

コンクリート構造物を効率的に検査する音響探傷システム

Nondestructive Acoustic Inspection System Effective for Checking Concrete Infrastructure

西村 修 千星 淳 下山 禎朗 杉本 恒美
 ■ NISHIMURA Osamu ■ SENBOSHI Jun ■ SHIMOYAMA Sadao ■ SUGIMOTO Tsuneyoshi

わが国では、高度経済成長期に社会インフラ構造物の多くが建設されたが、それから約50年が経過した今、経年劣化などの内在する問題の早期発見が求められている。

東芝は、コンクリート構造物の検査を効率的に行うために、離れた場所から音響的な手段によりコンクリート構造物を探傷するシステムを開発した。この探傷システムは、指向性スピーカから検査対象物に向けて音波を発生させ、検査対象物の表面に生じる振動をレーザドップラー振動計 (LDV: Laser Doppler Vibrometer) で測定することにより、コンクリートの浮きや剝離の状態を推定し、可視化できる。今回、実用化を目指してコンパクトで効率的な装置を試作し、欠陥のあるサンプルを用いて基本性能を評価した結果、その有効性を確認した。

Almost 50 years have passed since a large number of social infrastructure construction projects were completed during the period of high economic growth in Japan, and the age-related deterioration of this infrastructure is progressing. In such a situation, there is an increasing need for technologies to detect internal problems in social infrastructure at an early stage.

Toshiba has developed a nondestructive inspection system for concrete structures using long-distance acoustic radiation. This system employs a laser Doppler vibrometer (LVD) to visualize areas of loose or peeling concrete through the measurement of concrete surface vibrations generated by sound waves from a remote directional speaker. We have developed a compact prototype system with the aim of realizing practical applications and confirmed the basic performance and effectiveness of the system through verification tests using concrete samples with defects.

1 まえがき

わが国では高度経済成長期に、道路や、橋梁(きょうりょう)、トンネル、上下水道、公共建築物など、様々な社会インフラ構造物の整備が急速に進んだ。それからおよそ50年が経過し、社会インフラ構造物の経年劣化がここ数年の間に目だってきた。それに伴う災害や事故を防止して利用者などの安全と安心を確保するため、社会インフラ構造物に内在する問題の早期発見が求められている。

コンクリート構造物として代表的な、橋梁(約70万橋)やトンネル(約1万か所)などは、国が定める統一された測定基準に基づいて、5年に1回の頻度で近接目視により点検を行うことが、2014年7月1日施行の国土交通省令により定められた。近接目視とは、肉眼により部材の変状などの状態を把握し評価が行える距離まで接近して目視を行うこと⁽¹⁾を想定している。また、2014年6月に定められた道路トンネル定期点検要領⁽¹⁾や道路橋点検要領⁽²⁾では、必要に応じて触診や打音検査を含む非破壊検査などを併用して行うこととされている。打音検査とは、ハンマなどでコンクリート面や取付け金具類を打診し、浮きや剝離がある箇所や、ボルトやナット類の緩みの有無及び範囲などを、記録する点検方法のこと⁽³⁾を示す。

コンクリート構造物に対する打音検査においては、ハンマな



図1. 打音検査の概念 — ハンマでたたいた際に生じるたわみ振動の音を耳で検知する。
 Conceptual diagram of hammering test

どで打診することにより、浮きや剝離部の上部コンクリート部材がたわみ振動を起こす(図1)。習熟した検査員がその振動音を耳で検知してコンクリートの浮きや剝離の状況を推定し、記録している。

検査員がアクセスしづらい高所などを打音検査する場合は、検査のための足場や高所作業車が必要になる。これは検査コ

ストの増大につながるため、多くのコンクリート構造物の検査を行うためには効率的な検査手法が望まれている。また、人口減少の流れのなかで、検査に必要な知識と技能を持つ検査員の確保も困難になってきている。

このような課題を解決する方法の一つとして、東芝はコンクリート構造物を離れた場所から音響的な手段により探傷するシステムを開発し、実用化を目的としてコンパクトで効率的な装置を試作した。ここでは、このシステムの概要と主な技術について述べ、基本性能の評価結果を示す。

2 音響探傷システムの概要

探傷システムでは、打音検査におけるハンマの代替として強力な指向性スピーカを、耳の代替としてLDVを用いて、コンクリート表面の振動速度を測定する。この測定原理を図2に示す。

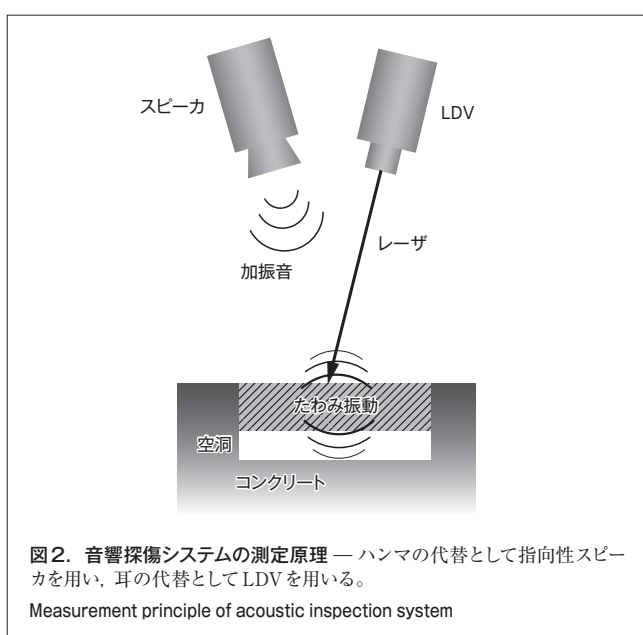
実際の打音検査では、浮きや剝離があると判断された箇所は、ハンマを用いてできる限り撤去することが行われる。今回開発した探傷システムでは、撤去する機能を備えていないため、打音検査における1次スクリーニング作業や、浮きや剝離の進行状況の監視とその効率化を目指した。

空気の粗密波とLDVの組合せで固体の非破壊検査を行うという着想は新しいものではないが、この探傷システムでは現場での運用に適したより実用的なものを目指し、次のような技術を開発した。

3 実用化のための技術

3.1 LDVの選定

コンクリート構造物表面の振動速度をLDVで測定する際、



屋外の道路など人が存在する環境で用いるため、安全の確保が重要である。レーザーの安全基準は、波長とパワーによってクラス分けされており、適切なクラスのレーザーを使用する必要がある。また、一般にコンクリート構造物の表面は平らではなく、レーザーの波長に比べると大きな凹凸が存在するため、その表面状態によって大きな観測ノイズが発生する可能性がある。そこで、コンクリート構造物表面の振動速度を、遠く離れた場所から安定して高精度に測定できるレーザー光源を搭載したLDVの機種を選定した。

3.2 2軸走査システムとスピーカ回転機構

一般に構造物の振動測定用のLDVは、三脚上に固定し、ある1点の測定を行う用途を想定している。コンクリート構造物の広い面を測定するためには、ある範囲についてLDVによる測定点を走査する必要がある。三脚上で手動により多数の点のトラバース測定を行う代わりに、自動的に走査できることが望ましい。

そこで、ガルバノミラーユニットと、そのユニットを $\pm 90^\circ$ の範囲で回転させる θ ステージを持つ独自の2軸走査システムを開発した(図3)。測定対象として例えばトンネル内壁を想定した場合、 θ ステージで円弧方向の走査を、ガルバノミラーユニットで進行方向の走査を、それぞれ行う。

スピーカは、LDVで測定するトンネル円弧方向と同じ向きに音を出す必要がある。そこで、スピーカを θ ステージ軸と平行な軸回りに同期して回転させる機構を開発した。また、カメラもこの機構上に搭載し、カメラで検査したいエリアを捉えるだけでスピーカとLDVからのレーザー光が自動的に指向する、操作性の良い装置を実現した。

加振音波によるミラーの励振を防ぐために、LDVのレーザー光が透過するウインドーを備えた防音防振ボックスを設置してミラーを保護した。また、LDVにも同様の防音対策を施した。

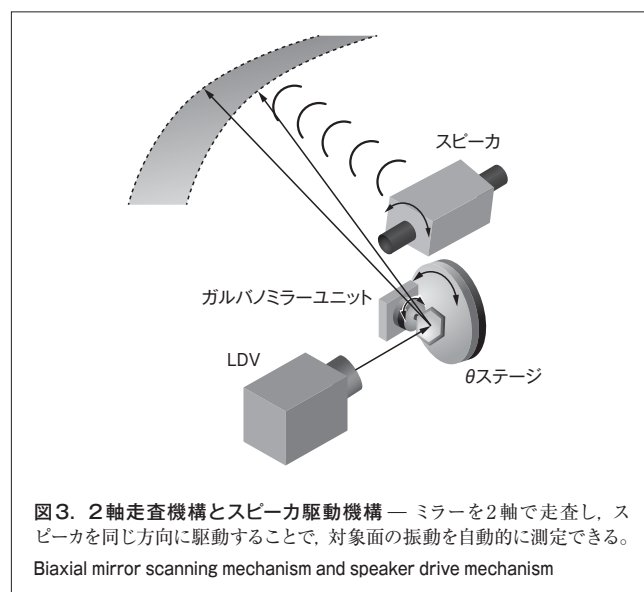




図4. 音響探傷システムの外観と測定実施イメージ—トンネル内壁へ実際に適用する場合の測定実施イメージである。スピーカ、LDV、及び機構部分をパッケージ化して、現場での作業や運用を容易にした。
Overview of acoustic inspection system

更に2軸走査システムとLDVに加わる地面からの外乱振動を防ぐために、これらを搭載する台座にも防振対策を施した。

2軸走査システムによって得られた測定結果は、カメラで撮影された現場写真上にマッピングされる。このマッピングを含めた2軸走査システムを制御するソフトウェアを開発した。

この探傷システムの操作は習熟を要するものではなく、測定対象の画像に対して走査エリアを指定し、得られたマッピング結果を確認して記録するだけである。これらの操作は、操作者の手元のワイヤレス機器によって実施できるようにした。

3.3 パッケージ化

過去の同種の取組みでは、加振音源、LDV、及び信号処理装置のそれぞれが個別に用意されていたため、現場への運搬、セットアップ、及び撤収に多くの時間を要していた。この探傷システムでは、加振音源、LDV、及び2軸走査システムを一体にしてパッケージ化した。これにより、現場での作業や運用が容易になり、作業時間の大幅な削減が可能になった。

探傷システムの外観と測定実施イメージを図4に示す。システム上部には、スピーカと回転機構が設置され、システム下部には、2軸走査システムが組み込まれている。ここで、信号処理装置を一体にする効果は小さいため、むしろ運搬のしやすさを重視して別の筐体(きょうたい)とした。

4 基本性能の評価

4.1 模擬欠陥入りサンプル

探傷システムの基本性能を確認するために、模擬欠陥のあるサンプルに対して測定を行った。サンプルは縦横それぞれ450 mm、厚さ100 mmのコンクリートブロック中に、直径200 mm、厚さ20 mmの発泡スチロール製の円板を深さ20 mmの位置に埋め込んで作成した(図5)。

探傷システムで測定する前に打音検査を実施し、欠陥位置に

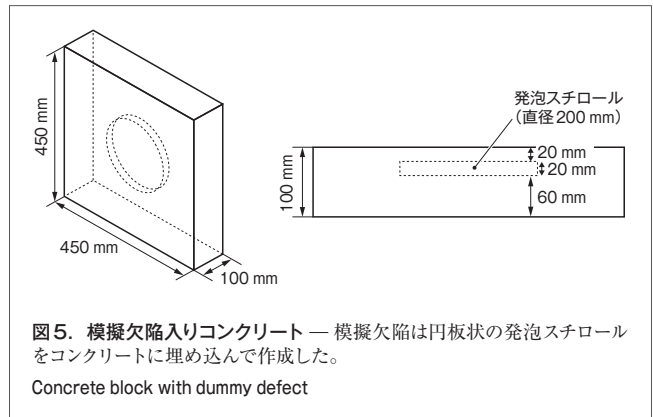


図5. 模擬欠陥入りコンクリート—模擬欠陥は円板状の発泡スチロールをコンクリートに埋め込んで作成した。
Concrete block with dummy defect

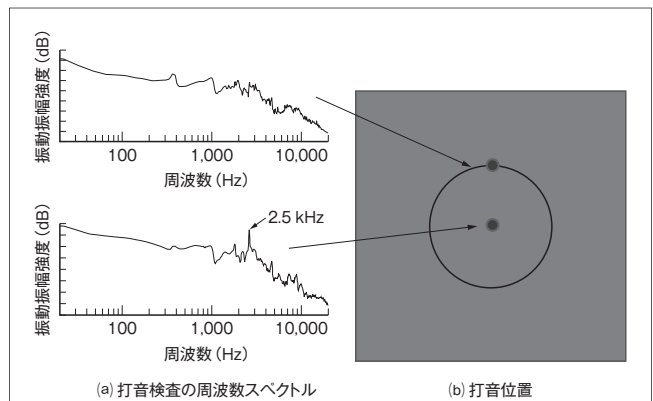


図6. 模擬欠陥の周波数スペクトル—模擬欠陥部分では、たわみ振動のスペクトルを観測した。
Frequency spectrum at location of dummy defect

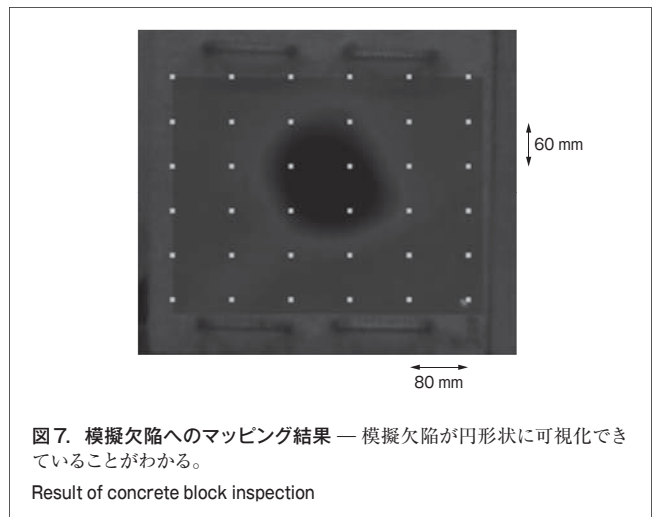
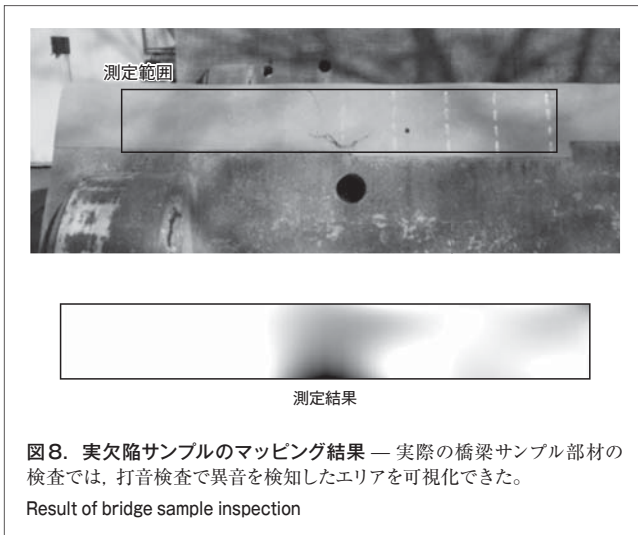


図7. 模擬欠陥へのマッピング結果—模擬欠陥が円形状に可視化できていることがわかる。
Result of concrete block inspection

おける音色の違いを周波数分析によって測定した。事前の構造解析結果と同じ2.5 kHzのたわみ振動を確認した(図6)。

開発したソフトウェアを用いて、縦方向と横方向にそれぞれ5分割した自動2軸走査による測定を行い、同時にカメラで撮影された現場写真上に測定結果をマッピングした(図7)。図上の白い点は、36点の測定箇所であり、濃淡表示で音色の違



いがあると推定されるエリアを表示している。模擬欠陥が円形状に可視化できていることが確認できる。

測定に要する時間は、1点当たりの測定に必要な時間と点数によって決まる。この模擬欠陥に対しては、36点の測定を約1分で終えることができた。

4.2 実欠陥サンプル

国立研究開発法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (CAESAR) の臨床研究用撤去部材保管施設に保管されている試験体に対して、開発した探傷システムの試験適用を行った。面状に測定したマッピング結果の一例を図8に示す。濃淡表示で音色の違いがあると推定されるエリアを表した。この試験体は中央下部に大きな亀裂が視認でき、打音検査でもそのエリアで明確な異音を検知した。開発した探傷システムにより離れた場所から非接触で測定した結果、打音検査で異音を検知したエリアとほぼ同じエリアを可視化できていることを確認した。

現在、定量的な評価についても検討を進めている。

5 あとがき

コンクリート構造物を離れた場所から音響的な手段により探傷するシステムについて、その測定原理と実用化のための技術、及び基本性能の評価結果について述べた。

この探傷システムを2015年度中に実用化することを目指して、研究開発を続けていく。

文 献

- (1) 国土交通省 道路局. “道路トンネル定期点検要領”. 国土交通省ホームページ <<http://www.mlit.go.jp/common/001044575.pdf>>. (参照 2015-07-29).
- (2) 国土交通省 道路局. “道路橋定期点検要領”. 国土交通省ホームページ <<http://www.mlit.go.jp/common/001044574.pdf>>. (参照 2015-07-29).
- (3) 国土交通省 道路局. “総点検実施要領(案)トンネル編”. 国土交通省ホームページ. <<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/roadstock03.pdf>>. (参照 2015-07-29).
- (4) 西村 修 他. “コンクリート音響探傷システムの開発”. 平成27年度土木学会全国大会第70回年次学術講演会. 岡山, 2015-09. 土木学会, 2015, VI-121. (掲載予定).



西村 修 NISHIMURA Osamu

研究開発統括部 研究開発センター 機械・システムラボラトリー主任研究員。騒音音響振動の研究・開発に従事。計測自動制御学会, 日本音響学会, 土木学会会員。
Mechanical Systems Lab.



千星 淳 SENBOSHI Jun

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター プラントサービス・応用技術開発部主査。原子力プラントの非破壊検査分野の技術開発に従事。日本原子力学会, 日本非破壊検査協会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



下山 禎朗 SHIMOYAMA Sadao

生産技術統括部 生産技術センター メカトロソリューション推進部主任研究員。液晶、ストレージデバイス、及びエレベーターの製造装置の研究・開発に従事。
Mechatronics Engineering Solution Dept.



杉本 恒美 SUGIMOTO Tsuneyoshi, Ph.D.

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科教授, 博士 (工学)。超音波工学, 音響振動工学, 医用生体工学, 非破壊検査などの研究に従事。日本音響学会, 日本非破壊検査協会, 土木学会などの会員。
Toin University of Yokohama