

## M3 : maintenance/management/machinery

特集 道路における維持管理機械

# トンネル覆工打音点検システムの開発

小笠原 保・持丸 修一・田中 義光

トンネル覆工コンクリートの点検手法については、これまでも多くの研究開発や提案が行われているが、現場での適用性、信頼性やコストの面で未解決の問題が多く、人力による打音点検がまだ主流となっている。

本開発では、連続打音方式の打音発生装置と、打音解析装置を設計・製作し、これらの装置と支援装置とを移動可能な車輦に搭載することにより、トンネル壁面に対して実用レベルの打音点検作業が行えるシステムを開発した。

キーワード：非破壊検査，打音検査，音響解析，トンネル覆工，剥離，内部空洞

## 1. はじめに

近年、トンネルでは、コンクリートの剥離、落下が度々報告されており、異状部を精度良くかつ効率的に発見することのできる点検手法の確立が急務となっている。

トンネル覆工の内部異状を点検する手法については、これまでも多くの研究開発や提案が行われているが、現場での適用性、信頼性やコストの面で未解決の問題が多く、人力による打音点検がまだ主流となっている。また、落下の可能性がある剥離部は、緊急的に人力で叩き落としており、迅速かつ正確な点検技術と緊急対策手法の開発が求められている。

本報文では、これらのニーズに基づき、「叩く」ことで落下の可能性がある剥離や内部空洞を検知し、かつ剥離部を除去できる効率的な打音点検システムについて報告する。

## 2. システムの概要

本システムは、トンネル覆工に対して、人力での点検ハンマによる打音点検と叩き落とし作業を機械化したものであり、連続的に打音を発生させ

る打音発生装置と移動しながら調査を行うための懸架装置およびベースマシン、発生音をリアルタイムで解析する打音解析装置、粉塵回収用の機器類で構成される（図—1 参照）。

### （1）開発コンセプト

本システムの開発にあたり、以下の開発コンセプトを設定した。

- ① トンネルの打音点検作業の省力化、効率化、迅速化
- ② 連続打音点検法による定量的かつ客観的な評価
- ③ 点検記録のデータ化による経時変化の把握

### （2）打音発生装置

打音発生装置は、迅速な点検を目的として連続的に打音を発生させる装置であり、写真—1 に示すようにチェーンに繋がれた鋼球を回転軸に複数取付け、これを回転させながら適正な打撃力を構造物に加える機構とし、内部異状の検知と同時に表層の剥離部を叩き落とし、これを吸引して回収する機能も有する。

### （3）フローティング装置

図—2 に示すフローティング装置は、打音発生

装置を覆工面に適切な力で押しつけるとともに、緩衝機構により路面および覆工面の凹凸による位置変動（±10 cm）を吸収するものである。

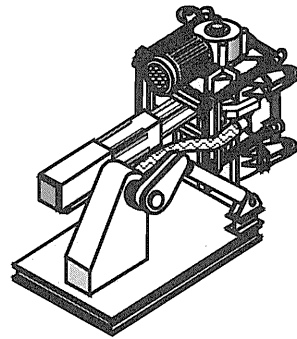
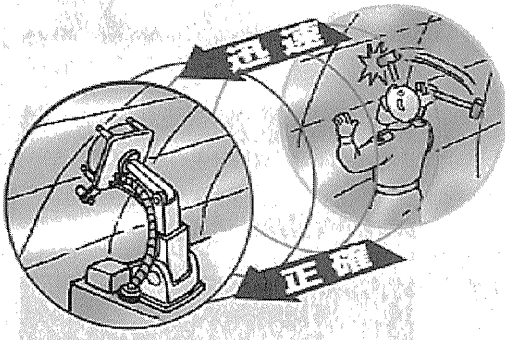


図-2 フローティング装置

(4) 打音解析装置

打音解析装置は、コンクリート表面を連続的に打撃して発生する連続打音の変化を、マイクで捉えて音響解析技術により分析し、コンクリート内部の欠陥を検出するものである。

音響解析技術としては、図-3のシステム構成に示すように、ノイズの多い環境下で異常音を検出するため、図-4に示すゆらぎフィルタ（ゆらぎ解析）を導入し、音圧波形から欠陥部を視覚的に判別するソフトを開発した。また、欠陥部に生じる卓越周波数の違いを迅速に把握するため、時

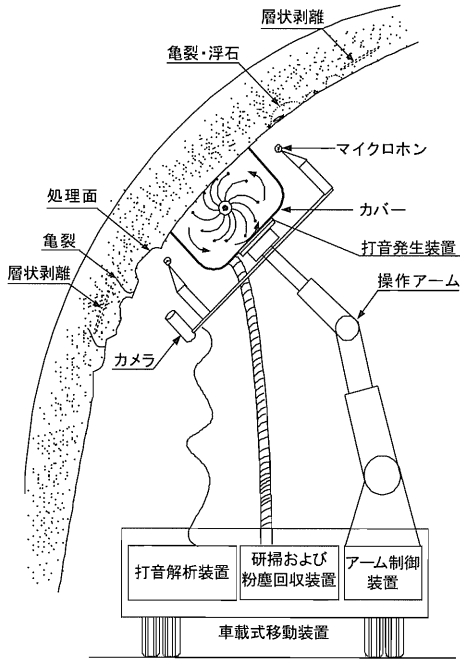


図-1 システムイメージ

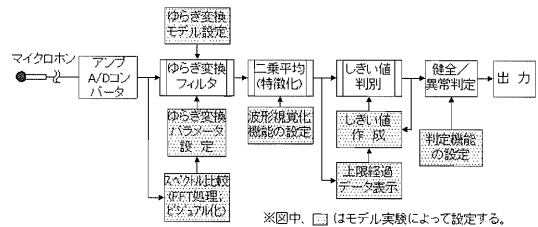


図-3 システム構成

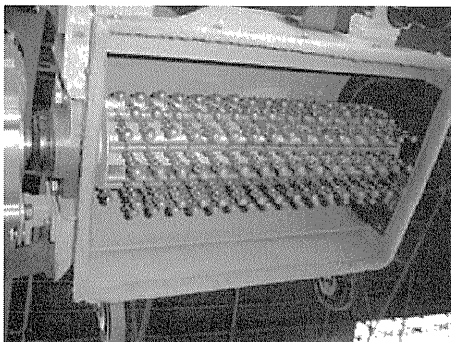


写真-1 打音発生装置

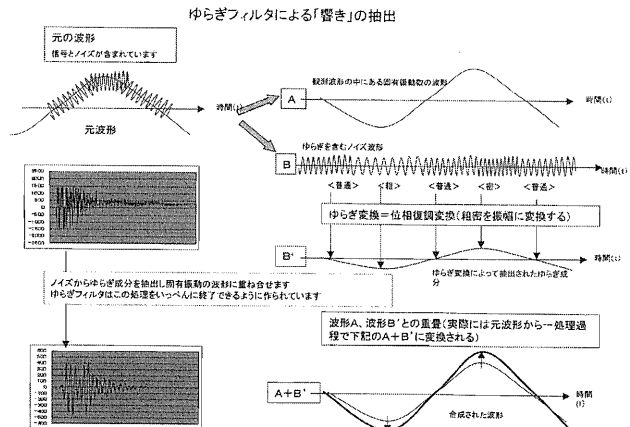
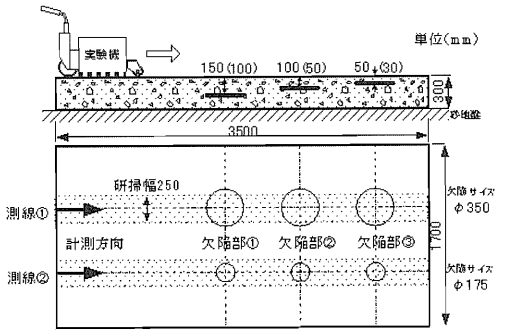


図-4 ゆらぎフィルタの概要

間-周波数解析ソフトを採用した。これによりノイズの多い環境下でも、特殊な防音設備を必要とせずに異状を検出することができる。

### 3. 基礎実験

実験装置の探査性能および研掃性能を検証するため、図-5に示すように覆工コンクリートの内部欠陥および表面の欠陥を模擬した供試体（圧縮強度 18 N/mm<sup>2</sup>，厚さ  $t=30$  cm）を製作し，基礎実験を実施した（写真-2参照）。



＜供試体の種類：5体＞  
 1)コンクリート内部欠陥(空洞、剥離、ジャンカ部)  
 2)コンクリート表面欠陥(脆弱部)  
 測線①は、欠陥サイズφ350mm  
 測線②は、欠陥サイズφ175mm  
 ( )は打音検査の領域を示す。  
 (・)内剥離部のかぶりを示す

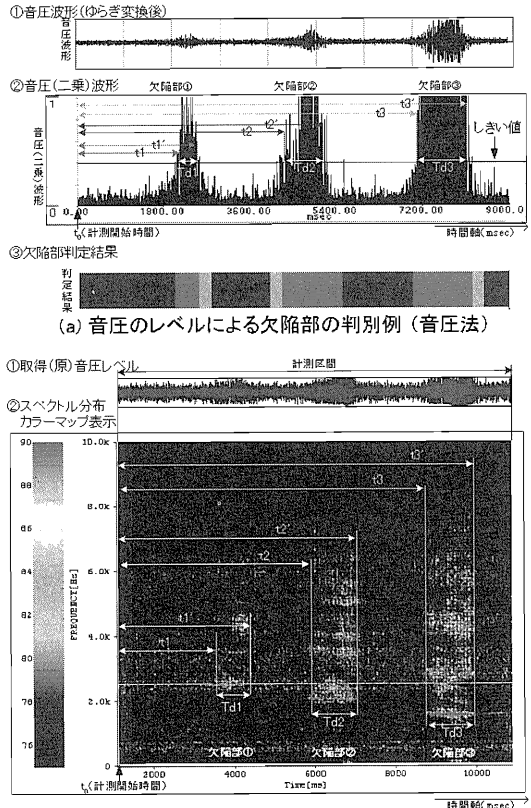
図-5 供試体レイアウト



写真-2 基礎試験状況

打音解析システムで、音圧波形から欠陥部（剥離部φ350）を判別した結果および「時間-周波数解析」の例を図-6に示す。

欠陥部においては発生音圧が大きくなることから、あるしきい値を超える音圧が得られる箇所に欠陥が有ることを迅速に判断できる。また、連続



(b) 卓越周波数による欠陥部の判別例(T-FFT法)

図-6 剥離を有する供試体の打音解析結果例

打音検査法によれば、探査速度 30 m/min において、人力の打音点検とほぼ同等の判別性能が得られ、点検装置としての有効性が確認できた。また、研掃性能についても、探査速度を 3.0 m/min 以下に設定すると、剥離部の研掃が十分可能であることが判った<sup>1),2)</sup>。

### 4. 実証機による適用性試験

#### (1) 実証機の概要

前述した各装置をベース車両に搭載した実証機を開発した。表-1に主要仕様を、図-7に構成を示す。

実証機は、打音発生装置等を高所作業車の作業台に搭載したトンネル点検車と、研掃片（叩き落とした劣化部）の集塵装置，発電機および打音解析装置を搭載した支援車（一般的なカーゴクレーン車）を、図-7に示すように連結して作業する。写真-3に打音発生装置の搭載状況を示す。

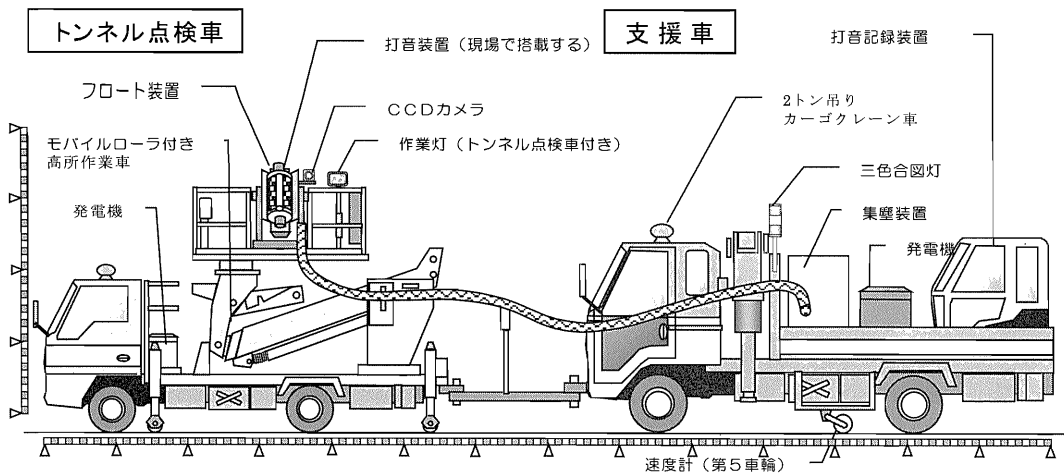


図-7 実証機の構成

表-1 実証機の主要仕様

種別	機器の仕様・機能				
トンネル点検車	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存の高所作業車の作業台に打音発生装置、フロート装置を搭載</li> <li>車体：モバイルローラ搭載（3tシャーシ）</li> <li>トンネル縦断方向に最大2km/hで検査可能</li> </ul>				
支援車	<ul style="list-style-type: none"> <li>2トン吊りユニック車（現有車輛）を使用</li> <li>集塵装置、発電装置、速度・距離計、解析装置用キャビンを搭載</li> </ul>				
打音発生装置 (図-1)	<p>チェーンに繋がれた打撃部（鋼球）を回転軸に複数取付け、これを回転させながら適正な打撃力を構造物に加える。</p> <table border="1"> <tr> <td>①打撃部</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>鋼球サイズ φ15 (H. R. C. 58)</li> <li>玉の取付け；円周8等分</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td>②回転部</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>点検（研掃）幅；500mm</li> <li>回転径；φ300mm</li> <li>回転数；200~400rpm</li> </ul> </td> </tr> </table>	①打撃部	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼球サイズ φ15 (H. R. C. 58)</li> <li>玉の取付け；円周8等分</li> </ul>	②回転部	<ul style="list-style-type: none"> <li>点検（研掃）幅；500mm</li> <li>回転径；φ300mm</li> <li>回転数；200~400rpm</li> </ul>
①打撃部	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼球サイズ φ15 (H. R. C. 58)</li> <li>玉の取付け；円周8等分</li> </ul>				
②回転部	<ul style="list-style-type: none"> <li>点検（研掃）幅；500mm</li> <li>回転径；φ300mm</li> <li>回転数；200~400rpm</li> </ul>				
フロート装置 (図-2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>打音発生装置を把持したアームを動かし、トンネル壁面に追従させる</li> <li>アーム可動範囲                         <ul style="list-style-type: none"> <li>アーム傾斜角度：0°（水平）~100°</li> <li>アーム伸縮範囲：±10cm</li> </ul> </li> </ul>				
打音解析装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>打音検査中に異常音部をリアルタイムで検出・表示する</li> <li>検査対象壁面の画像を解析装置オペレータが確認・録画</li> </ul>				
集塵装置	1.5cm角以下のコンクリート片を吸引可能				
発電装置	電源電圧・容量：200V/100V，60Hz，25kVA				
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>対象トンネルの最大，最小寸法：4.5~7.0m</li> <li>アプローチ部曲率半径；R=3.5~6.0m</li> </ul>				



写真-3 打音発生装置の搭載状況

を黄色，変状部を赤で示すよう調整している。変状調査書に記載されている浮き，剥離および目地部の浮き等の位置でマップ上に黄色，赤色が検出され，本システムによって検出された異常音箇所が変状調査書に記された欠陥部とほぼ一致してい



写真-4 Kトンネル (5測線)

(2) 適用性試験結果

実証機により実トンネル3現場（写真-4~写真-6）において適用性試験を実施した。

図-8に打音点検システムによる音圧レベルの差から，健全度判定マップを作成し，既存のトンネル変状展開図と比較した例を示す。

健全度判定マップは，健全部での音圧のキャリブレーションを施し，変状部の可能性がある箇所

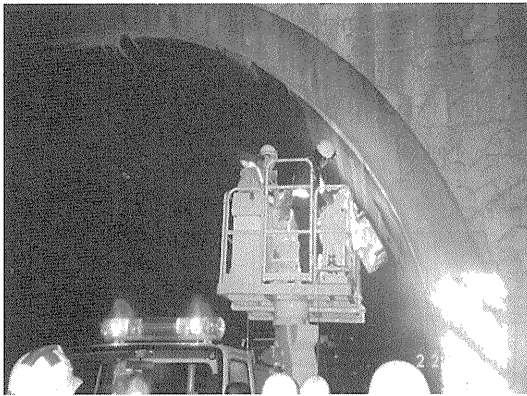
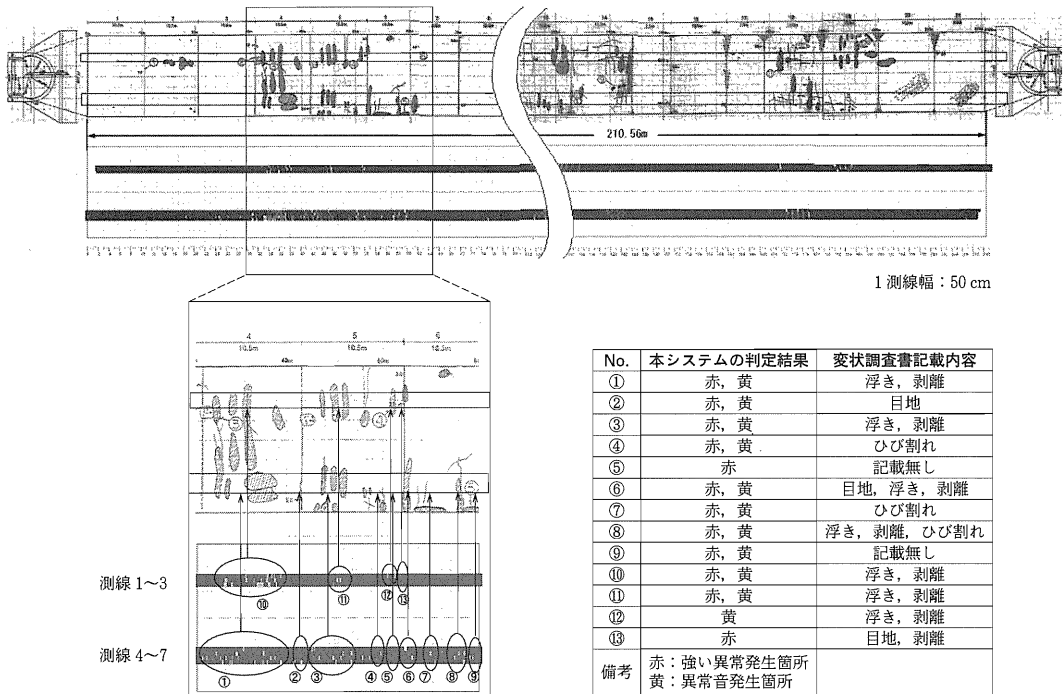


写真-5 Oトンネル (7測線)



写真-6 Tトンネル (10測線)



1 測線幅：50 cm

No.	本システムの判定結果	変状調査書記載内容
①	赤, 黄	浮き, 剥離
②	赤, 黄	目地
③	赤, 黄	浮き, 剥離
④	赤, 黄	ひび割れ
⑤	赤	記載無し
⑥	赤, 黄	目地, 浮き, 剥離
⑦	赤, 黄	ひび割れ
⑧	赤, 黄	浮き, 剥離, ひび割れ
⑨	赤, 黄	記載無し
⑩	赤, 黄	浮き, 剥離
⑪	赤, 黄	浮き, 剥離
⑫	黄	浮き, 剥離
⑬	赤	目地, 剥離
備考	赤:強い異常発生箇所 黄:異常音発生箇所	

図-8 既存トンネル変状展開図と本システムによる健全度判定マップの比較例 (Oトンネル)

ることが確認できた。また、施工能力は約 1,000 m<sup>2</sup>/h が実証でき、本システムは従来の他の点検方法と比べると飛躍的に施工能力が向上したものと見える<sup>3)</sup>。

### 5. 技術的課題の抽出と改善策の検討

実証機による実トンネルでの適用性試験結果から、本点検システムの作業・操作性をさらに向上させるためには、図-9に示すように各装置の小型・軽量化を図り、全ての装置を専用車両1台に

搭載することが必要である。また、作業範囲拡大のため、ブーム取付け位置等を改良する必要がある。

### 6. おわりに

本システムは、トンネル点検において、欠陥部の検出がこれまでの人力打音検査と同等かつ施工能力では飛躍的に向上することが明確となった。

これにより、危険と苦渋を伴う人力での高所作業を削減させ、また点検員の技量によらない定量

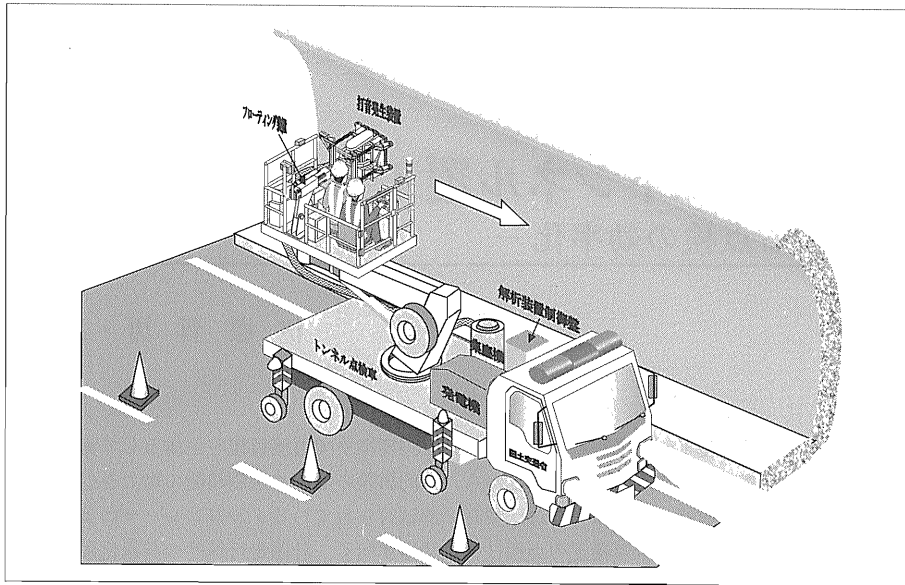


図-9 実用機イメージ図

的かつ客観的な評価ができる。

また、トンネル点検記録のデータベース化を進めることで欠陥箇所を経年変化が把握できる。

平成14年度は、本調査結果を取入れたトンネル点検車の実用機を導入し、効率的なトンネル点検に資する予定である。

最後に、本打音点検システムの開発にあたりご協力頂いた社団法人日本建設機械化協会建設機械化研究所ならびに、関係各位の皆様へ誌面をお借りして、感謝の意を表すものです。 J C M A

《参考文献》

- 1) 持丸修一，ほか：コンクリート構造物の連続打音点検システムの開発，土木学会第56回年次学術講演会論文集，2001年10月
- 2) 持丸修一，ほか：トンネル覆工打音点検システムの開発，第24回日本道路会議論文集，2001年10月
- 3) 小笠原 保，ほか：トンネル覆工連続打音点検システムの開発，土木学会第57回年次学術講演会論文集，2002年9月

【筆者紹介】

小笠原 保（おがさわら たもつ）  
国土交通省関東地方整備局  
関東技術事務所  
副所長  
（現、中国地方整備局道路部機械課長）



持丸 修一（もちまる しゅういち）  
国土交通省関東地方整備局  
関東技術事務所  
機械課長



田中 義光（たなか よしみつ）  
国土交通省関東地方整備局  
関東技術事務所  
機械課専門職  
（現、企画部技術調査課建設専門官）

