従来の叩き点検では、高所作業車に乗った点検員が桁下面をハンマーにより打撃し、発生した振動音を検査者が音で聴き、コンクリートの浮きや空洞位置を調べる。音響探査法が開発されれば、地上部からの探査が可能となるため、高所作業車からの上向きの作業は解消される。また、客観的な評価が可能となり、定量的な探査結果が得られる。本技術開発は、国土交通省の平成22～25年度の「道路政策の質の向上に資する技術研究開発 <http://www.mlitt.go.jp/road/tech/jigo.html>」の支援を受け、桐蔭横浜大学、明篤技研、当社の3者で実施されてきた。

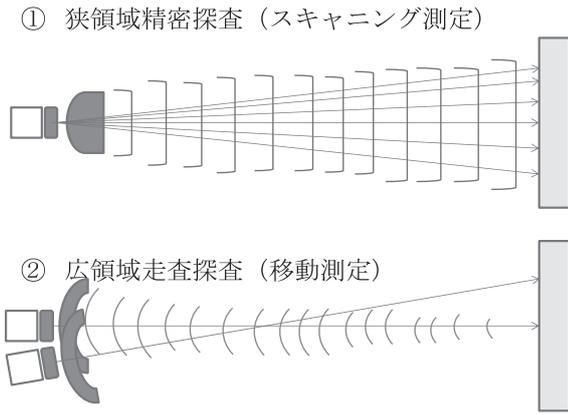
これまで、探査性能（探査距離（探査面と測定機の



写真-1 音響探査法を用いた橋梁桁下面のはく離探査
N2Uブリッジ（名古屋大学）

距離）、探査角度（探査面と測定機のなす角度）、探査可能な欠陥（欠陥までの深さ、広さ、はく離の幅など）を調べるとともに、探査性能の影響を与えるノイズの抑制技術、欠陥評価技術の開発を進めており、現地の橋りょう床版やボックスカルバート、トンネル覆工の探査への適用性を調べてきた^{1)～5)}。その結果、従来の叩き点検と同様な探査性能を有し、5m以上離れた位置からの探査が可能であることが分かり、現在は、ここで示す強力超音波音源の開発、自動化・高速化の検討や適用範囲の拡大などを検討している。

本報告では、新しい強力超音波音源 UNAS の開発



図一 音響探査システム



写真一 UNAS と LDV からなるシステム

とそれを利用した探査について報告する。図一に示すように、これまで

- ①距離音響発生装置 LRAD とスキャニングレーザードプラー振動計 SLDV からなるシステム (狭領域精密探査)

を用いて、面的な探査を実施してきた。

現地における測定を考えると、広い範囲を粗い測定点で探査するニーズがあり、SLDV を用いると測定点の密度を細かくすることは可能であるが、探査領域を広くすることは難しく、LRAD や SLDV の向きや配置を変更することで対応してきた。そこで、レーザーのスキャニングに頼らない、

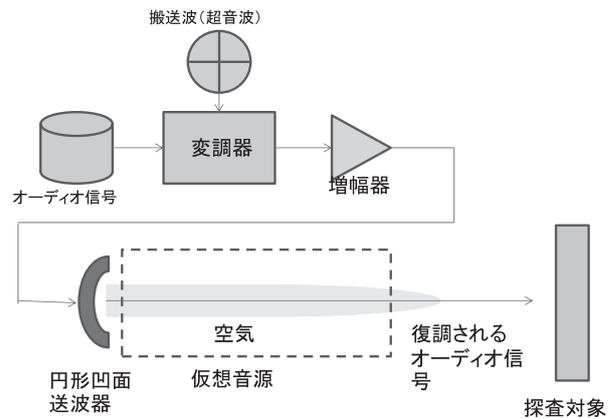
②強力超音波音源 UNAS とシングルレーザードプラー振動計 LDV からシステム (広領域走査探査) の開発に着手した。開発したシステムでは音源と LDV を同時に移動させて、広い領域の測定を行う。UNAS のメリットは、(1) 音波を測定点に集束させるため、周辺への影響が小さくなること、(2) 平面波でないため、平面波が持つ斜め入射に起因する干渉による、加力の面的なむらが生じないことである。その結果、後述するように、垂直の壁構造でも高い範囲の測定が可能となる。

2. 強力超音波音源 UNAS を用いた音響探査法

本章では、UNAS の原理、本音源を用い形成された音場、斜め入射の影響、測定システムの概要を示す。

(1) UNAS の原理

UNAS は、超指向性スピーカ⁷⁾ (パラメトリックスピーカ) と呼ばれるもので、3,200 個の超音波素子からなる円形凹面送波器 (直径 60 cm, 焦点距離 (曲率半径) 5 m) である。ここで作成した UNAS を写真一に示し、原理を図二に示す。20 kHz 以上の高い



図二 強力超音波音源 UNAS の原理

周波数で人間が音として知覚できない超音波を搬送波とし、オーディオ振動で振幅変調された変調波を非線形性が生じる大きな振幅で空气中に放射する。変調波が空气中を伝搬する過程で空気非線形性により 2 次歪みを生じる。2 次歪みが波長の短い変調波の音場に沿って生じ、仮想的な音源となって指向性が高い音場が形成できる。超音波帯域の音は人間の聴覚特性により聞き取ることはできず、2 次歪みの中に含まれる可聴帯域のオーディオ信号のみが復調され聞き取ることができる。本システムでは、この可聴音域のオーディオ信号で加力し、発生した振動をレーザードプラー振動計で測定する。

(2) 形成される音場

本送波器により、波長 8 mm の超音波 (約 40 kHz) を送波する場合に形成される音圧分布の理論値を図三に示す。図三 (a) より、軸上音圧は焦点距離 (曲率半径) に対応する距離 5 m 近傍で最大となる。図三 (b) の焦点面上の音圧分布から、中心から約 5 cm の位置で 0 となり半値幅 (超音波のビーム幅) は約 10 cm となる。

実際に、搬送波である 40.35 kHz の音圧分布を超音

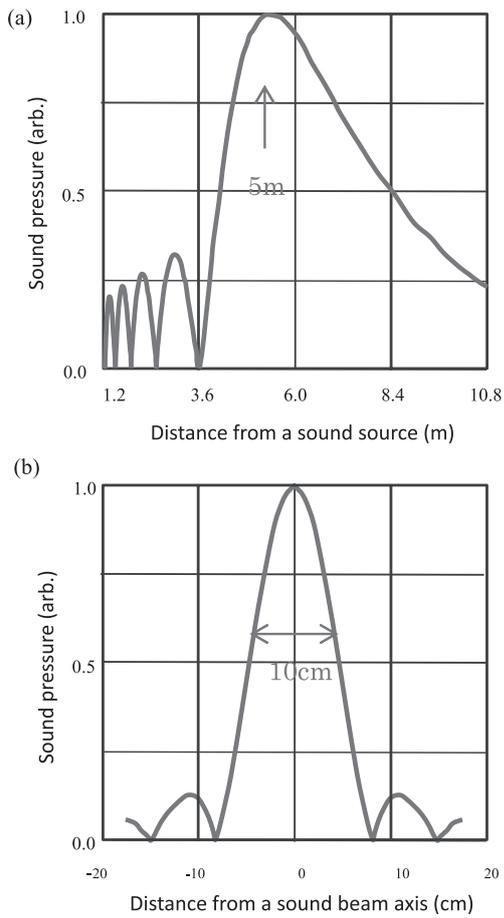


図-3 音圧分布の理論値

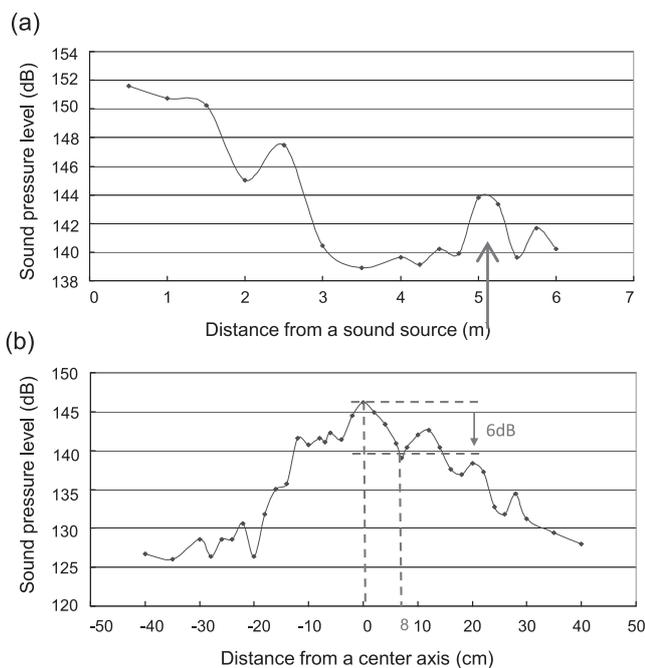


図-4 搬送波の音圧分布

波も測定可能なマイクロフォン（100 kHz まで感度を持つ）を用い計測した結果を図-4 に示す。図-4 (a) に示すように軸上では音源近傍で音圧が特に大きく、5 m 付近で再度ピークが見られる。5 m 位置における

軸直角方向の分布（図-4 (b)）から、+8 cm でおおよそ 6 dB (1/2) 程度低下していることから、発生した超音波のビーム幅は約 16 cm 程度であることが分かる。また、ビーム幅の大きさや軸上の 5 m までの挙動も理論値と異なっている。これは室内計測による反射波および残響波による影響と、円形凹面送波器の製作精度による影響と考えられる。

次に、可聴帯域の音圧分布を 1 kHz と 2 kHz について計測した結果を図-5 に示す。図-5 (a) に示すように 1 kHz では音源から 4 m 地点、2 kHz では音源から 3 m 地点とそれぞれ異なった位置で最大ピークが見られる。また、焦点距離である 5 m 位置での方位方向音圧分布（図-5 (b)）から、おおよそ 6 dB (1/2) 低下している可聴音のビーム幅は約 16 cm 程度であることが分かる。この結果から、可聴音域については周波数に依存せずに、音源から 5 m の位置で最大値 120 dB (SPLre 20 μPa) の駆動音圧が形成されていることが分かる。

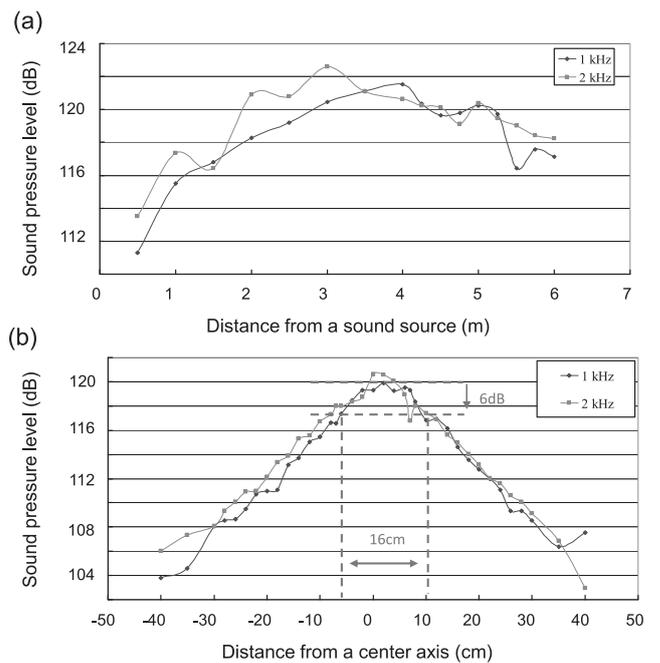
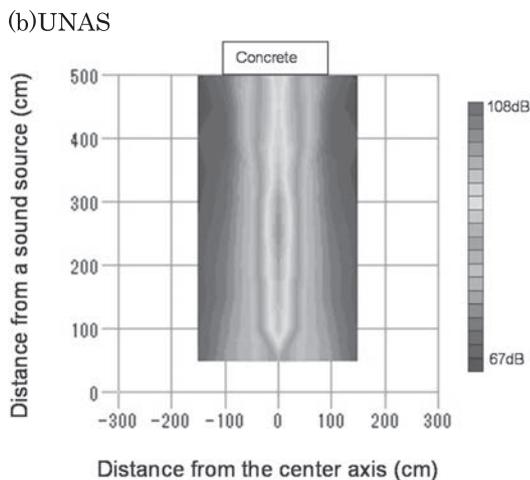
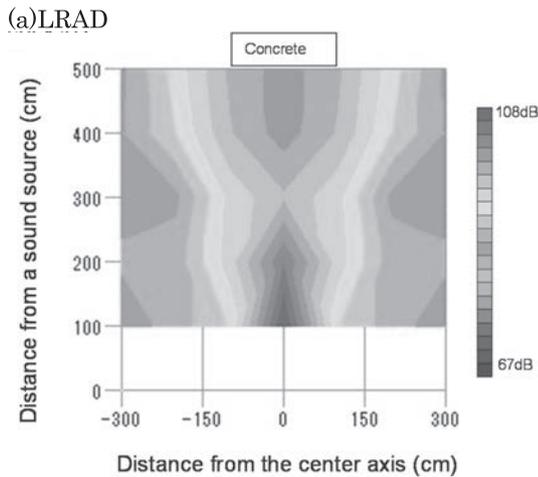


図-5 可聴音の音圧分布

最後に、実際の測定時を想定し、音源から 5 m 離れた位置にコンクリート試験体 (2 × 1.5 × 0.3 m³) を正対させた場合の音圧分布を精密騒音計により計測した (高さ 1.5 m で 10 秒間の最大音圧値を測定)。送信音波として 1 kHz の正弦波 9 波 (9 msec) をインターバル 100 msec でバースト駆動したものを用いた。また、音圧はコンクリート表面上で 100 dB 程度になるように調整した。図-6 に、従来音源 (LRAD) の結果と強力超音波音源の結果を示す。従来音源では、中



図一六 探査時の音圧分布

心軸から3m離れても80dB程度の音圧が発生しているが、UNASでは1.5m離れて、70dB以下まで低下していることが分かる。

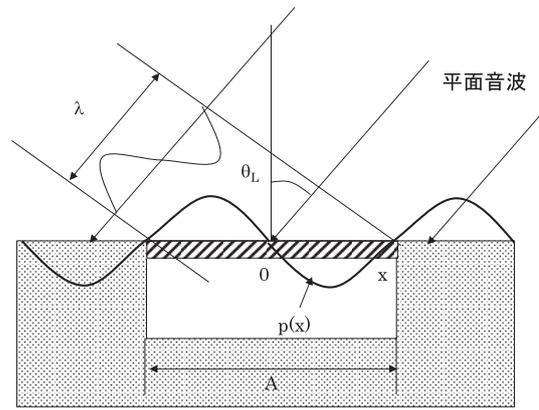
(3) 斜め入射の影響

コンクリート面に対し、角度を持って、従来音源LRADで平面波を入射させた場合と、強力超音波音源UNASでビーム波を入射させた場合の駆動音圧へ与える影響を、理論的に検討した。

(a) LRADの場合

LRADでは、5m以上の離隔になると1m以上の広いビーム幅となり、欠陥部の大きさに比較し大きいため、一様な平面波が入射されると考える。入射音波の励振効果は、対象面に関する入射音圧の面積に比例するため、斜め入射により対象面で1周期の位相差が生じると相殺され、駆動しにくくなる。図一七に示すように斜め入射により1周期の位相差が生じ、相殺され駆動しにくくなる許容入射角度 θ_L は

$$\theta_L = \sin^{-1} \frac{A}{\lambda}$$



図一七 音波の入射と駆動力 (LRAD)

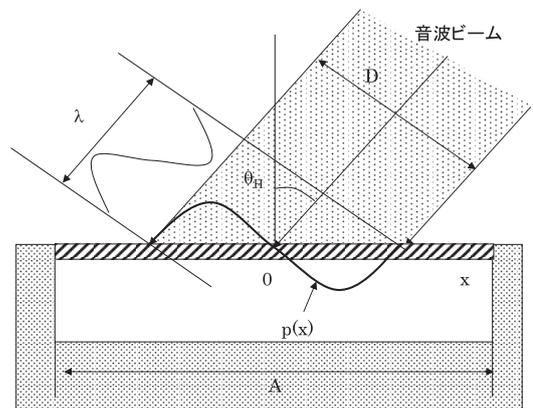
となり、許容入射角度は、欠陥径(平面的規模)Aと波長 λ の関数となる。本式から、欠陥径が大きいケースでは、許容入射角 θ_L が小さくなることが分かる。

(b) UNASの場合

UNASの場合は、集束することにより、ビーム幅Dを極端に小さくすることが可能となる。したがって、図一八に示すようにビーム幅Dが欠陥径Aよりも小さい場合を仮定する。この場合、許容入射角度 θ_H は

$$\theta_H = \tan^{-1} \frac{D}{\lambda}$$

となり、ビーム幅Dと波長 λ の関数となって、欠陥径Aとは無関係となる。

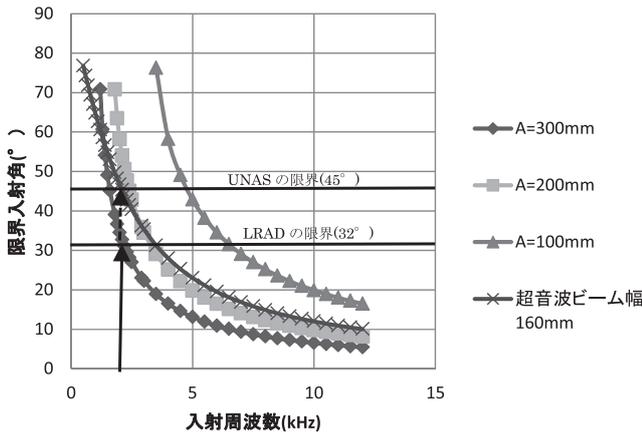


図一八 音波の入射と駆動力 (UNAS)

(c) 許容入射角の比較

LRADについて、欠陥径を変化させ、入射波の周波数と許容入射角度の関係を図一九に示す。これらの曲線の下側で探査が可能となる。例えば、 ϕ 300mm 深さ60mmの欠陥では一次の固有周波数(円形板曲げ振動)が2.1kHzであり、32°が許容入射角度になる。深さが大きくなると一次の固有周波数が大きくなり、許容入射角度が小さくなることが分かる。

一方、UNASでは、ビーム幅が決まれば、欠陥径



図一9 欠陥の大きさ、入射周波数と限界入射角の関係

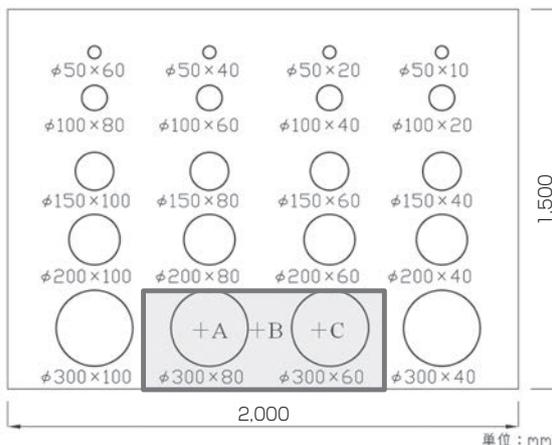
と関係なく、入射波の周波数と許容入射角度の関係が決まる。ビーム幅を16cmとして計算すると、2.1kHzでは45°まで許容入射角度が大きくなる。したがって、LRADに比較し、10°許容入射角度が大きくなり、例えば壁面を10m離れた位置から測定する場合、LRADでは高さ6.4m程度までだが、UNASでは高さ10mまで測定が可能となることが分かる。

(4) UNASとLDVからなるシステム

UNASとシングルポイントレーザドプラ振動計(LDV)を組み合わせたシステムを製作した。写真一2に示すように、音源中心部に振動測定のためのレーザーを通過させる穴(20mm)を開けた。音源の後ろにはLDVを載せる架台を設け、焦点の位置とLDVによる振動測定点を一致させるように工夫した。LDVは防振ケースで覆っている。

3. 円形空洞欠陥試験体の測定結果

欠陥径と設置深さを变化させた円形空洞欠陥試験体



図一10 円形空洞を模擬した試験体

を用い、UNASとLRADの2種類のシステムを用いた探査結果を比較し、UNASの基本性能および斜め入射性能を検討した。

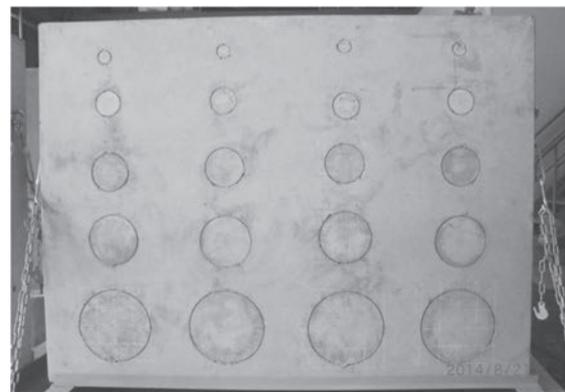
(1) 使用した試験体

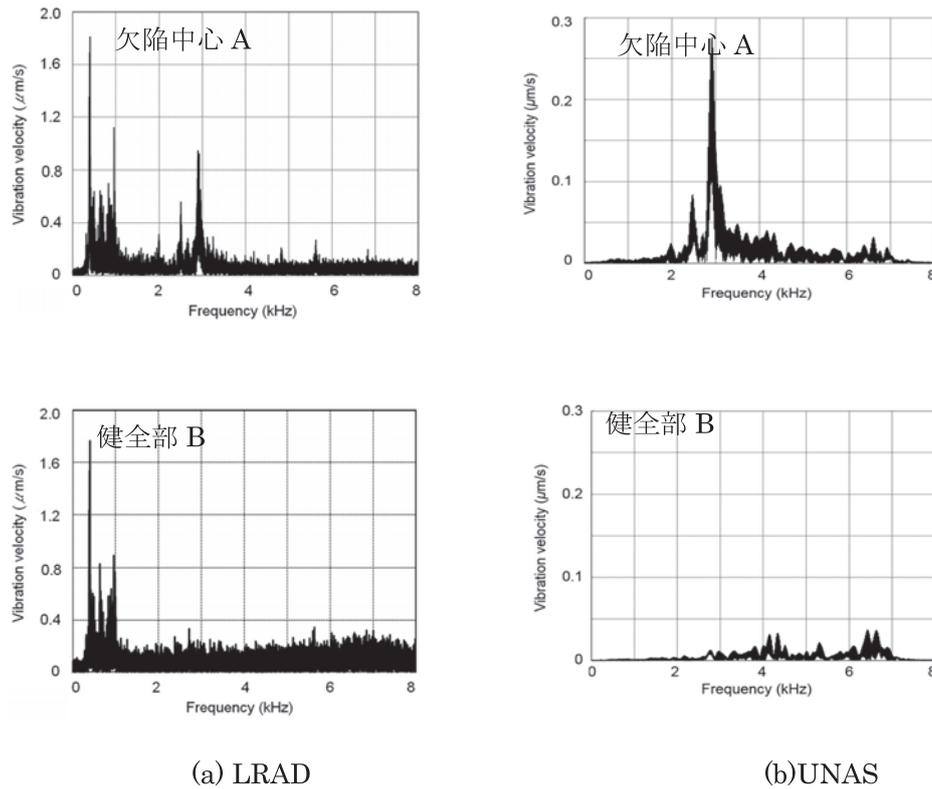
異なる大きさと深さ(表面から空洞までの距離)を有する円形空洞試験体を用いた。円形空洞は、厚さ25mmの発泡スチロールで模擬した。円形空洞の直径は50, 100, 150, 200, 300mm、深さは10, 20, 40, 60, 80, 100mmで、20個の円形空洞欠陥を2,000mm×1,500mm×300mmの直方体の試験体内に設置した。

(2) UNASの基本性能の確認

2種類の音源を用いφ300深さ80mmの空洞欠陥の探査を行った。測定は、試験体から5m離れた位置(試験体に正対)に従来システム及び強力超音波システムを配置して、音源からは500~7,000Hzのトーンバースト波を発生させた。音圧は試験体前面で100dBである。図一10に示すφ300深さ80mmの空洞欠陥における欠陥中心と健全部の2点について2種類の音源を用いた音響探査法を実施し、FFT分析結果で比較し、図一11に示す。これらの結果から、

- ・どちらの音源でも、欠陥中心部で一次の固有振動(2,900Hz)が発生している。
- ・発生する振動速度は、UNAS(点加振)はLRAD(面加振)に比較し、1/10程度である。ただし、UNASのノイズフロアが低いため、欠陥における共振が観測されている。
- ・健全部におけるノイズでも、LRADの結果に比較し、UNASでは小さい。
- ・LRADを使用した場合、LDVでは1kHz以下に特有の共振が発生するが、UNASでは音圧が低いた





図一 11 φ 300-80 離隔 5 m 直角入射

め、この共振は見られない。

(3) 斜め入射性能の検討

斜め入射性能を検討するため、2種類のシステムを用いφ 300深さ60 mmの空洞欠陥の探査をコンクリート面とシステムのなす角度（試験体を回転させる場合は、試験体の法線方向とシステム・試験体を結ぶ線のなす角度）を変化させ、斜め入射性能を検討した。欠陥中心点（図一 10 C 点）における固有周波数の振動速度を0°（正対）の結果で基準化し、整理した。入射波はLRADについては500～7,000 Hzのトーンバースト波、強力超音波音源については2,100 Hz9波のバースト波（持続時間3 ms、インターバル100 ms）を用

いた。音圧はコンクリート表面で100 dBになるように調整した。角度は0°, 15°, 30°, 45°, 60°に変化させた。

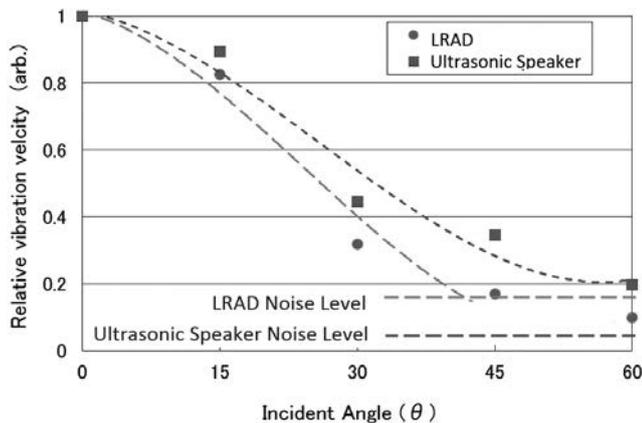
その結果、以下の結果が得られた。

- ・強力超音波音源では、60°の斜め入射においても固有振動の確認ができたが、従来音源LRADでは30°以上では固有振動がノイズレベル以下となり、確認できなかった。
- ・これは、2章で説明したLRADの許容入射角度の理論値32°と良好に一致している。

4. おわりに

強力超音波音源UNASを開発し、基本性能を調べ、それを用い音響探査を実施した。それらの結果、以下のことが分かった。

- ・5 m 離隔で音響探査法が可能な強力超音波音源UNASを実現することができた。
- ・強力超音波音源UNASは、従来音源LRADに比較し測定時に周辺環境へ及ぼす影響を低く抑えることができる。
- ・強力超音波音源UNASは、従来音源LRADに比較し、平面波による干渉効果が小さいため、斜め入射による測定可能範囲をより広くすることができる。



図一 12 φ 300-60 離隔 5 m 斜め入射の結果

《参考文献》

- 1) 歌川紀之, 北川真也, 杉本恒美: トンネル点検に対する弾性波法非破壊検査技術 — 打音法, 音響探査法の紹介 —, 建設機械施工 Vol.66 No.11, 2014.
- 2) 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.
- 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 (2), 佐藤工業技術研究所報, No.37, pp.13-18, 2012.
- 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 (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.
- 5) 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.
- 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に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) 歌川紀之, 赤松亮, 杉本恒美, 片倉景義: 音響探査法における欠陥の探査アルゴリズムの検討, コンクリート工学年次論文集, vol.36, No.1, pp.2068-2073, 2014.
- 8) 中島悠輔, 吉村健, 仲信彦, 大矢智之: 携帯型指向性スピーカーの試作, NTT DoCoMo テクニカルジャーナル, Vol.14, No.1, pp25-31, 2006.

[筆者紹介]

歌川 紀之 (うたがわ のりゆき)
佐藤工業(株) 技術研究所
首席研究員



黒田 千歳 (くろだ ちとせ)
佐藤工業(株) 技術研究所
主席研究員



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

