

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—

川上 純・須田 健

トンネル覆工コンクリートの点検手法は、これまでに電磁レーダ、サーモグラフィ、超音波探査等、多くの手法が提案されてきた。しかし、コスト面で高いこと、処理に時間がかかる等のため、現在は人力による打音診断が主流となっている。人力による診断は、劣悪作業条件下の苦渋作業を余儀なくされ、結果が作業者により異なり、統一判断の結果が残らない問題点がある。

本システムは、打音診断を機械化による自動化で、機動性と高速性及び、定量的な判定結果のデータベース化を可能とした。

診断結果は、診断終了と同時に診断マップとして出力が可能であり、2次診断必要性の判断材料として提供が可能である。

キーワード：非破壊検査、トンネル、打音診断、機械化、省人化

1. はじめに

トンネル覆工コンクリートの健全性の診断は、点検ハンマによる打音の他、レーザ、超音波、電磁波等の非破壊検査技術を用いて行われている。筆者等は^{1),2)}これまで、電磁波による構造物内部診断システムなど、種々のコンクリート診断技術を開発している。

これらの診断技術のうち、点検ハンマによる打音診断が最も簡便で診断速度が早く、この手法が推奨されている。しかし、点検ハンマによる人力打音診断は、個人差が生じ定量的な判断が困難で、統一された記録が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機械的に行う技術の開発が求められていた。

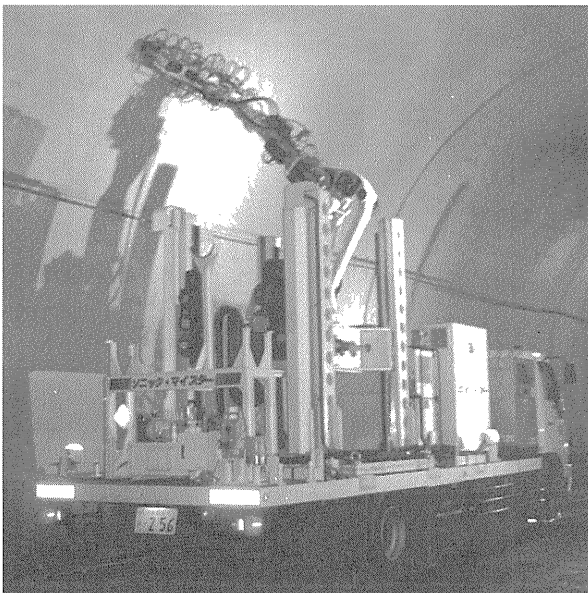


写真1 打音診断機「ソニック・マイスター」

今回開発した打音診断機（写真1）は、油圧駆動の打撃ハンマで打音を発生し、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。

この打撃装置を用いることで、コンクリート表面を一定のエネルギーで打撃することが可能となり、ハンマ近傍からのノイズの影響を受けることなく正確な診断が可能となった。

2. 打音診断の原理

打音室内実験や、複数の補修トンネルにおける現場試験を実施し、収録打音から以下の基礎的知見を得た。

- ① 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。
- ② 周波数特性において、400～5,000 Hzにおいて健全部、不健全部に差異が見られる（図1）。

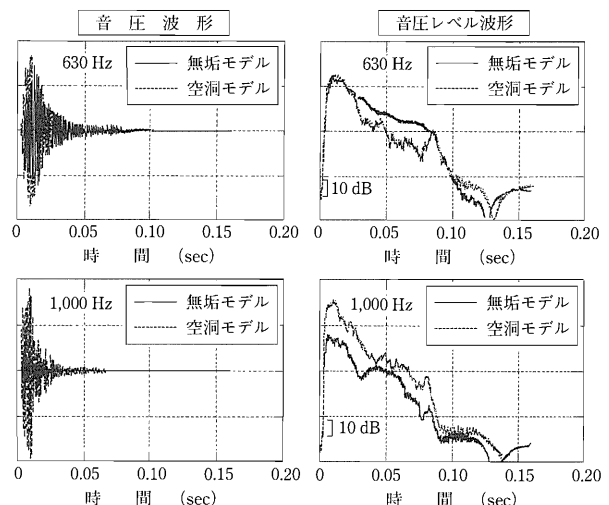


図1 健全部、不健全部打音波形の差異

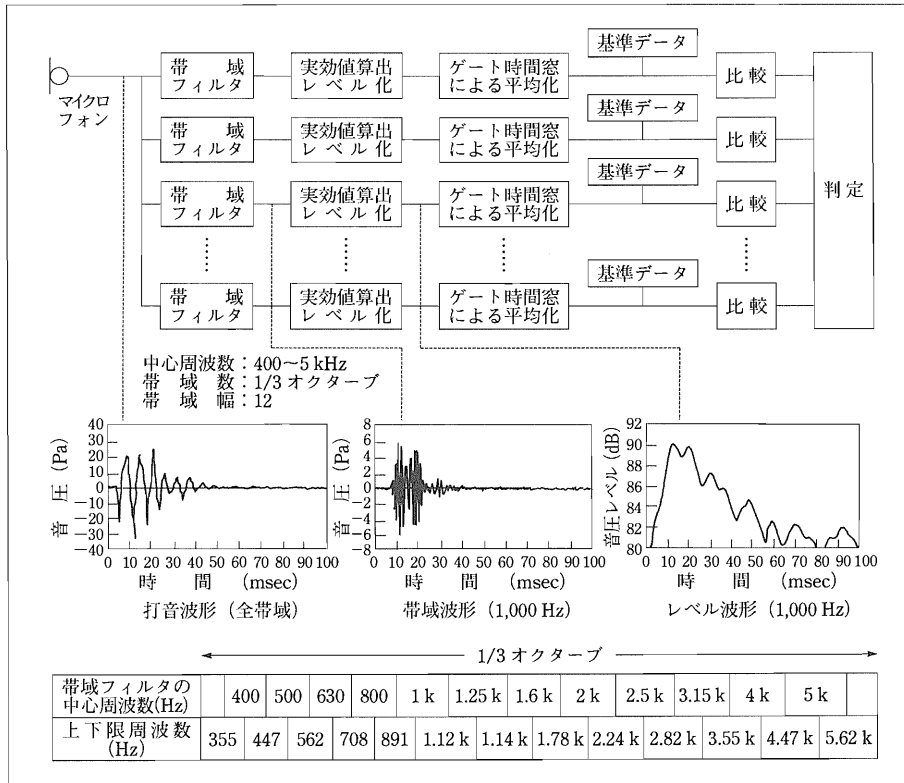


図-2 時定数関数を用いたバンド別評価法

これらの知見および、タイル剥離診断システム^{3),4)}を基本として「時定数関数を用いたバンド別評価法」(図-2)により空洞、剥離を診断している。

判定は、健全部を基準データとし、発生する音圧レベルの差異による判定を行っている。

3. システムの特長

本システム(図-3)は、道路トンネルを対象とした一次診断システムである。覆工コンクリート表面の危険箇所である剥離や空洞等を発見、その場で確認し、診断データを残すことをコンセプトとして開発した。診断作業は、

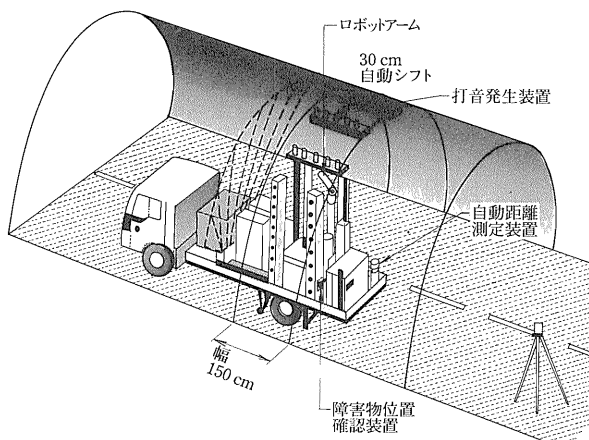


図-3 システム概念図

30 cm 間隔で配置した5連式油圧ハンマにより、トンネル横断方向に30 cm、縦断方向へ幅150 cmピッチの自動運転で計測し、診断結果から覆工コンクリートの表面部の健全度を「健全域、中間域、不健全域」の3区分に判定し、診断展開マップを作成する。その特徴を以下に示す。

- ① 打音解析は、人力で行う診断を考慮し、収録音を人間の聴覚判断機能に近いデジタル信号処理で判断する。
- ② 打撃力安定化のため、打撃回数制御可能油圧ハンマを開発採用。
- ③ 5個の並列ハンマで0.2秒毎に各1回の打撃。直後0.1秒間の収録音を音圧レベルと減衰特性で解析。
- ④ 大型汎用アーム式ロボット採用。30 cm格子点上を連続自動打音診断し、最大約400 m²/hの作業効率を実現。
- ⑤ 診断結果は、断面測定器と自動追尾測距儀情報より打撃位置作成。診断マップ・リストの即時確認が可能。
- ⑥ 障害物(照明器具、排気設備等)は診断中に並行し、次スパンの詳細断面測定を実施。この情報により自動回避を実現。
- ⑦ 診断結果を電子情報で保存。図表出力、他地点との比較、同一地点の経年変化比較に利用が可能。
- ⑧ 実音データ保存が可能。診断状況の再現、新解析法への測定データ活用が可能。

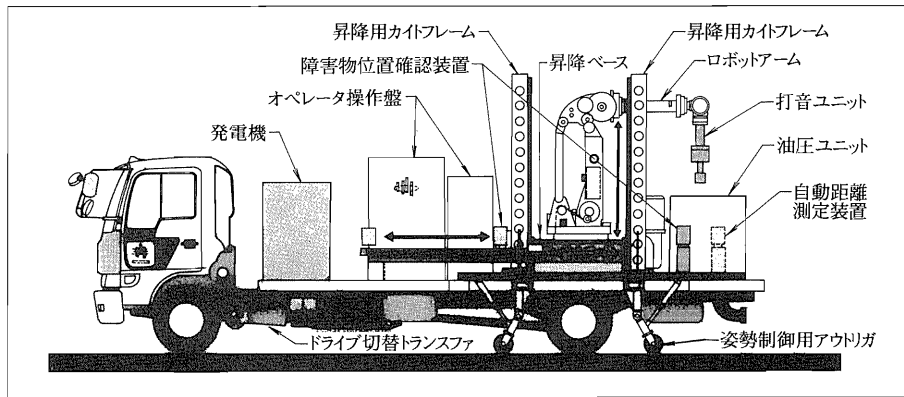


図-4 システム構成図

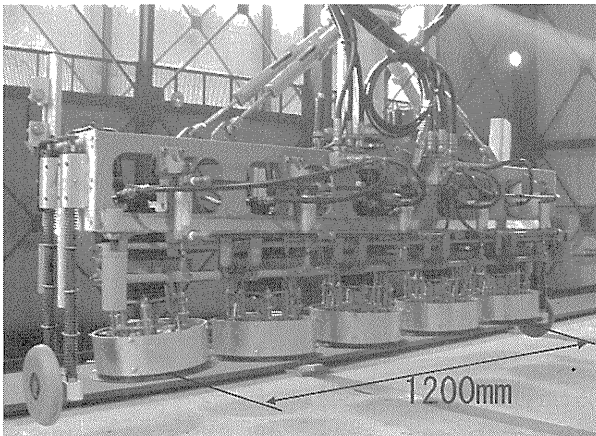


写真-2 打音装置

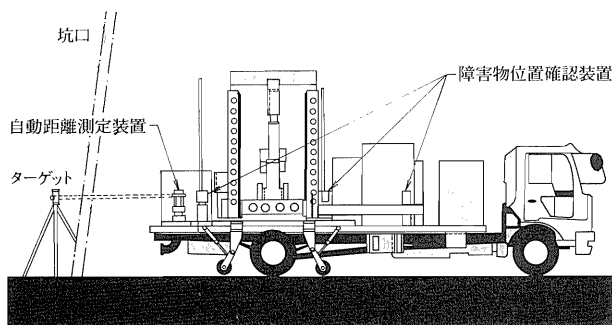


図-5 位置測定概要 (側面図)

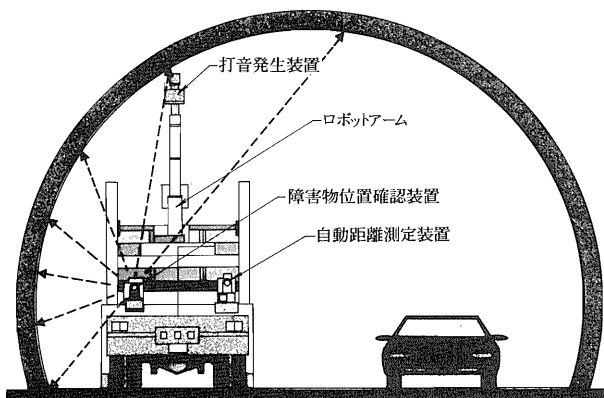


図-6 位置測定概要 (背面図)

4. システムの構成

診断機は、ベースに8tトラックを利用した。

- ・打音位置測定（障害物位置確認装置、自動距離測定装置）、
 - ・打撃ユニット（打音発生装置、受音装置）、
 - ・アーム式ロボット（ユニットを打音位置へ移動）、
 - ・昇降装置、
 - ・コンピュータユニット（全ユニットの制御）、
- から構成されている（図-4）。

(1) 打音装置

打音装置は、音源ノイズを除去する目的で、油圧式ハンマを採用した。打音ユニットは、診断速度を上げるため、5連装の打撃装置（間隔30cm×長さ150cm）を採用した。

個々の装置の中にはハンマとマイクロフォンが一体に装備されている。この装置を用いて0.2秒間隔で順次打撃し、打撃音を収録する（写真-2）。また、壁面に対し、打撃装置を均一の力で支持するため各装置を連通管でつないだ。また、壁面に垂直に押付け可能とするため、調芯機能（足の先端をローラで支持）を持たせた。

(2) ベースマシン

ベースマシンは、測定場所へ自走可能で、移動しながら診断作業を行うため、8t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。

(3) 打音位置測定装置

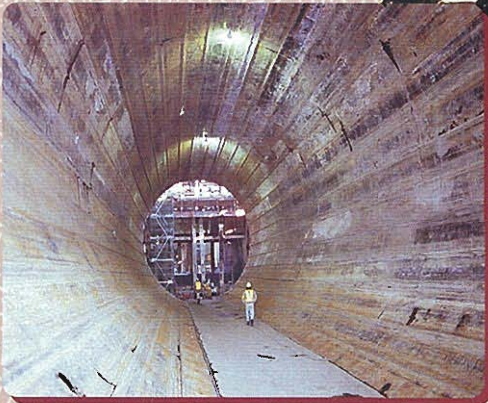
打音位置は、断面センサ（障害物位置確認装置）により横断方向を測定し、縦断方向を測定する自動追尾型測距装置の距離データを組合せ、三次元打撃位置データとして位置検出をする（図-5、図-6）。

線路直下での 円形大断面トunnelの施工

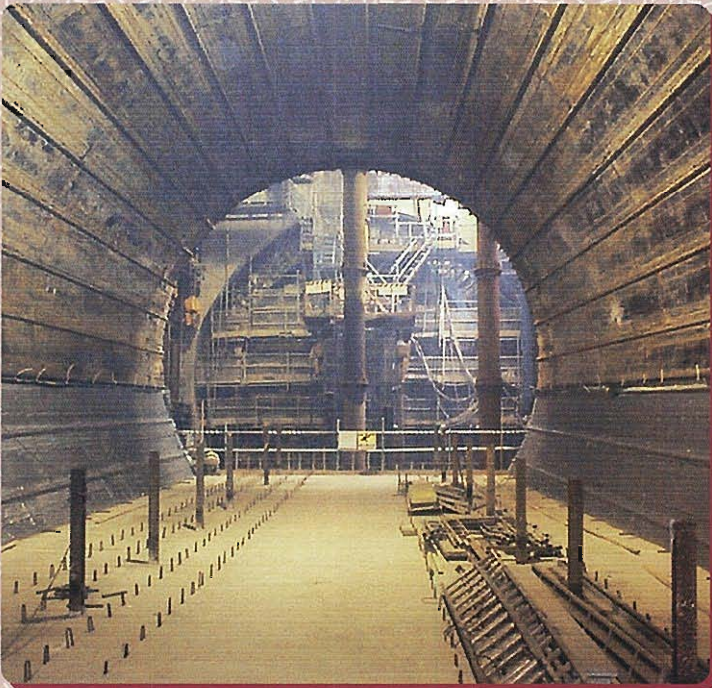
施工途中全景⇒



⇩ 鋼製エレメントけん引敷設



⇩ 完成状況



⇩ インバート打設



⇩ 施工完了

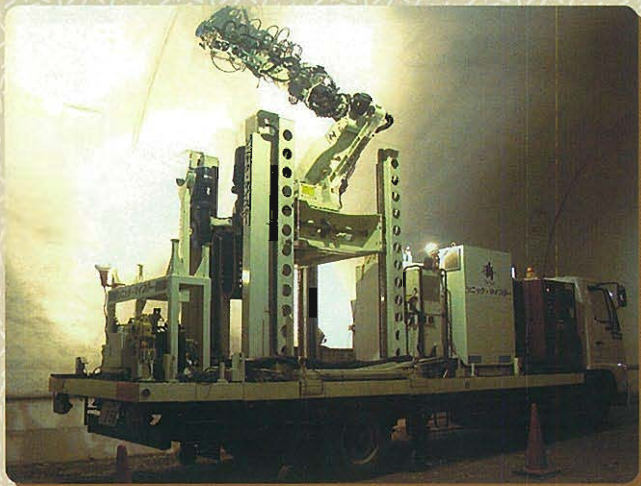
トンネル覆工コンクリート 打音診断機の開発



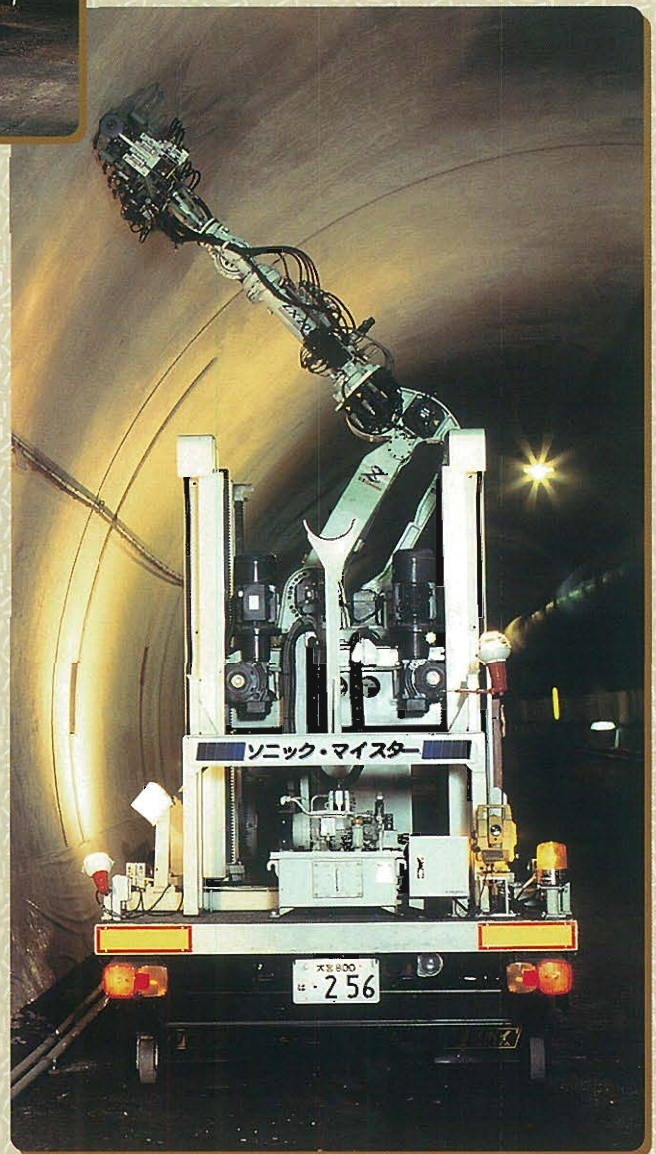
⇩ 打音診断機運搬姿



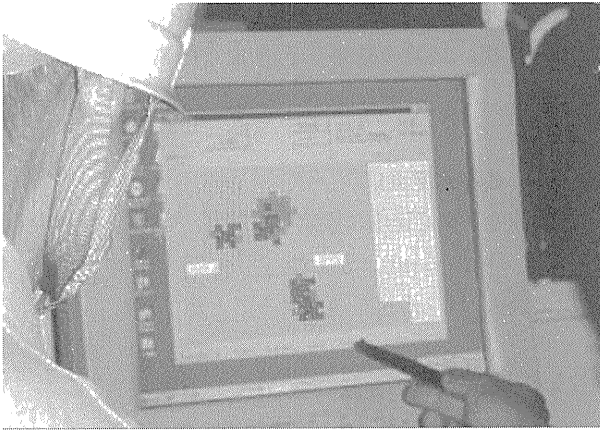
⇩ 打音診断機全景



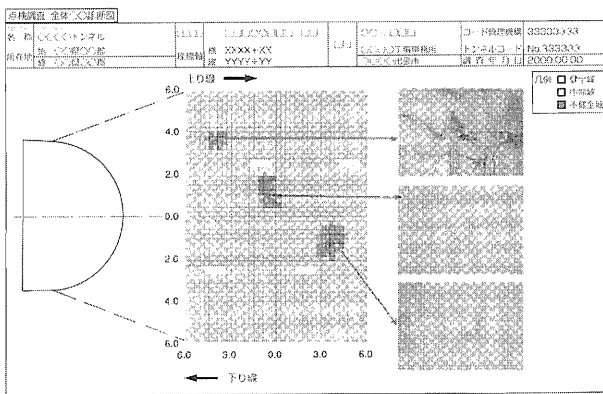
⇩ 打音診断作業



⇩ 打音診断機後姿



写真—3 診断中画面出力



図—7 スパン別診断結果出力例

センサは、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、打音診断作業の時間を利用して、次の打音範囲の詳細測定を行い、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できるようにしている。位置測定結果は、オペレータ席のパソコン上に表示される。

(4) アーム式ロボット

打音ユニットの移動は、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、姿勢安定を確保するため、油圧従輪式アウトリガを装備した。

また、アーム伸縮で対応できない高さ方向に昇降装置を装備し、トンネル高さ7.5mまで診断可能とした。これにより、道路トンネル技術基準(2級~4級)のトンネル診断が可能となった。

5. システム出力

出力は、「作業用表示(オペレータ確認画面表示)」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の随時スクロール表示が可能である(写真—3)。

診断結果の出力には、以下の3種類がある。

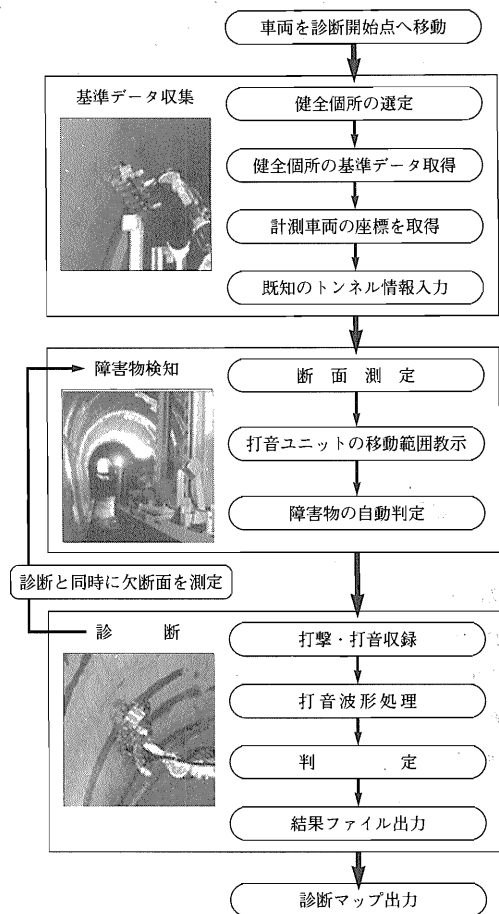
- ① トンネル全体/スパン別診断結果展開図(図—7)
- ② 診断結果数値一覧
- ③ 基準データ測定結果

データはすべ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。

6. 作業手順

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、運転手の3名構成を基本としている。診断システムの操作は、オペレータ席のメインコンピュータ(タッチパネル画面)で行う。診断作業の手順を図—8に示す。



図—8 現地における診断フロー

7. 検証実験

検証実験は、各システム機能の確認と機能向上も兼ねて、5箇所で行った。

1箇所目は、群馬県の旧碓井峠にある、昭和40年竣工の道路トンネルである。本トンネルにおける実証試験状況を写真-4に示す。診断結果は、目視観察および人力打音による診断結果と比較的良好に合致していた。



写真-4 実証試験状況

2～4箇所目は、新設トンネルで実施し、以下に示す装置の動作に関する実証を目的とした。

- ① 障害物回避確認
- ② 天端最大高さの確認
- ③ 最高速度実証

5箇所目は、既存のトンネルで行い、壁面状況と診断状況の対比を行い、診断結果の検証を行った。

(1) 障害物回避

トンネル壁面にダンボールで作製した障害物を設置し、障害物回避の作業検証を実施した。その結果、前後1ソフト余分に逃がす傾向にあったが、閾値の調整で逃がす部分を小さくする機能をつけてあり、低速運転での確認はできた。しかし、高速運転ではヘッドの大きさやアーム移動角度を考慮し、非常停止が間に合わない危険性があるため、現在の値で十分な経験を積んだ後、調整することとした。

(2) 天端最大高さの確認

設計仕様の最大7.5m(2級A・B)が作業可能か確

認試験を実施した。実測で、このトンネルは最大7.5mであったが、試験の結果7.5mまで作業可能であることを実証した。

(3) 最高速度実証

診断速度を最高速度に設定した結果、4横断(1横断=19スパン×0.45m²)、301秒(平均75秒)の作動で、目標の最大400m²/hを達成することができた。

(4) 診断結果の検証

既存トンネルにおいて、診断結果の検証を行った。診断は、以下の手順で作業を実施した。

- ・目視検査により候補箇所の絞り込み
- ・壁面状況スケッチ、人力打音による評価
- ・「ソニックマイスター」による評価

診断に当たっては、写真-5で示す場所を選択した。

また、壁面状況スケッチ、人力打音による調査結果を図-9に示す。図中の×は不良箇所、△は怪しいと判断した箇所を記入した。診断に当たっては、打撃箇所を3名(ハンマ打撃者、記録者、高所作業車オペレータ)で聞き分けた。異常音を確認した部分は、図-9の①部のクラック補修跡、②部の、小さなクラックに沿い、また、③部の、大きな縦クラックの刃先部分と、クラック上部の浮き部分である。



写真-5 打撃試験場所

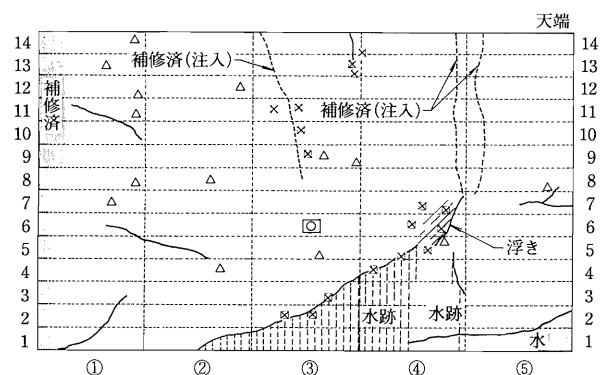


図-9 人力打音による調査結果

次に、ソニックマイスターによる診断結果を図-10に示す。

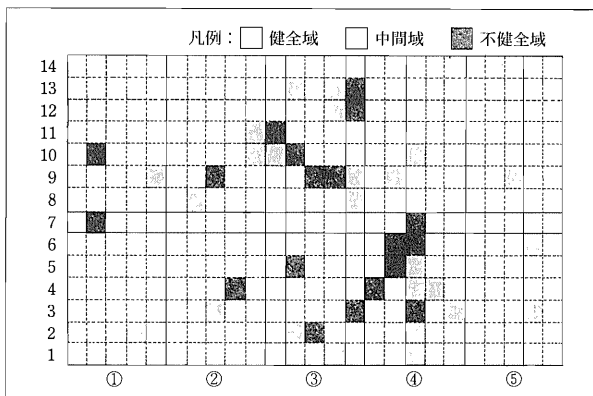


図-10 ソニックマイスターによる評価

特長となる3エリアについて、人力打音による評価と、ソニックマイスターによる評価について、ほぼ同様の傾向が得られ、診断手法が正しいことが実証できた。

また、本比較資料においてトンネル壁面の写真は、診断結果の対比資料として不可欠なものであることが再認識された。

8. 終わりに

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。

コンクリート壁面連続画像の診断結果出力へ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。

JCM A

《参考文献》

- 1) 今井 博：電磁波を用いたコンクリート内鋼材の検出技術の開発、土木学会第54回年次学術講演会講演梗概集、Ⅲ A-356, pp.712-713, 1999
- 2) 今井 博：電磁波による高精度コンクリート内部調査法、土木学会第55回年次学術講演会講演梗概集、V, CD-ROM, 2000
- 3) 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
- 4) 海老原正明ほか：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

【筆者紹介】



川上 純 (かわかみ じゅん)
大成建設株式会社
技術センター
土木技術開発部
室長



須田 健 (すだ たけし)
大成建設株式会社
技術センター
土木技術開発部
課長

現場技術者のための

建設機械整備用工具ハンドブック

- ・建設機械整備用工具約180点の用語解説と約70点の使い方を収録。
- ・建設機械の整備に携わる初心者から熟練者まで幅広い方々の参考書として好適。

■ A5判 120頁

■ 定 価：会 員 1,050円（消費税込）、送料420円
非会員 1,260円（消費税込）、送料420円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8（機械振興会館） Tel.03(3433)1501 Fax.03(3432)0289