

23. トンネル覆工コンクリート打音診断機の開発 ～トンネルドクター‘ソニック マイスター’の開発～

大成建設㈱：*須田 健、平野 逸雄、
鈴木 隆次

1. はじめに

トンネル覆工コンクリート健全性の診断は、点検ハンマーによる打音の他、レーザーや写真撮影によるクラック分布の調査、超音波によるクラックや覆工厚調査および電磁波等による覆工厚や背面空洞調査等の非破壊検査技術を用いて行われている。

これらの診断技術のうち、点検ハンマーによる打音診断は、コンクリートの剥落につながるような欠陥部を検出できる方法であり、多くの機関で定期点検時にこの方法を用いることが推奨されている。しかし、点検ハンマーによる打音診断は人力による作業であり、個人差が生じ定量的な判断が困難で、記録にも残らないという欠点がある。また、作業環境の悪いトンネル内で、長時間の作業を余儀なくされるなど問題点が多く、打音診断を客観的かつ迅速に行う技術の開発が求められていた。

筆者等は、車に搭載したロボットの先端に、5個の打撃装置と打音収録装置を取り付けた打音診断機を開発した。本装置は、油圧駆動の打撃ハンマーで打音を発生し、トンネル覆工コンクリートから発生する反射音を、人間の聴覚アルゴリズムを利用した手法により解析し、コンクリートの健全性を「早く・確実に」診断するものである。

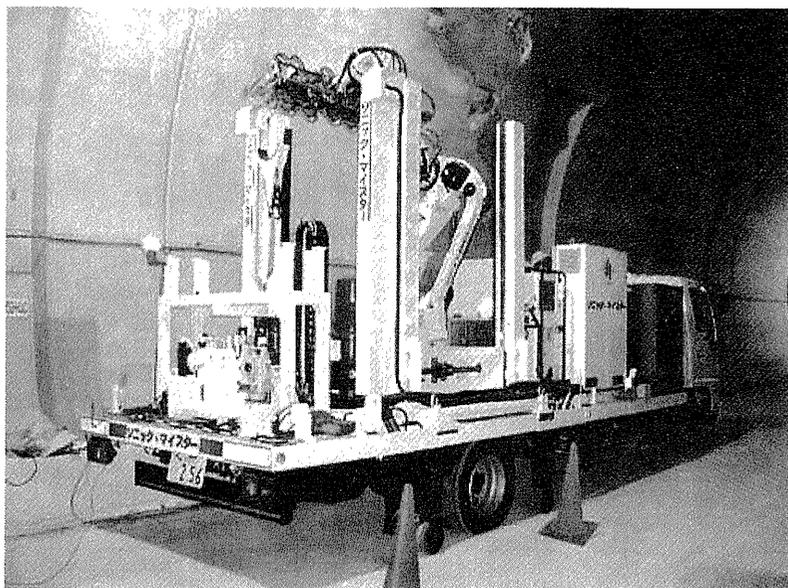


写真-1 打音診断機『ソニック・マイスター』

2. システムの構成

打音診断機は、図-1 に示すように、ベースマシンとなる 8 tトラック、打音位置を測定する障害物位置確認装置と自動距離測定装置、打音を発生させる打音装置、打音ユニットを診断位置へ移動させるアーム式ロボット、トンネル断面に応じてアーム式ロボットを上下に移動させる昇降装置、これらを制御するコンピュータユニットから構成されている。

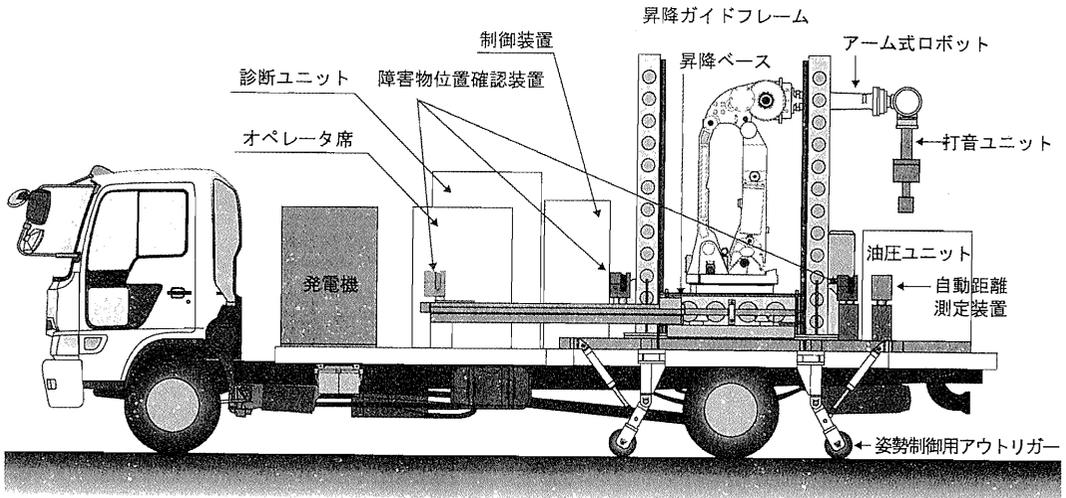


図-1 システム構成図

2.1 ベースマシン

ベースマシンは、測定場所へ自走可能で、移動しながらの診断作業を行なうため、8 tトラックに特殊儀装した。最終車両寸法は、幅 2.43m×長さ 8.48m×高さ 3.65m で一般公道を規制なく運行できる寸法である。

2.2 打音位置測定装置

打音位置は、レーザー光により横断方向を測定する内空断面計測装置と、縦断方向を測定する自動追尾型測距装置を組合せ、三次元位置データとして検出する。

断面測定器は、打音ユニットを装備したアーム式ロボットの前後に設置し、打音診断作業中のセンサー空き時間を利用し、次の打音範囲の詳細測定を行う。この測定により、断面形状や障害物を事前に検知し、ロボットの動作計画を短時間でこなせるようにしている。位置測定結果は、オペレーター席のパソコン上に表示される。図-2、図-3 に位置測定概要を示す。

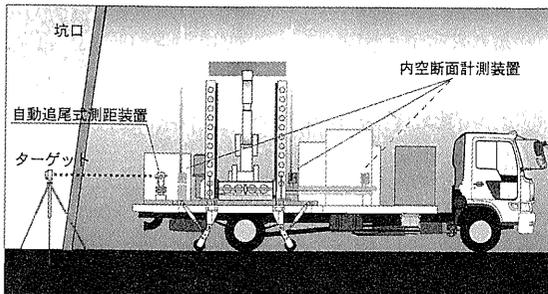


図-2 トンネル縦断方向位置測定の概要

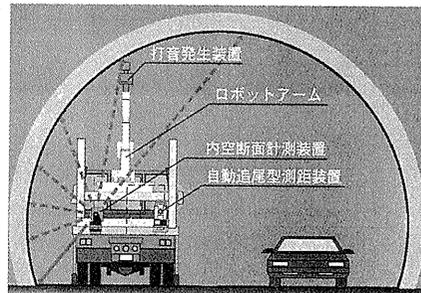


図-3 トンネル横断方向位置測定概要

2.3 アーム式ロボット

打音ユニット移動は、診断、障害物回避等の動作速度等を考慮し、汎用の大型アーム式ロボットを採用した。また、昇降装置の装備により、アーム伸縮で対応できない高さ方向エリアの診断可能にした。これにより、道路トンネル技術基準（2級～4級）の断面診断が対応できるようになった。更に、システムの姿勢安定を確保するため、油圧従輪式アウトリガーを装備した。

3. 打音診断の方法

3.1 打音装置

打音装置は、写真-2に示すようにフード内に打撃装置とマイクロフォンが一体に装備されている。打撃ハンマーは、音源ノイズが極力発生しないように、油圧で作動する方式となっている。音の収録装置であるマイクロフォンを打撃装置と分離して、なるべく覆工コンクリートからの音のみを収録する方式も考えられる。しかし、人間による打音診断では、ハンマーからの音も同時に聞いて判断しているので、本装置では打撃装置とマイクロフォンを一体化してコンパクト化を目指した。

この打音装置は、写真-3に示すように30cm間隔に5個装備しており、0.2秒間隔で順次打撃し、打撃音を収録するようになっている。

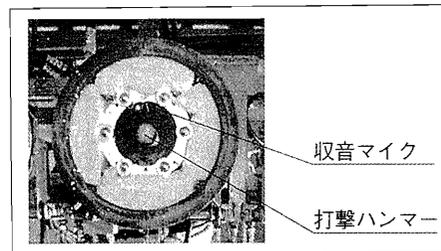


写真-2 打音装置

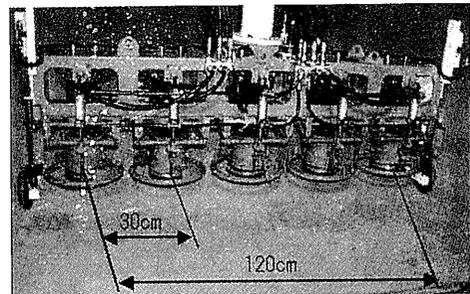


写真-3 打音ユニット

3.2 打音の収録方法

打音装置は、図-3に示すように、制御装置、打音ユニット、診断ユニットおよびメモリから構成されている。まず制御装置から打撃ユニットおよび診断ユニットに制御信号を送る。その信号により打撃ユニットでは油圧電磁弁を開きシリンダーに油圧を作用させて打撃を行う。また、診断ユニットでは同時に打音の収録を開始する。メモリはマイクロフォン出力がトリガーしきい値を超えた時刻から5msecさかのぼって100msec間の打撃波形を記録する。

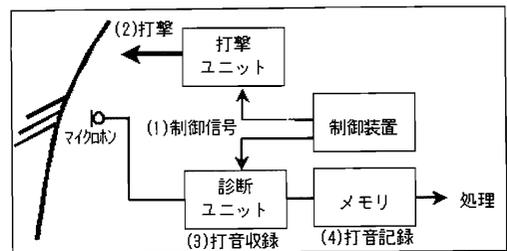


図-3 打音装置原理

3.3 打音診断の解析方法

図-4は、厚さ40cmのコンクリートとその内部に空洞を設けた剥離モデルを打撃したときの打音の例である。図から分かるように、コンクリートの不健全部は、健全部よりも音圧レベルが高く、減衰が遅い特徴がある。また、周波数では、400～5kHzにおいて健全部と不健全部に差異がみられた。この傾向は、複数の補修トンネルにおける現場実験においても同様な結果を得

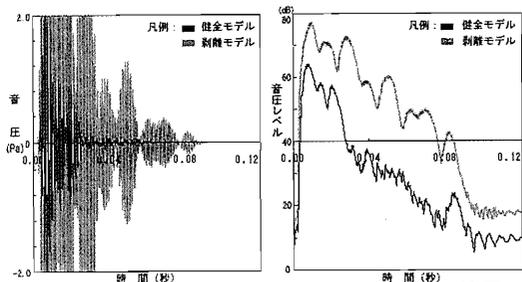


図-4 健全部、不健全部打音波形の差異

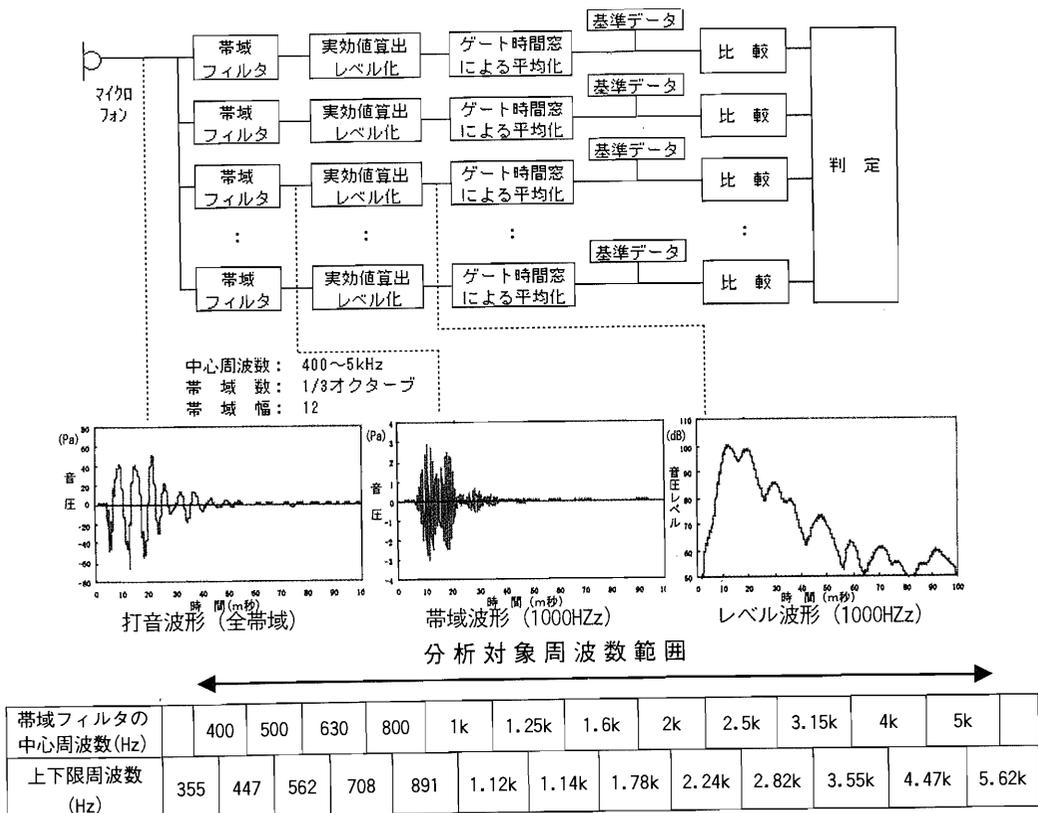
ている。これらの知見および以前に開発を行った「タイル剥離診断システム」^{1),2)}での診断方法を参考にし応用した、「時定数関数を用いたバンド別評価法」により空洞・剥離を評価する方法を採用した。

その方法は以下のとおりである。

収録した打撃音は、1/3 オクターブバンドの帯域フィルタ処理を行い、各帯域での実効値レベル化を行う。そして、ゲート時間窓により実効値レベルの平均化を行う。そして、平均化した実効値レベルの最大値を健全域の基準データと比較して、「健全域」、「中間域」および「不健全域」の判定結果を出力する。

打音判定の基本的な考え方としては、健全部の打音結果と異なる結果が得られた箇所が不健全部と判定する。しかしながら、トンネル覆工コンクリートには、健全部と不健全部が明確に分離されているとはいえない。人間による打音判定では、経験的に分類しているのが現状である。本システムでは、明らかに健全もしくは不健全と判定できる領域の他に、健全とも不健全とも判定できない領域として中間域を設定している。

打音診断は一次診断であり、より詳細な二次調査が必要な箇所の抽出するための診断であるため、不良箇所を見逃さないためにも「中間域」を設けている。



図ー5 打音診断における打音波形処理方法と打音波形の例

4. システム出力

出力は、「作業用表示（オペレーター確認画面表示）」と診断作業後の「診断判定結果出力」の2種類がある。診断中のデータは、オペレーター席に配置した診断結果表示用のコンピュータで、診断値や診断結果マップを写真-4のように随時スクロール表示できる。診断結果の出力には、以下の4種類がある。

- ① 打設スパン別診断結果展開図（図-6 参照）
- ② トンネル全体診断展開図
- ③ 診断結果数値一覧表
- ④ 健全部基準データ測定結果

データは全て電子データで保管し、必要に応じて出力形式の変更も可能である。また、データの詳細分析を実施する目的で、測点における「収録音データ」も電子データ化して保存する機能を備えた。

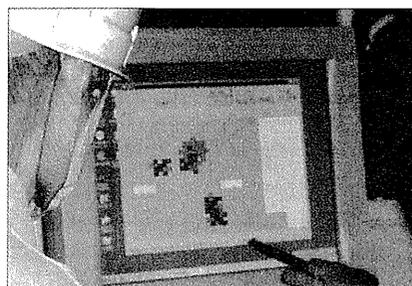


写真-4 診断中画面出力

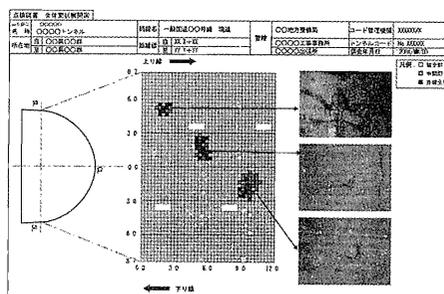


図-6 スパン別診断結果出力例

5. 作業手順

基本的に診断作業は、作業指揮者（コンクリート診断士程度の能力を有する経験者）、オペレーター、運転手の3名で行う。診断システムの操作は、オペレーター席操作盤に設置された、メインコンピュータのタッチパネル画面で行う。

診断作業の手順を以下に示す。

5.1 調査トンネルへ移動

- ・ 車輛の姿勢安定用アウトリガー従輪を引き上げ、測定場所へ移動する。

5.2 準備作業

- ・ 人力打音検査により基準とする健全箇所を選定する。
- ・ トラックエンジンによる一般走行モードから、診断用電動モータ走行に切り替える。
- ・ 距離測定および、断面測定装置をセットする。
- ・ 人力打音検査で選定した健全箇所へ車両を移動する。
- ・ 健全箇所をシステムで診断・解析し、基準データとして記憶する。（確率統計処理手法による）
- ・ 位置情報、基準データおよびトンネル情報（延長、幅員等）を入力する。

5.3 診断開始

- ・ トンネル診断開始位置へ移動する。
- ・ 断面測定装置へ、測定範囲を教示する。
- ・ 自動運転による打音診断・リアルタイムの結果表示。
- ・ 1スパン診断後、電動モータにて車輛を1.5m自動前進させる。

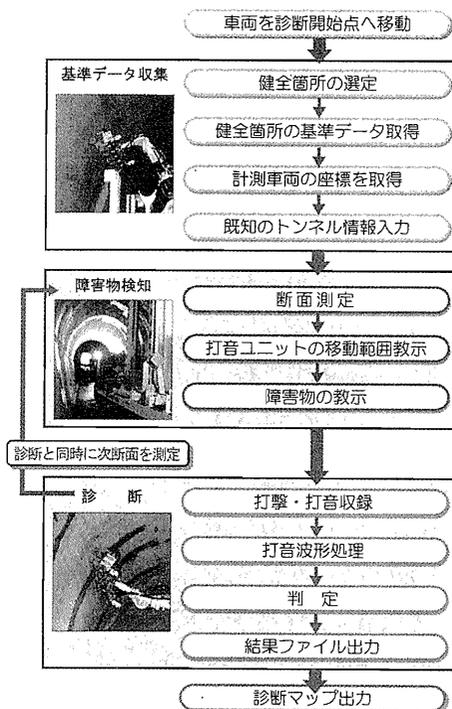


図-7 現地における診断フロー

※) 上記作業の繰り返し

5.4 診断終了

- ・診断マップ、診断結果リストを出力する。

6. 検証実験

本システムの動作確認と打音結果の評価について、実トンネルにおいて検証実験を行った。打音評価については、人力による打音検査結果と、本システムの評価結果は比較的良く一致しており、本評価方法の有効性が認められた。なお、評価結果をより確実なものにするために、多くのトンネルでのデータ蓄積を行って行く予定である。

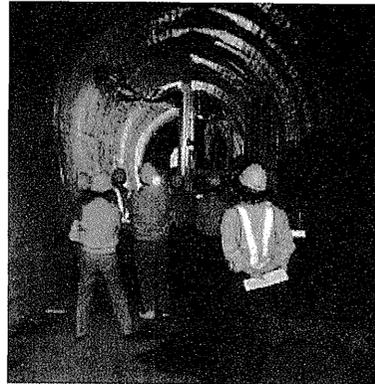


写真-5 実証試験状況

本システムの動作については、

- ① 障害物の検出機能は有効に作動しており、確実に障害物を回避できることが確認できた。
- ② 本装置の適用範囲は、道路トンネル技術基準の2～4級のトンネルは確実に調査でき、トンネルの最大高さ7.4mまで調査できることが確認できた。
- ③ 診断速度は、1横断19回(30cmピッチ)×0.45㎡であるトンネル断面を4横断診断したところ、301秒(平均75秒/1横断)で診断が完了し、本システムの最高診断スピード400㎡/hを満たすことが確認できた。このスピードは人力作業による診断の3～5倍の早さである。

7. まとめ

本システムの特徴は以下の通りである。

- ① 収録音を周波数毎の音圧レベルから解析する。
- ② 5個の打音装置による複数箇所の連続診断で、最大400㎡/hの作業が可能である。
- ③ 油圧ハンマーの採用により、一定エネルギーでの打撃が可能である。
- ④ 診断と同時に判定結果が表示できる。
- ⑤ 障害物の自動回避機能があるので、診断作業を効率よく行うことができる。
- ⑥ 打撃音の生データの保存が可能である。

本システムは、最終調整を行い、本年度中には本格稼働する予定である。

今後、診断データの蓄積、診断結果を他の診断手法と照合・検証することで、システムの信頼向上に努め、既設トンネルの点検業務・新設トンネルの品質確認に活用する予定である。

また、コンクリート表面画像の同時取り込みシステム、剥離箇所の自動マーキングシステム等の機能を増やすことで、より高度な打音診断システムを目標に、開発を継続していく予定である。

参考文献

- 1) 海老原正明：打音による壁面診断技術の開発、第2回建築施工ロボットシンポジウム、1988
- 2) 海老原正明他：打音解析による剥離診断装置、日本建築学会学術講演会(近畿)、1987