

音源探査装置（指向性音カメラ）を活用した 橋梁点検に関する基礎的検討

財満健史 * 大脇雅直 ** 山下恭弘 ***

RC 構造物（床版）のうき部等を検知棒で加振し、健全部との音響特性の違いを音源探査装置で表示する検討を行っている。マイクロホン後方からの反射音の影響を低減し、音源方向を示すことができる音源探査装置（指向性音カメラ）を試作した。無響室において、マイクロホン後方に設置した障壁の有無にかかわらず、指向性音カメラの測定結果はおおよそ音源スピーカの方向を示した。また壁からの反射が想定される場所において、タイル表面を検知棒で加振することでタイル剥離が検知できることを示した。さらに模擬試験体および実大構造物においてコンクリート表面のうきや内部の空隙が検知できることを示した。

キーワード：音源探査装置、橋梁点検、インフラ維持管理

1. はじめに

インフラの老朽化が急速に進んでおり、10年後には全国に約70万橋ある2m以上の橋梁の43%が建設後50年を経過することになる¹⁾。このため、道路橋定期点検要領²⁾が国土交通省から公表され、「5年に1回の頻度で定期点検すること」が基本とされた。定期点検は、近接目視により行うことを基本とし、必要に応じて触診や打音等の非破壊検査等を併用して行うことが記載されている。

橋梁の裏面を点検するためには、点検用の足場を組む必要があり、工期も長くなる。そこで、橋梁裏面に近づくことができるロボットを製作し、そのロボットにコンクリート表面のうきや内部の空隙の点検ができる音源探査装置を搭載するための検討を行っている。

川井田らは、道路のジョイント部の劣化診断方法として、音源探査装置を用いた手法について検討を行っている³⁾。現地でも調査を行う場合、周囲からの反射音や対象音以外の音による影響が考えられる。このため、複数の測定箇所ですべて計測するなどして精度を向上させてきたが、インフラの劣化診断は調査対象が多く、効率的に調査を実施する必要がある。そこで、マイクロホンに入力する音波の到来方向を制限し、反射音や対象外の音の影響を低減する手法について検討を行った⁴⁾。模擬的にうき部や空隙部を作ったコンクリート試験体表面を検知棒で加振し、上述の手法を用いて音情報でうき部や空隙部の位置を検知する方法について検討した。さらに実大構造物を対象とした実証実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 音源探査装置（1）

音源探査装置⁵⁾は、Fig. 1左に示すように立体的に配置された5つのマイクロホンと1つのCCDカメラを装備している。各マイクロホンに入力された音波の音響位相差を利用して音源方向を推定する。この装置では音波が全方位からマイクロホンへ入射するため、マイクロホンに近接した場所に反射面や対象音以外の音があると、音波の干渉による影響で音源方向に定位しない場合があった。

そこで、マイクロホンをFig. 1右に示すような平板の面内に設置した。これによって前方180度から到来する音波は直接マイクロホンに入射するが、後方から到来する音波は大きく減衰するため、精度の向上が期待できる。マイクロホンは、平板自体の反射波を避けるために、平板とマイクロホン先端が同一平面内となるように設置し、マイクロホンの数は4個とした。

構造物の劣化診断の場合、打音などで着目する周波数は比較的高い周波数成分である場合が多い。一方、道路交通音は低い周波数成分が大きいことから、対象音とのS/N比を確保するために対象周波数を1,000Hz以上とした。1,000Hzの半波長が約170mmであることから、平板は1波長相当の直径400mmの円形板と、1/2波長相当の直径200mmの円形板の2種類で検討した。音源探査装置の概要をTable 1に示す。マイクロホン配置と平板の大きさによりタイプ①～③とした。

2. 1 実験概要

実験はFig. 2に示す無響室内で行った。音源はスピーカからホワイトノイズ（白色雑音）を出力した。音源スピーカの位置はマイクロホンから2,000mmとし、カメラ正面を0度として15度間隔で左60度まで移動して計測した。マイクロホン後方からの反射の影響を検討するた

*	技術研究所 音環境研究グループ
**	技術研究所
***	信州大学名誉教授

めに、マイクロホンから 800mm 離れた位置に障壁を設置した場合と設置しない場合について、音源探査装置を用いて計測を行った。解析の対象とした周波数範囲は1,000～6,500Hzである。

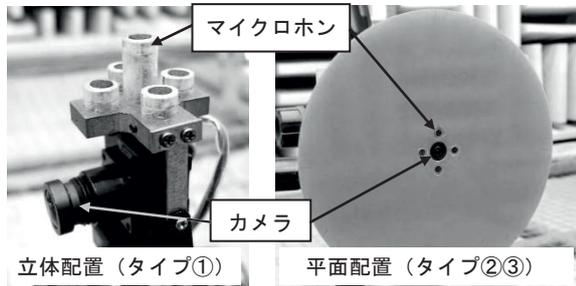


Fig. 1 マイクロホン配置

Table 1 音源探査装置の概要

	タイプ①	タイプ②	タイプ③
マイクロホン配置	立体配置	平面配置	平面配置
マイクロホン数[個]	5	4	4
マイクロホン間隔[mm]	20	26	26
平面板の直径[mm]	-	400	200
測定周波数範囲[Hz]	160-7,500	1,000-6,500	1,000-6,500

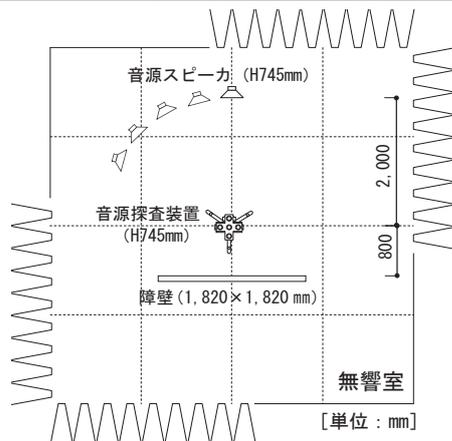


Fig. 2 実験状況

2.2 実験結果

音源スピーカを正面および左 30 度方向に配置したときのタイプ①～③の測定結果をFig. 3～Fig. 8に示す。

マイクロホンが立体配置のタイプ①では、障壁ありの場合に反射の影響を大きく受け、音源方向の推定誤差が大きくなっていた。一方、マイクロホンが平面配置のタイプ③では、障壁なしの場合にはタイプ①と比べて若干音源の推定誤差が見られた。障壁ありの場合は、特定の周波数で音源スピーカ以外の方向を推定していることを除けば、おおよそ音源スピーカの方向を示していた。タイプ②では、障壁なしのときに周波数によってはタイプ③よりも音源の推定誤差が大きい傾向がみられた。障壁ありの場合も同様であるが、反射の影響はタイプ①よりも小さく、音源スピーカの方向は概ね特定できた。

タイプ③について、音源スピーカを左 45 度に配置したときの測定結果をFig. 9に、左 45 度かつ仰角 16 度に設置したときの測定結果をFig. 10に示す。左 30 度のときに比べて、障壁なしの場合に音源方向の推定誤差が大きくなっていた。また高さ方向に音源位置を変化させたときにも、推定誤差が大きくなる傾向が見られた。

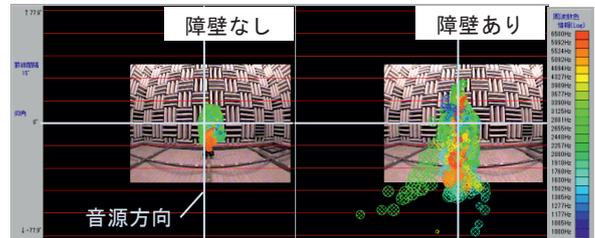


Fig. 3 タイプ① 音源：正面 0 度

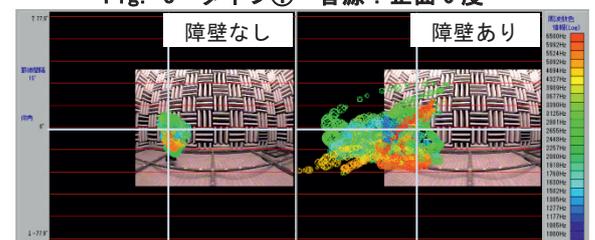


Fig. 4 タイプ① 音源：左 30 度

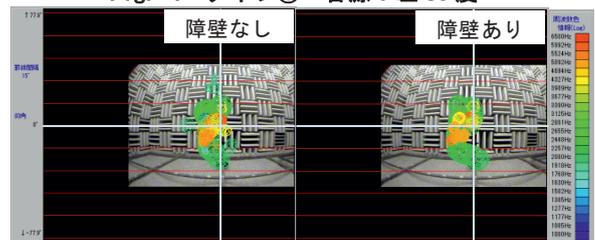


Fig. 5 タイプ② 音源：正面 0 度

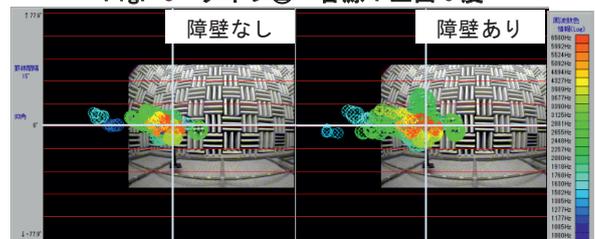


Fig. 6 タイプ② 音源：左 30 度

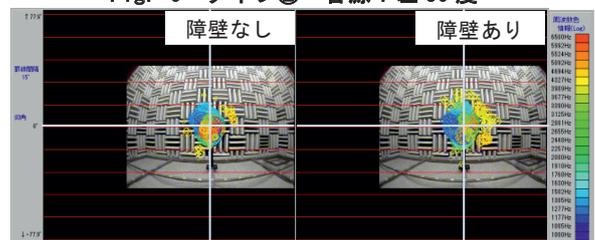


Fig. 7 タイプ③ 音源：正面 0 度

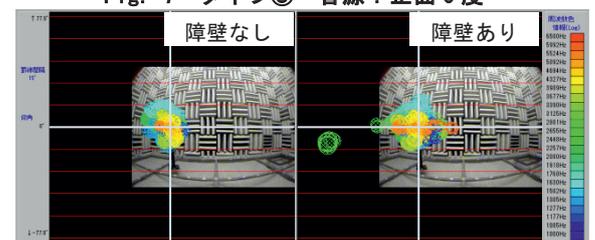


Fig. 8 タイプ③ 音源：左 30 度

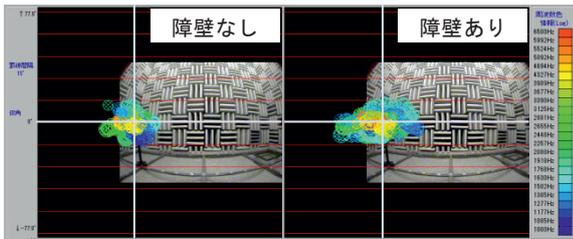


Fig. 9 タイプ③ 音源：左 45 度

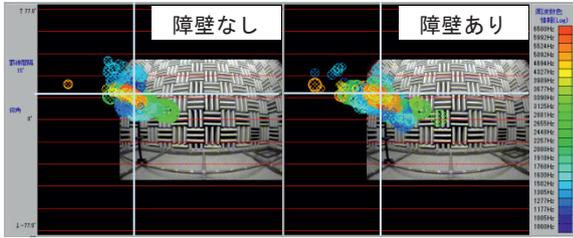


Fig. 10 タイプ③ 音源：左 45 度，仰角 16 度

3. 音源探査装置 (2)

音源方向の推定精度を向上させる目的でマイクロホン
を平面上に 5 個配置する方法について検討した。音源
探査装置が音源方向を計算できる周波数の上限はマイク
ロホン間隔に依存する⁵⁾。またマイクロホン間隔が小さ
いほど低い周波数における音響位相差は小さくなるので、
音源方向の推定誤差は大きくなる傾向がある。そこでマイ
クロホンをFig. 11に示すように配置するとマイクロホ
ン間隔は 25mm (1-2ch., 1-3ch. または 1-4ch., 1-5ch.),
35mm (2-3ch., 3-4ch. または 4-5ch., 5-2ch.), 50mm (2-4ch.,
3-5ch.) となり、3 つのマイクロホン間隔を同時に実装
することができる。この配置により測定できる周波数の
上限を下げることなく音源方向の推定精度を向上させる
ことが可能となる。

次に、マイクロホンの設置方法について検討する。Fig.
12に示すように、ベークライト円柱板の上にマイクロホ
ンを 5 本設置してその上にガラスウール (以下 GW)
(64kg/m³, 厚さ 46mm) を被せた。ベークライトの直径は
ロボットに搭載することを考慮して 120mm とした。大谷
ら⁶⁾は、マイクロホンに入射する音は円板側面からの間
接音の影響を受けると報告しているので、ベークライト
の側面にも GW (64kg/m³, 厚さ 25mm) を被せた。

3.1 実験概要

実験状況はFig. 2と同じ配置で行った。後述するタイ
ルのうき部検知実験やコンクリートのうき部・空隙部の
検知実験の結果を見ると、健全部と比較して特徴的な周
波数は 3,000Hz 以上の高い周波数が多いことが分かった。
従って対象周波数範囲を 3,000~6,500Hz とした。

3.2 実験結果

音源探査装置の後ろに障壁を設置した場合としない場

合について測定した結果をFig. 13~Fig. 15に示す。障壁
を設置した場合についても、設置しない場合と同様にお
およそ音源スピーカ方向を示していた。

音源スピーカを水平方向 45 度，仰角 16 度に設置した
場合の測定結果をFig. 16に示す。この場合についても音
源スピーカ方向をおおよそ示していた。

音源スピーカの周波数範囲を 1,000Hz~6,500Hz とし
た場合の結果をFig. 17に示す。低い周波数帯域において
誤差が大きくなる傾向があった。

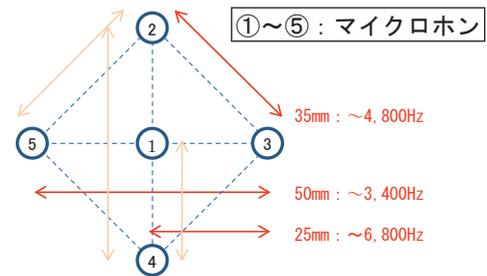


Fig. 11 マイクロホン配置

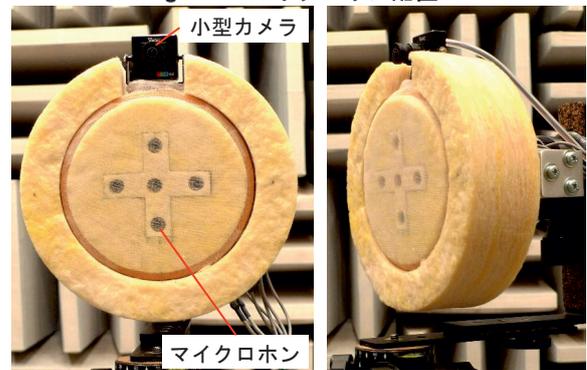


Fig. 12 マイクロホン配置 (左：正面，右：側面)

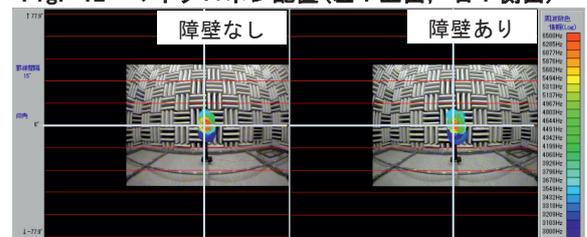


Fig. 13 音源探査装置(2) 音源：正面 0 度

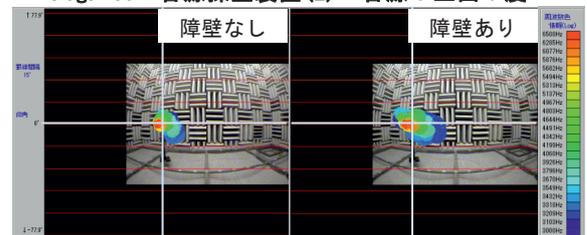


Fig. 14 音源探査装置(2) 音源：左 30 度

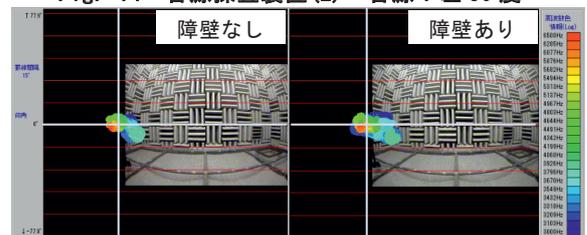


Fig. 15 音源探査装置(2) 音源：左 60 度

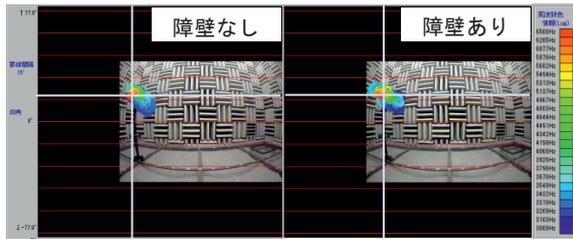


Fig. 16 音源探査装置(2) 音源：左45度，仰角16度

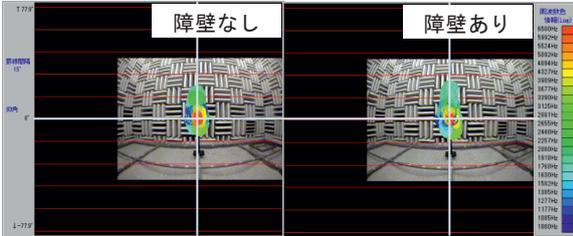


Fig. 17 音源探査装置(2) 音源：正面0度
(1,000~6,500Hz)

4. タイルうき部検知実験

柱の横方向にタイル張りの壁があり，壁からの反射が想定される場所で実験を行った．柱の近くに音源探査装置(2)を設置し，タイル表面を検知棒で上下に移動させながら加振した．タイルの健全部およびうき部を加振したときの発生の周波数特性をFig. 18に示す．3,000Hz以上でタイルのうき部は，健全部と比較して音圧レベルが大きく上昇する周波数がある．音源探査装置(2)の表示画面例をFig. 19に示す．音圧レベルのしきい値を60dB，周波数の表示範囲を3,000Hz~6,500Hzに設定すると，健全部は画面上に音の到来方向を示す○が表示されない．一方，タイルにうきがある場合には，うき部に○の表示が表れる．この表示画面を記録することによってタイルのうき部の位置を把握することが可能となる．

5. コンクリートのうき部，空隙部検知実験

コンクリート表面のうき部とコンクリート内部の空隙部を模擬した試験体を作成し，これらの検知実験を行った．試験体の断面図をFig. 20に示す．コンクリート表面のうき部は，コンクリートとの絶縁部にビニールおよび用紙を設置して模擬した．コンクリート内部の空隙部は，コンクリート表面から20mm離れた位置に300×300×50mmの大きさとした．コンクリート試験体のうき部および空隙部の平面をFig. 21に示す．

うき部および空隙部において検知棒を移動させながら加振したときの周波数特性をFig. 22に示す．健全部と比較すると，うきや空隙がある場合には3,000Hz以上で音圧が上昇する周波数がいくつかあった．

音源探査装置(2)の表示画面をFig. 23およびFig. 24に示す．表示する範囲は，周波数3,000Hz~6,500Hz，音圧レベルのしきい値65dBとした．音源方向はうき部および

空隙部の位置を示していた．うき部と空隙部では周波数が異なり，両者を区別して判断することができる．

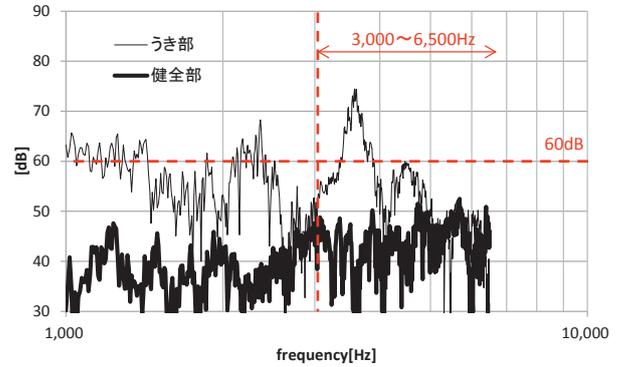


Fig. 18 タイル表面を加振した時の周波数特性

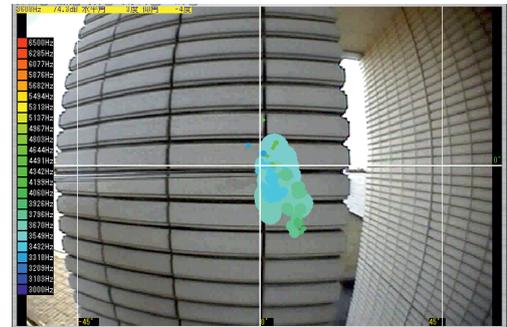


Fig. 19 音源探査装置(2) 表示結果画面
(3,000~6,500Hz, 60dB以上)

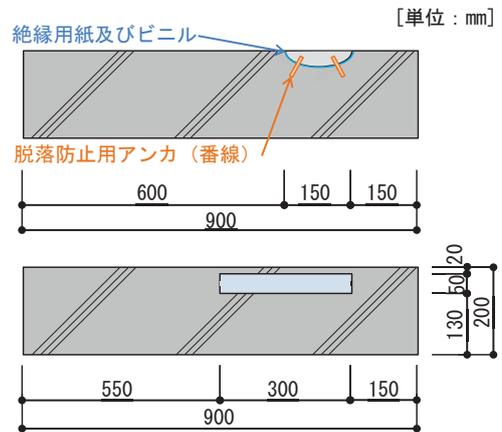


Fig. 20 うき及び空隙部を模擬した試験体

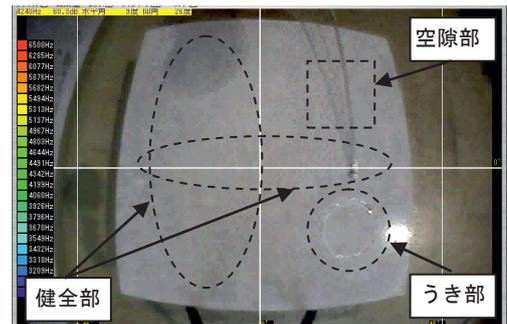


Fig. 21 うき及び空隙を模擬した試験体平面

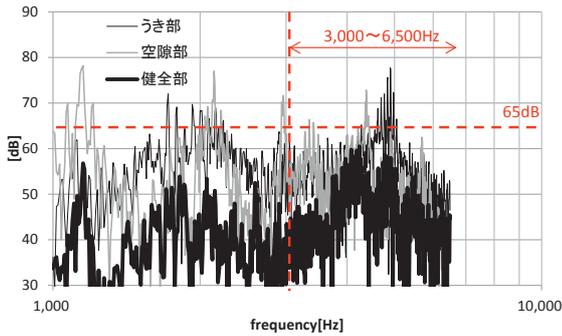


Fig. 22 うき及び空隙部の周波数特性



Fig. 23 うき部を加振したときの表示画面 (3,000~6,500Hz, 65dB以上)



Fig. 24 空隙部を加振したときの表示画面 (3,000~6,500Hz, 65dB以上)

6. 実大構造物における検知実験

名古屋大学敷地内に設置されている保全技術研修用橋梁モデル「N2U-BRIDGE」で実大構造物における検知実験を行った。今回は事前にコンクリート部のうきや空隙の場所が明らかな箇所について、検知棒の加振による発生音を測定した。指向性を持つ音源探査装置(2)と測定対象の距離は、空隙については0.5m、うきについては1.0mとした。

周波数特性をFig. 25およびFig. 26に示す。健全部と比較すると、うき部では3,000Hz帯域以上の広い周波数範囲で違いが確認できる。空隙部(深さ30mm)では、主に4,000Hzおよび5,000Hz付近において違いが確認できる。音源探査装置(2)の表示画面をFig. 27およびFig. 28に示す。表示する範囲は、周波数3,000Hz~6,500Hz、音圧レベルのしきい値50dBとした。うき部および空隙部のいずれにおいても健全部とうき部で明確な差が見られ、健全部とは異なる発生音の位置を確認できた。

実際の橋梁において計測を行う場合はこの測定データを無線伝送して、離れた場所に設置したパーソナルコンピュータなどに保存することによって、コンクリート床版のうきや空隙等の劣化部の位置を遠隔から把握することが可能となる。

7. まとめ

橋梁のコンクリート床版のうき部や空隙部の劣化診断に音源探査装置を活用するための基礎的な検討を行った。ベークライトの円柱板(直径120mm)上にマイクロホン5本を設置し、その上にGW(64kg/m² 厚さ46mm)を

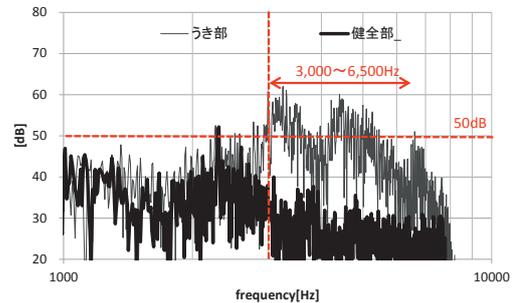


Fig. 25 周波数特性の比較(健全部およびうき部)

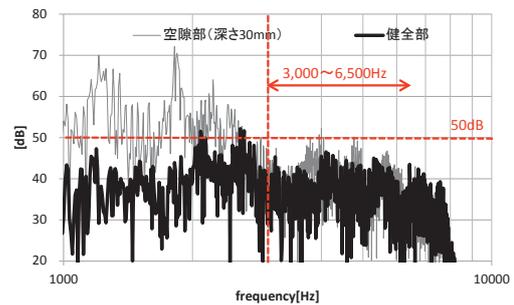


Fig. 26 周波数特性の比較(健全部および空隙部深さ30mm)



Fig. 27 うき部の実験結果(左:健全部, 右:うき部) (3,000~6,500Hz, 50dB以上)

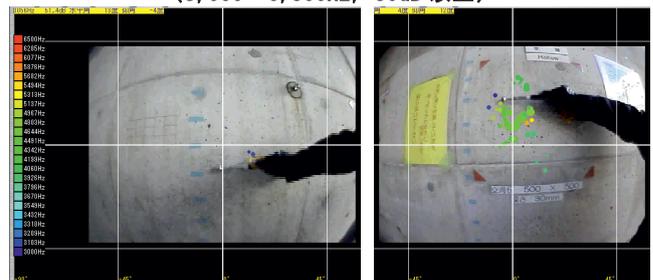


Fig. 28 空隙部の実験結果(左:健全部, 右:空隙部) (3,000~6,500Hz, 50dB以上)

被せ、マイクロホン後方からの反射音の影響を低減する音源探査装置を試作した。

無響室において、音源探査装置が障壁の有無にかかわらずおおそ音源スピーカの方向を示した。

柱の横方向に壁があり、壁からの反射が想定される場所に音源探査装置を設置し、タイル表面を検知棒で上下に移動させながら加振し、柱表面のタイル剥離を検知できることを示した。

次に、うき部や空隙部を設けたコンクリート試験体を製作し、検知棒でコンクリート表面を加振し、音源探査装置でその方向を検知できることを示した。

さらに、実大構造物における既知のうき部や空隙部について実証実験を行い、音源探査装置を用いて健全部とは異なる発生音の位置を把握することができることを示した。

なお、本論文は文献4),7)に発表した内容に加筆し、まとめたものである。

本研究成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「インフラ維持管理・

更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」の委託業務の結果得られたものである。

参考文献

- 1)北橋健治, 新技術による課題解決に向けた取り組み, NETIS プラス, 第7号, pp.3, 2015年1月
- 2)国土交通省道路局: 道路橋定期点検要領, 2014年6月
- 3)川井田実, 築山有二, 大脇雅直, 財満健史: 橋梁伸縮装置の劣化診断に関する実大実験—音源探査装置による劣化度の可視化に関する基礎的検討—, 日本音響学会講演論文集 1-3-8, 2013年9月
- 4)財満健史, 大脇雅直: 音源方向推定における反射音の影響低減に関する基礎的検討—音源探査装置を用いた構造物の劣化診断に関する研究(1)—, 日本音響学会講演論文集 1-5-7, 2014年9月
- 5)大脇雅直: 音カメラの開発と適用事例, 騒音制御 Vol. 35, No. 5, pp. 421-426, 2011年12月
- 6)大谷真, 平原達也: 両耳間時間差の周波数依存性の成因—円形モデルによる検討—, 日本音響学会講演論文集 1-9-1, 2012年9月
- 7)大脇雅直, 財満健史, 山下恭弘: 音源探査装置を活用した橋梁点検に関する基礎的検討—インフラ維持管理用ロボット技術の開発—, 日本音響学会騒音振動研究会, N-2015-18, 2015年3月

Fundamental study of a method for inspecting bridges with the directivity sound source localization device

Takefumi ZAIMA, Masanao OWAKI and Yasuhiro YAMASHITA

Abstract

We investigate the difference of acoustic characteristic between homogeneous part and spalling or cavity part by impacting on RC structure (floor slab) with an inspection stick, and we examine a method to indicate these differences with the sound source localization device. We produced the directivity sound source localization device that could reduce the influence of the reflection sound propagating from the rear. In an anechoic room, the device indicated the direction of the sound source speaker regardless of the rear wall existence. This device could indicate positions of tile separation on a pillar by impacting on the tile with an inspection stick without being affected by reflection sounds propagating from the adjacent wall. Furthermore, we showed that the device indicated positions of spalling part and cavity part of a test piece and a full size structure.

Key words: Sound source localization device, Method for inspecting bridges, Infrastructure maintenance
