

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

平野逸雄・須田健・田端淳・河原塚透・宮崎裕道*¹・近藤高弘*¹

Keywords: non-destructive test, tunnel, diagnostic by the impact acoustics method, mechanization, automation
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健全性の診断は、点検ハンマーによる打音の他、レーザー、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。筆者等においてもこれまで、電磁波による構造物内部診断システム^{1) 2)}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、点検ハンマー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機械的に行う技術の開発が求められていた。

今回開発した打音診断機は、油圧駆動の打撃装置で打音を発生し、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大きいエネルギーで打撃することが可能となり、周辺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、減衰が小さい。
- ② 周波数特性において、300Hz～5000Hz において健全部、不健全部に差異が見られる。(図-1)

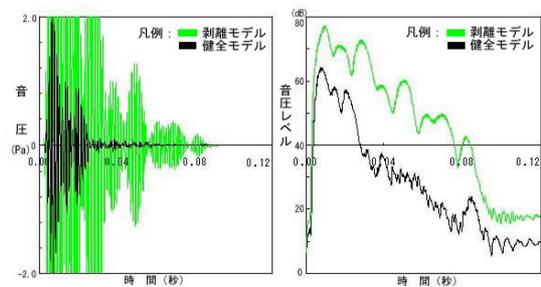


図-1 健全部、不健全部打音波形の差異

The difference in wave form by the impact sound .

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」により空洞・剥離を診断している。判定は、健全部における基準データとの差異によって判定を行っている。

3. システムの特長

本システムは、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(剥離や空洞等)を即座に発見、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。



写真-1 打音診断機『ソニック・マイスター』

Diagnostic by the impact acoustics machine .

*1 土木本部機械部

診断作業は、30 cm間隔で配置した5連式ハンマーにより、トンネル縦断方向へ幅 150cm、横断方向に 30cm ピッチの自動運転(図-2参照)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。

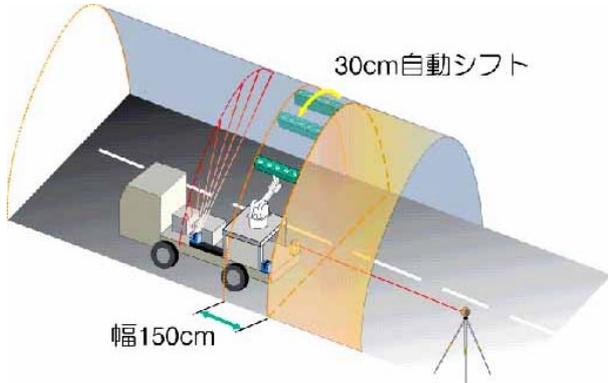


図-2 システム概念図

The plan figure of the system .

- ① 打音の診断解析は、「人が行なう診断(音の大きさ、音色、時間変化、相対評価)」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 データ汎用性向上のため、深い位置までの診断と一定打撃力を与えることが可能な、無リバウンド型油圧ハンマーを開発し採用した。
- ③ 5個の並列ハンマーで 0.2 秒毎に打撃し、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する。
- ④ 大型汎用アーム式ロボット採用の自動化により、30cm 格子点を連続打音診断し、400 m²/h の作業効率で診断可能とした。
- ⑤ 測定結果は、断面測定器と自動追尾測距儀による位置情報と併せて保存し、その場でも確認ができる。
- ⑥ 障害物(照明器具、排気設備等)は自動の断面測定情報をもとに、自動回避を行なう。
- ⑦ 電子情報として保存ができ、図表への出力、他地点との比較、同一点の経年変化の比較に利用可能である。
- ⑧ 音の生データ保存が可能であり、診断の再現や今後の新しい解析方法での測定データ活用が可能である。

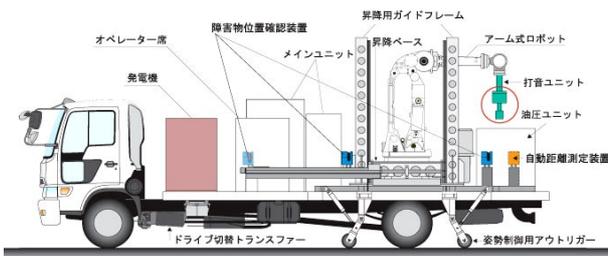


図-3 システム構成図

System composition figure .

4. システムの構成

打音診断機は、ベースマシンとなる8tトラック、打音位置を測定する内空断面計測装置と自動追尾型測距装置、打音を発生させる打音装置、打音ユニットを打音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-3参照)

4.1 打音装置

打音装置は、音源ノイズを除去する目的で、油圧式ハンマーを採用した。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。(写真-2) 個々の装置の中にはハンマー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。

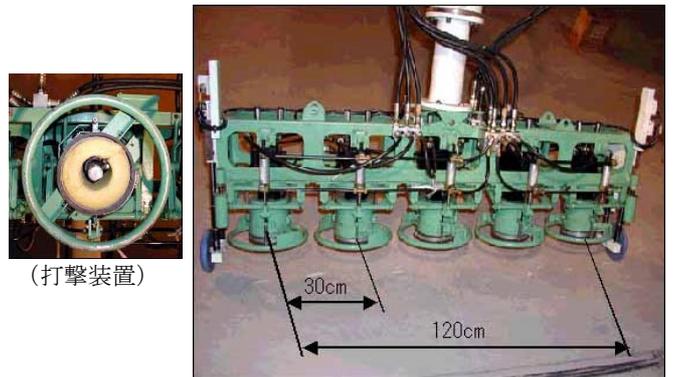


写真-2 打撃装置及び打撃ユニット

Hammer and hammer unit .

4.2 ベースマシン

ベースマシンは、測定場所へ自走可能で、移動しながらの診断作業を行なうため、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。

4.3 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-4、図-5に位置測定概要を示す。

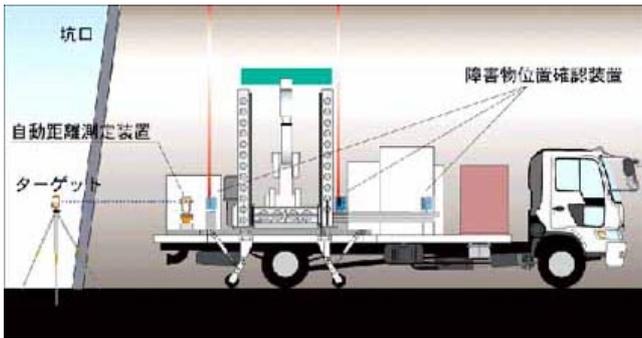


図-4 トンネル縦断方向位置測定の概要
The outline of the running through position measurement .

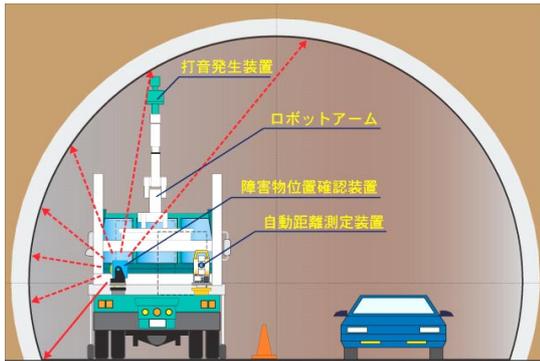


図-5 トンネル横断方向位置測定概要
The outline of the crossing position measurement .

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

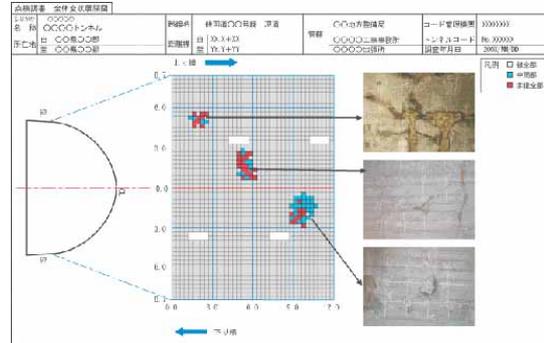


図-6 スパン別診断結果出力例
Diagnosis result output .

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。

4.4 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。

5. 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随時スクロール表示(写真-3)が可能である。

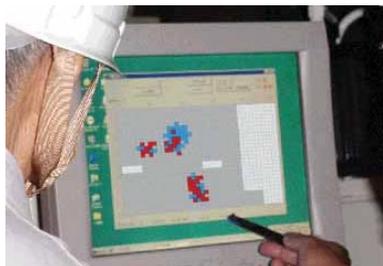


写真-3 診断中画面出力
Display output during the diagnosis .

6. 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名で行なう。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なう。診断作業の手順(図-7)を以下に示す。

6.1 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。

6.2 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。

6.3 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。
- ・自動運転により打音診断を行い、リアルタイムに結果を表示する。
- ・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。

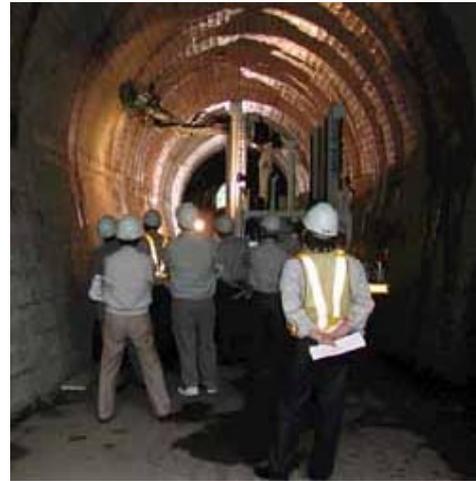
※) 上記作業の繰り返し

6.4 診断終了

- ・診断マップ、診断結果リストを出力する。

て実施した。

いずれの実験でも、システムの動作確認と調整を行なうことで、設計仕様を満足する性能を持つことが確認できた。



写真—5 実証試験状況

Actual proof examination .



図-7 現地における診断フロー図

Diagnosis flow figure .

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、3箇所を実施した。

1箇所は、群馬県の旧碓井峠にある、昭和40年竣工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—5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く合致していた。2および3箇所目は、兵庫県と東京都下の新設トンネルであり、品質確認を目的とし

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動する予定である。

今後、診断データを蓄積し、診断結果を他の診断結果と照合し、検証することで、システムの信頼性の向上に努め、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) 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、P 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