

汎用ロボット利用による トンネル覆工コンクリート診断の自動化

須田健¹・川上純²・宮崎裕道³・田端淳⁴

¹正会員 大成建設株式会社 土木技術部（〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目25番1号）

²正会員 工博 大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町3 4 4-1）

³正会員 大成建設株式会社 機械部（〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目25番1号）

⁴工博 大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町3 4 4-1）

現在、覆工コンクリートはく離・空洞の診断技術としては、レーザー、超音波等多くの非破壊検査手法が実用化されている。しかしこれらの技術は、簡便・迅速・安価にデータが処理できないため、現状は人力の診断が主流となっている。また人力打音診断は、複数の作業班で行われることが多く、「①診断に個人差が生じ易い、②定量的な判定が難しい、③記録が残らない、」等の問題があり、早期の自動化が望まれていた。筆者等は、自動で連続診断を可能とした打音診断機「ソニックマイスター」の開発をおこなった。現在この装置は、新設道路トンネルの竣工検査を中心に実績を挙げている。今回、この装置の診断原理と機械的特徴、実機による供試体試験および、実トンネル診断試験結果について報告する。

キーワード：覆工コンクリート、非破壊検査、打音診断、自動化、ロボット

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¹⁾。



写真-1 打音診断機「ソニックマイスター」

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、コンクリートのはく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。

2. システムの構成

打音診断機は、図-1に示すよう、ベースマシンとなる8 tトラック、打音位置を測定する断面センサーと自動追尾計測器、打音を発生させる打音ユニ

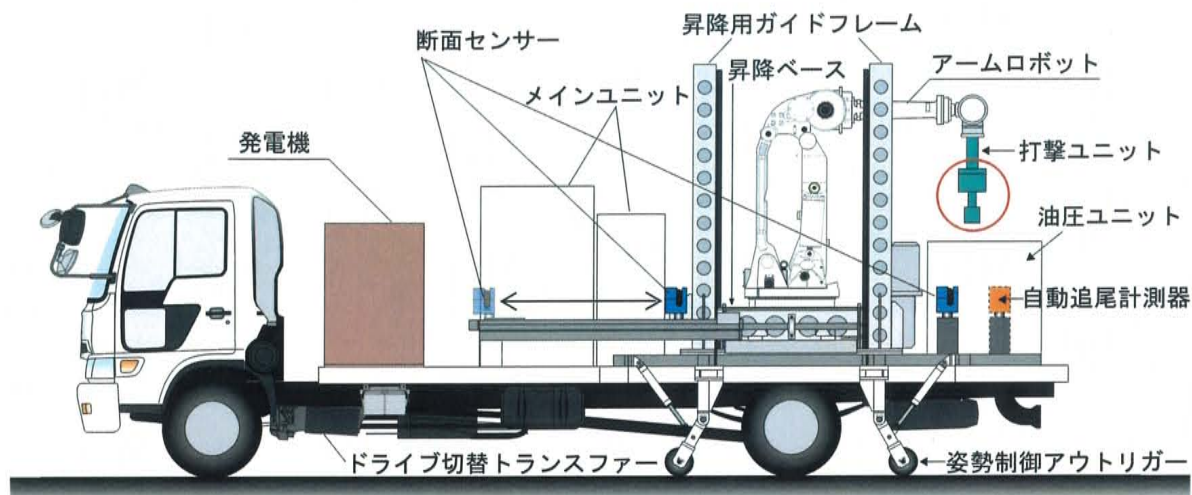


図-1 打音診断機「ソニックマイスター」システム構成図

ット、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。

(1) ベースマシン

ベースマシンは、測定場所へ自走させ、診断作業を行なうため、8tトラックを特殊儀装した。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) 断面センサー

打音位置情報は、横断方向を測定する断面センサーと、縦断方向を測定する自動追尾計測器の組合せで三次元位置情報作成・誘導を行う。また前方の断面センサーは、診断作業中のセンサー空き時間を利用し、次の打音範囲の障害物詳細測定を行う。この測定で、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行なえるよう制御している。図-2に位置測定概要を示す。

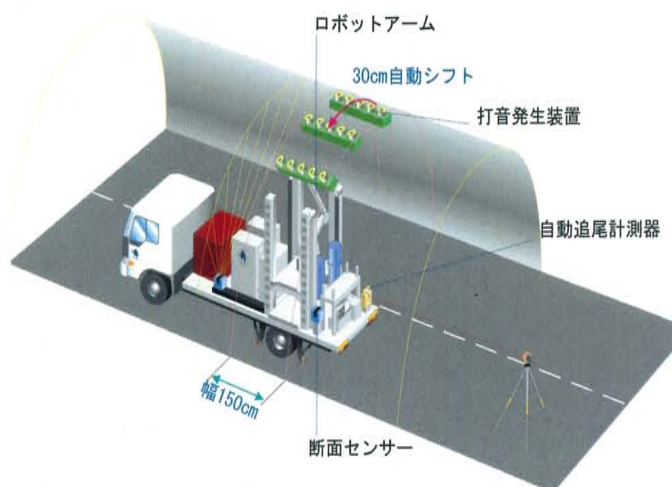


図-2 打撃位置測定概要図

(3) 打撃ユニット

トラックの上に装置した産業用アームロボットの先端には、打撃ユニットを30cm間隔で5個装備し、診断速度および作業性の向上をはかった。

打撃ユニットは、周囲の騒音を遮断するために、外側に遮音フードを設けてあり、その内部にマイクロホンが設置されている。

個々の油圧ハンマーはユニバーサルジョイントでフレームに吊っており、コンクリート面へ打撃装置を押し当てた時、間隔保持装置として脚の先端に設置したベアリングにより、個々の装置が調芯機能を持ち、コンクリートの面の凹凸や曲率の違いに対しても、各ハンマーがコンクリート面に常に垂直に当るよう工夫した。



写真-2 打撃ユニット写真

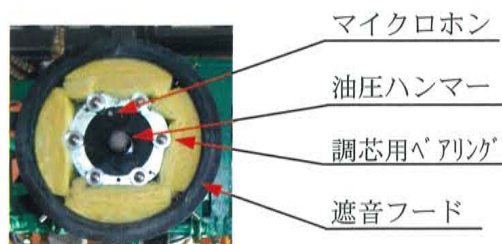


写真-3 打撃装置写真

(4)昇降用ガイドフレーム

診断ロボットは、汎用の大型アームロボット採用のため通常の利用では4.8mしか届かないが、昇降用ガイドフレーム利用により、トンネル有効高7.5mまで診断可能とし、2車線トンネルのほとんどが対応できる構造とした。

(5)姿勢制御用アウトリガー採用

高速に稼動するロボットの姿勢を安定させるため、アウトリガーを設置した。アウトリガーは移動の時間を短縮させるため従輪式とした。また、道路の線形勾配に対応するため、左右・前後独立の制御を可能とした。この従輪式アウトリガー採用により車両移動の工程が円滑に可能となった。

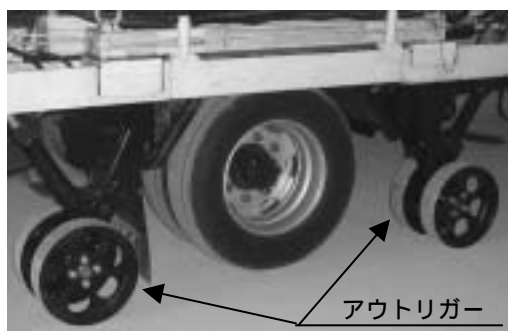


写真-4 アウトリガー設置状況

(6) 前進制御の精度向上

トラック本体の移動は、動輪のドライブシャフトを電動モータ制御に切り替えることで、診断オペレータの機体制御により、移動距離を1cm単位の精度でスムーズに移動可能とした。

3．システムの特徴

(1)油圧式打撃装置の採用

一定の打撃力を与え、機械的なノイズの発生を抑えるために、油圧式打撃装置を採用した。

(2)高速診断

30cm間隔の5連の打撃装置を0.2秒間隔で打撃する。人力による診断の3～5倍の診断速度となる。(250～350m²/時間、道路片側車線で25～35m/時間)

(3) リアルタイムの解析

マイクロホンで収録した音響データをその場で解析し、判定結果をモニター画面に表示するため、壁面状況と評価結果の原位置での確認が可能である。

(4)障害物自動回避

診断作業中測定する次スパン分の連続断面計測データと、初期に登録する基準断面から形状の違いによる障害物を自動検知し、自動回避する。

(5)データの保存

収録した生の音響データおよび評価結果は、自動保存が可能であり、コンクリートの経年変化も定量的に調査が可能である。

4．音の収録と解析法

(1)音の収録方法

コンクリート健全性の評価は、コンクリートの表面振動を用いるのが良いと考えられるが、打撃振動を測定するためには、何らかの方法で振動センサーをコンクリート表面に接触させる必要がある。

センサーを接触して計測する場合は、診断の迅速性を確保することが困難であるとともに、接触状態により得られる結果に少なからず誤差が生じる可能性がある。そこで、打撃時のコンクリート表面からの発生音により評価する方法を採用した。

コンクリートを打撃した時に発生する打撃音は、主にハンマーから発生する音とハンマー衝突時にコンクリートから発生する音がある。人間はこれらの混合した音を聞いてコンクリートの健全性を判断している。したがって、マイクロホンはハンマーの近傍に設置して、人間と同じように混合音を収録する方式とした。(写真-3 打撃装置参照)

(2)打撃音の解析方法

打撃音の解析フローを図-3に示す。デジタル化した打撃音は、まず中心周波数400～5,000Hzの1/3オクターブバンド12帯域に濾波した後、音圧レベルに変換する。音圧は突発的な変化が大きいため、ある一定の時間窓により移動平均し平滑化する。その後、各々の帯域毎に健全部で取得した基準データの音圧レベルと比較して健全性を判断する。これらの処理は、DSP(digital signal processor)を用いてリアルタイムで行っている。なお、トンネル毎に覆工コンクリートの配合や強度が異なるため、健全部の基準データは各トンネルの診断前に取得している。

健全性の判定は、2つのしきい値を設定して、「健全域」、「中間域」、「不健全域」の3区分に判定している。

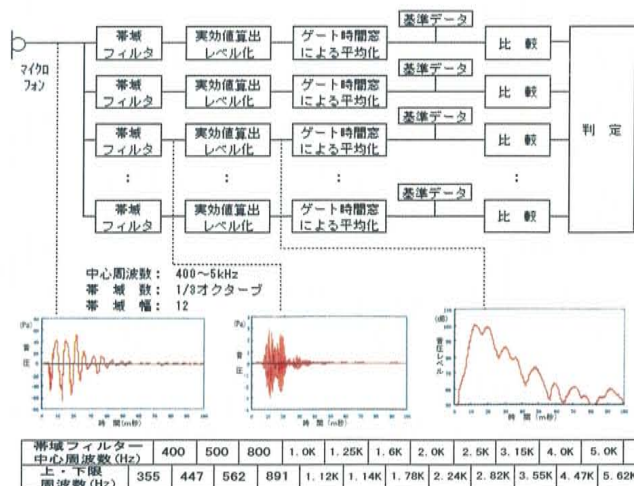


図-3 打撃音解析フロー

5. コンクリートによる室内実験

空洞やはく離部から発生する音の性質および判定性能を検討するために、コンクリート内に空洞およびはく離を模擬した供試体を作成して打音実験を行った。

(1) 実験方法

コンクリート供試体は、たわみ振動のような固有振動が発生しないように約1m角のブロックとし、その内部に正方形の空洞を設けたもの、および表面にはく離を設けたものを作成した。また、トンネル覆工の目地部を模擬した供試体も作成した。

a) 空洞モデル

打音による空洞の検出性能は、空洞の大きさと空洞の深さに関係する。そこで、空洞の大きさは20cm、40cmおよび60cmとし、深さは5cm～30cmとした。図-4に空洞モデルの供試体を示す。なお、空洞の厚さは発生する打撃音に影響しないため、ベニヤ板に厚さ1cmの発泡スチロールを張ったものを内部に埋め込み、空洞モデルとした。

b) はく離モデル

はく離の検出性能は、コンクリート表面とはく離を生じるクラックの角度、およびはく離部の長さにより異なると考えられる。

そこで、はく離モデルは図-5に示すように、コンクリート表面とはく離を生じるクラックとの角度を15°、30°および45°の3種類とした。また、はく離部の長さは、供試体全長にわたるもの（長さ1m）と、長さが40cmの有限長のものを作成した。はく離モデルのクラックは、空洞と同様にベニヤ板に

発泡スチロールを張ったもので作成した。

c) 目地部モデル

目地部は、覆工コンクリートが自由端になっており、発生する音が異なる可能性がある。また、本打音診断装置の打撃部には、マイクロホンの周囲に遮音フードが取り付けられているので、目地部では遮音フードが一部コンクリート表面に密着せず、収録される音が異なる可能性がある。

そこで、図-6に示すように、2つの供試体を合わせて継ぎ目を作り、目地部モデルとした。継ぎ目の形状は、切欠きありと切欠きなしの2種類とした。さらに目地部にクラックを作成したモデルを作成した。切欠き部の形状は図-7に示すように、一般的に多く用いられている幅10cmで深さ5cmとした。

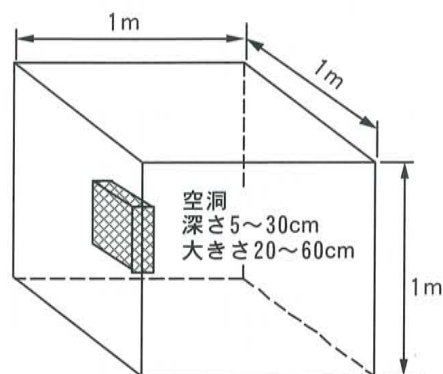


図-4 空洞モデルの供試体

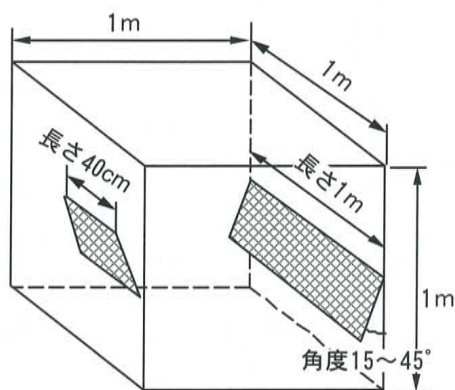


図-5 はく離モデルの供試体

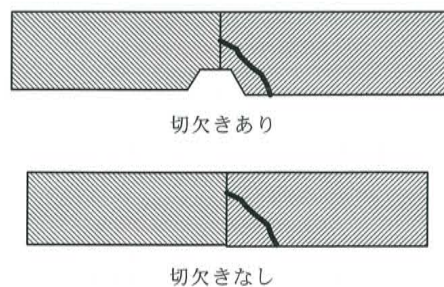


図-6 目地部のモデル

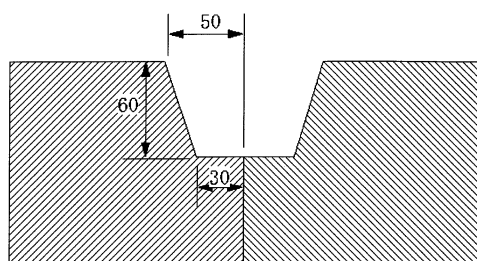


図-7 切欠き部の形状

計測は打撃点から約4cm離れた位置に設置した加速度計によるコンクリート表面の振動と打撃音について行った。加速度計は、SP04M（富士セラミック社製）を使用した。共振周波数は60kHz以上で、周波数特性は30kHzまで平坦である。打撃音は、本打音診断機に装備してある測定器を使用した。

打撃は、本打音診断機で行い、空洞部およびはく離部の領域を5～10cm間隔で打撃した。図-8に打撃位置と計測位置を示す。

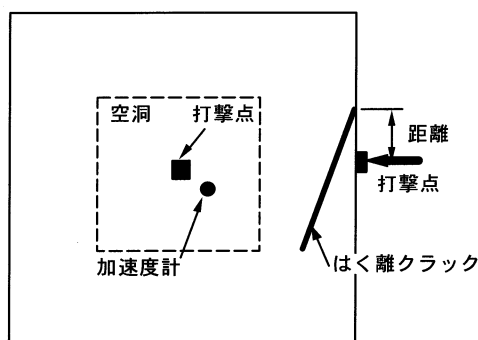


図-8 打撃位置と計測位置

(2) 打撃音の特徴

図-9は、健全モデル、空洞モデルの中央（空洞の大きさ40cmで深さ10cm）および傾斜30°のはく離部から4cm離れた位置を打撃したときの、音圧波形、加速度波形およびそのスペクトルである。

音圧波形には、400～500Hzの比較的低周波の振動が含まれているが、それ以外は加速度波形と良く似ており、コンクリートから放射される音を収録していることが分かる。音圧波形に含まれる低周波は、打撃装置に被せてある遮音フード内で音が共振したものと考えられるが、コンクリートから発生している音と周波数帯域が異なるため、評価に関しての影響は少ない。

空洞モデルでは、1800Hz前後に卓越したピークがあり、空洞とコンクリート表面で作られたコンクリート板のたわみ共振であると考えられる。また、はく離モデルに見られる1200Hz前後の卓越ピークもは

く離部のコンクリートの共振であると考えられる。空洞やはく離部の打撃波形は、音圧の振幅が大きく、その継続時間が長い特徴があることが分かる。

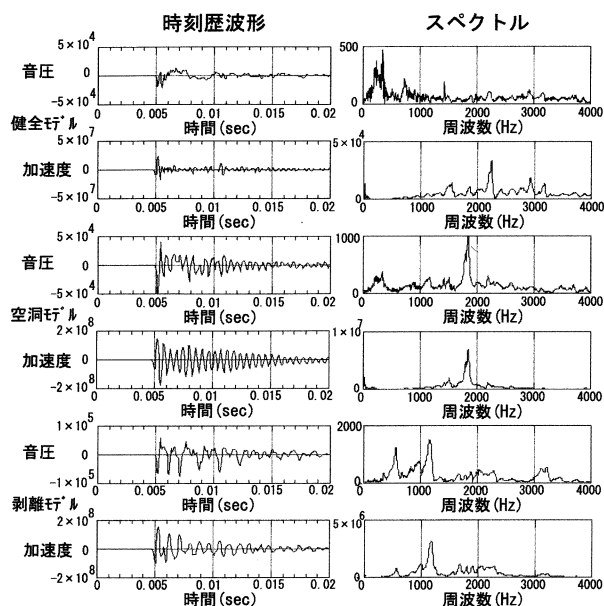


図-9 空洞とはく離部の音圧波形とスペクトル

(3) 空洞モデルの実験結果

図-10は、大きさ40cmで深さの異なる空洞の中心を打撃したとき実験結果であり、各周波数帯域における健全部との音圧レベル差を示したものである。

空洞が浅いと健全部との音圧レベル差が大きくなり、深くなるにつれて音圧レベル差が小さくなり、深さ15cmになると音圧レベル差が10dB程度となっている。

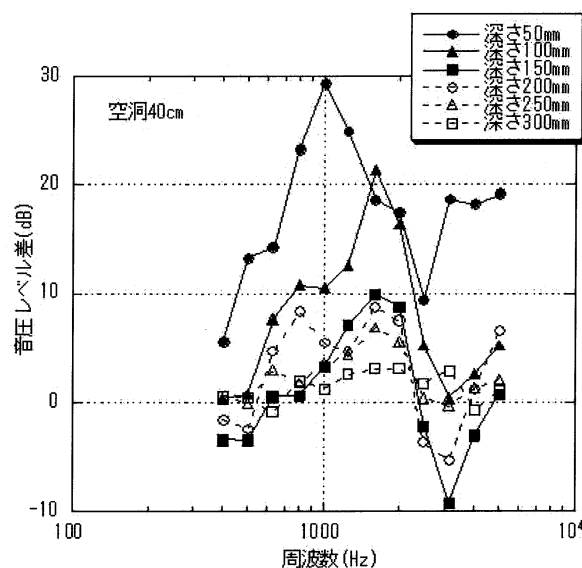


図-10 40cm角空洞の深さと音圧レベル差

打音波形はコンクリート表面の凹凸や状態によってばらつきがあり，確実に健全部と異なると判定できるのは，音圧レベルで10dB程度である．数人に打音検査をしてもらった結果，深さ10cmまでは判定可能であった^{2), 3)}．したがって，本打音診断機は，ほぼ人間と同等の性能を有していることが分かる．

(4) はく離モデルの実験結果

図-11は，クラックとコンクリート表面の角度が15°のはく離モデルの音圧波形である．打撃位置は，図-8に示したように，はく離クラックからクラック側への距離である．打撃位置-10cmは，クラックの上部10cmであり，健全部に相当する．

図に見るように，クラックに近いほど音圧の振幅が大きくなっており，クラックからの距離が離れるにしたがって振幅が小さくなっている．

図-12～14は，はく離角度15°，30°，45°における各周波数帯域での健全部との音圧レベル差を示したものである．はく離部に近いほどそしてはく離部の角度が小さいほど音圧レベル差が大きくなっていることが分かる．

図-15は，クラックからの打撃位置と音圧レベル差の関係を示したものである．不健全部の検出しきい値を10dBとすると，はく離角度15°の場合クラックから37cm，はく離角度30°の場合は28cm，そしてはく離角度45°の場合は15cm程度まで検出可能であることが分かる．

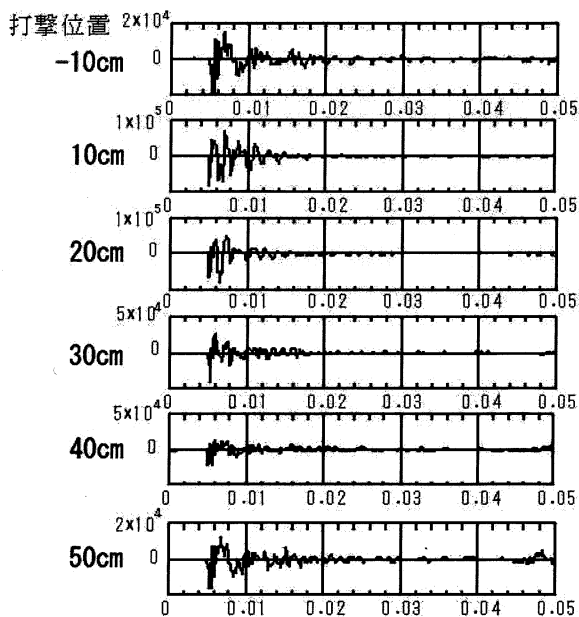


図-11 はく離15°での音圧波形

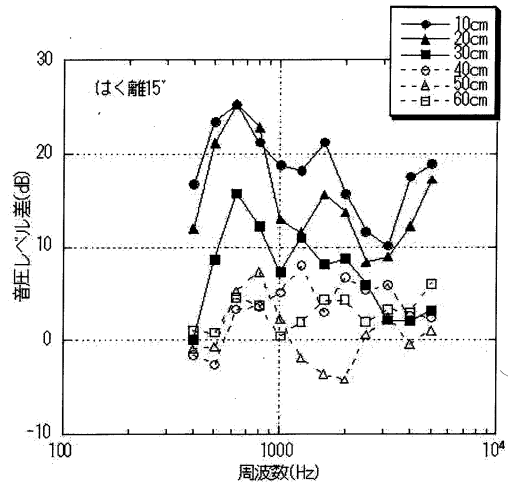


図-12 はく離15°の周波数毎の音圧レベル差

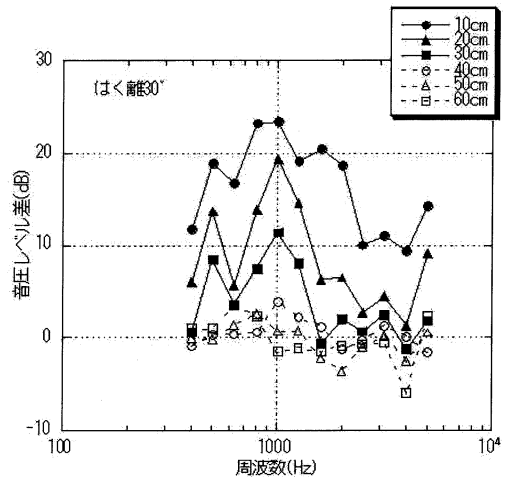


図-13 はく離30°の周波数毎の音圧レベル差

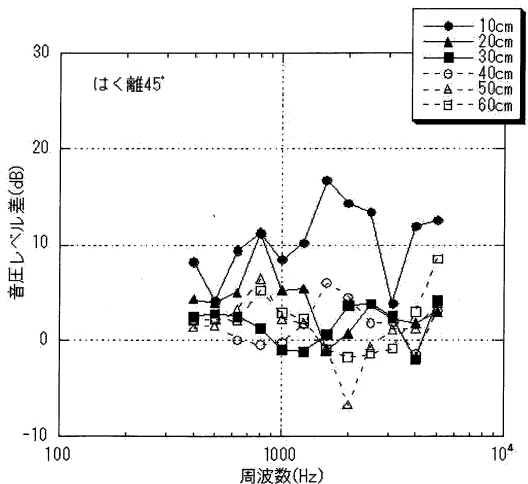


図-14 はく離45°の周波数毎の音圧レベル差

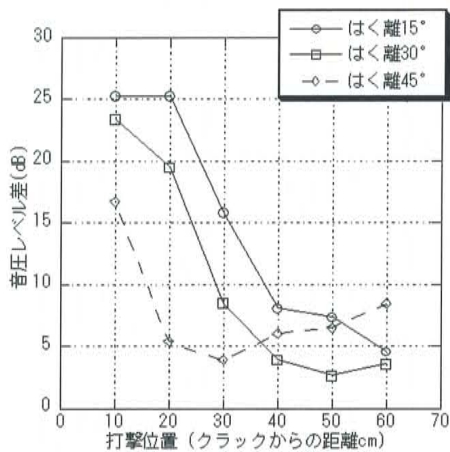


図-15 クラックからの位置と音圧レベル差

図-16は、はく離の長さが40cmの有限長はく離ではく離角度が30° の場合の各周波数帯での音圧レベル差を示したものである。

図-13のはく離長1mの結果と比較すると、音圧レベル差はやや小さくなっており、はく離部のクラックが短くなるとやや検出しにくくなることが分かる。

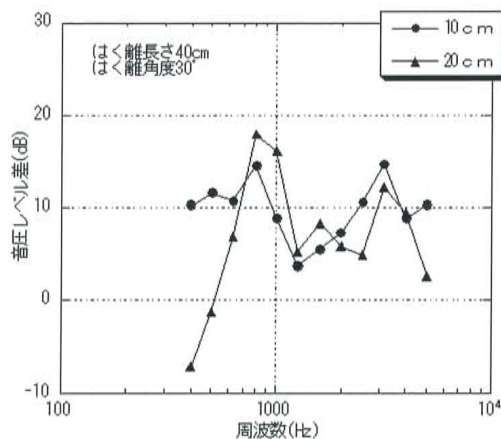


図-16 はく離長 40cm・角度 30° の音圧レベル差

(5) 目地部の実験結果

図-17は、目地部における各条件での音圧レベル差を示したものである。打撃箇所は、目地部中央から7.5cmの位置である。

目地部で切欠きが無い場合（図の○印）は、健全部より2.5kHzで8dB程度大きくなり、切欠きがある場合（図の△印）は、1.6kHz、5kHzで9.5dB程度音圧レベルが大きくなっている。これは、目地部付近は自由端になっているため、共振現象が生じたためと考えられる。

これに対して、目地部に切欠きがあり、目地部から10cm離れた箇所に長さ40cmのはく離がある場合

（図の■）では、音圧は15dBほど大きくなっており、検出が十分可能であることが分かる。

以上のように、目地部の場合、コンクリートの自由端であるため、はく離がなくても10dB近く音圧レベルが大きくなるが、不健全部の検出しきい値を10dB以上にすれば、目地部でも通常部と同様に打音診断が可能であることが分かる。

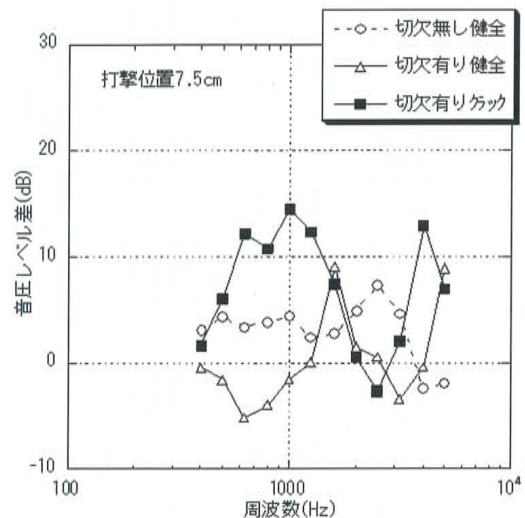


図-17 目地部の音圧レベル差の結果

8. 実証試験

(1) 既設トンネルでの診断例

リニューアル中のトンネルにおいて診断実験を行った。写真-5に打撃場所写真、図-18には打撃診断を行った箇所のスケッチを示す。スケッチには人間が打音診断した結果も併記してある。主な不良部分は、中央から左下方向に向かうコールドジョイントおよび上部の2つのクラックに沿った部分である。

図-19はソニックマイスターによる断結果であり、前記した3箇所の不良部分が不健全域と診断されており、良い一致を示していた。

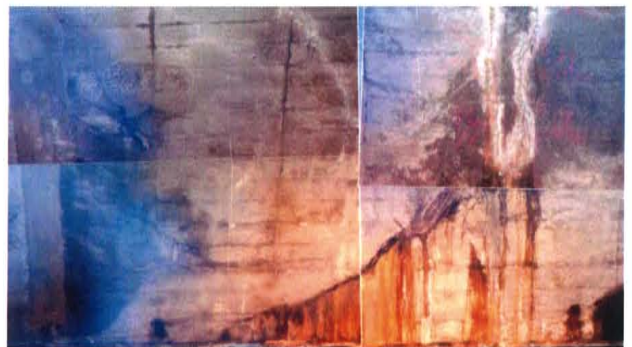


写真-5 診断場所状況

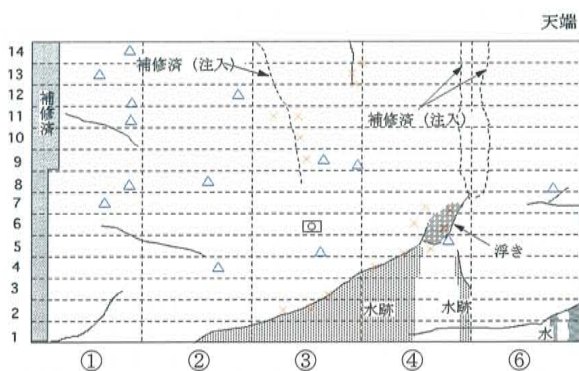


図-18 人力打音診断及びスケッチ図

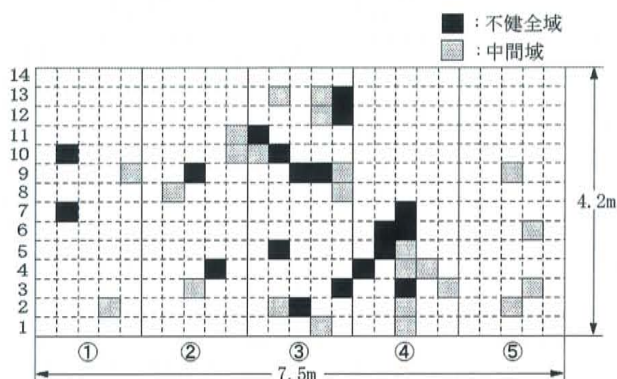


図-19 ソニックマイスターの診断結果図

9. 新設トンネルへの適用

近年、新設トンネルの完成時に、覆工コンクリートの打音検査を行う場合が多い。完成時の打音検査では、全面打音を行う場合が多く、本打音診断機は省力化として使用されている。

図-20は完成時の打音検査結果の一例である。不健全域と判定された箇所がいくつか見られるが、このうち左側の連続した箇所は目地部であり、ハンマーがコンクリート表面を叩かずに空打ちしたためで

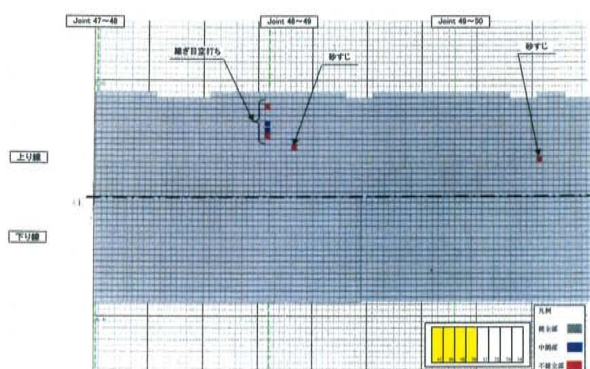


図-20 新設トンネルでの打音診断結果の例

ある。その他の2箇所は表面のあばたであることが目視により確認されている。

このように、コンクリートの表面状態によっては、不健全部と判定される場合がある。しかし、本システムでは判定結果がリアルタイムで表示できるため、不健全部と判定された箇所をその場で目視確認できるため、誤判定はほとんど発生していない。

10. まとめ

トンネルの覆工コンクリートの自動点検装置を開発した。本システムは、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ものであり、自動で打音を行うことができる。

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リアルタイムで判定している。

コンクリート供試体を用いた実験では、空洞やはく離部をほぼ人間と同等の能力で判定可能であることが確認できた。

また、実際のリニューアル中のトンネルの実証試験を行い、人力打音で検出したコールドジョイントやクラックに沿った不健全箇所と本装置で判定した不健全部とは一致しており、本装置の有効性が実証できた。

現在では、新設トンネルの完成検査への適用を進めており、数箇所の実績を積んでいる。コンクリート表面の凹凸により不健全部との判定が出る場合もあるが、判定結果はリアルタイムで表示されるため、その箇所を目視で確認でき、誤判定もなく運用できている。

参考文献

- 1) 奥野昇, 島津幸一: トンネル維持管理用非破壊計測システムの開発, 第9回建設ロボットシンポジウム論文集, pp157-162, 2002.
- 2) Takeshi, S. Atsushi, T. Jun, K. Takatsugu, S. : Development of an Impact Sound Diagnosis System for Tunnel Concrete Lining, Proceedings of World Tunnel Congress and 13th ITA Assembly, Singapore, 22- 27 May 2004, B17, pp. 1-8, 2004.
- 3) 須田健, 川上純, 田端淳: コンクリート供試体を用いた打音診断評価実験, 大成建設技術センター報, 第36号, 2003.