

41. 自動打音調査システム「^{いだてん}易打天」

ハザマ：○武石 学

(株)ダイヤコンサルタント：小泉 和広

(株)ウォールナット：新 弘治

1. はじめに

トンネルは年月を経過するとともに老朽化が進行していき、覆工崩落などの事故が発生する危険性が高くなるものと考えられる。トンネルに本来必要な機能を確保し、事故を防止するためには、定期的な点検・検査により覆工の健全性を評価し、必要に応じた補修・補強を行っていくことが重要となる。現在このような点検・検査方法としては目視観察とハンマ打音による方法が一般的に実施されているが、これは覆工表面のひび割れ、漏水、遊離石灰等を目視で確認し、これらの異常部や目地などを重点的にハンマで打音調査するものである。

目視調査に代わるものとしてCCDカメラやレーザーによる自動計測技術の開発は進められているが、ハンマを用いた打音調査はいくつかの自動調査技術が開発されつつあるものの、いずれも現場適用試験段階であり、実用化されているものは少ない。

本研究は、こうした背景を受けて、筆者らがこれまで開発を進めてきた自動打音調査システム「易打天」について、その概要と現場適用実験結果についてまとめるとともに、調査結果の有効性について検討したものである。

2. ハンマ打音調査法の問題点と自動化への課題

人による従来のハンマ打音による覆工調査は、覆工の状況を目視しながら打撃することで、視覚、聴覚および触覚（反発度合い）をもとにした総合的な判断ができるという利点がある。加えて、表面の剥落が懸念される場所においてはその場で叩き落としによる対処が可能であり、鉄道や道路トンネルの最も基本的な点検方法の一つとなっている。しかし、この方法には上述のような長所がある反面、表－1に示したように客観性、作業性などの点で問題があり、特に、点検作業自体が高所作業車上での上向きの苦渋作業であることや、トンネル全線を点検・調査するためには多大なマンパワーや調査時間を要することなどが解決すべき課題となっている。

以上のようなハンマ打撃による調査法の現状における問題点を整理し、自動化に向けての課題と対応策を表－1のように整理することで自動化の方向性を明確にすることとした。この表に示すように、従来の方法の問題点は、①評価基準の客観化、②作業全体の効率化③調査結果の記録・保存などに集約され、自動化に際してはこれらの課題を解決しつつ、本来の打音調査の長所である広い適用性などを損なわないように留意する必要がある。

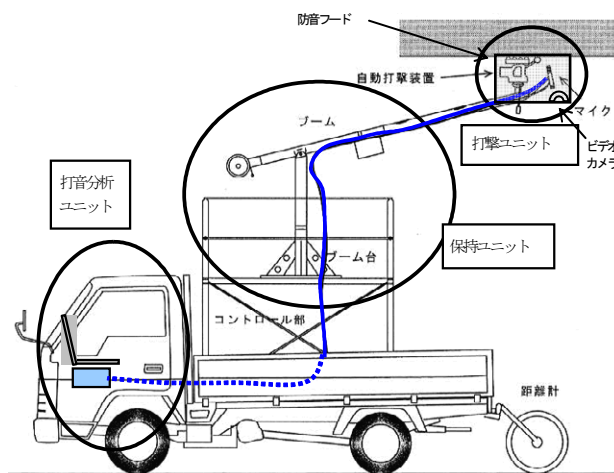
こうした問題点のうち、①の評価の客観性を確保す

表－1 ハンマ打音による方法の問題点と自動化に向けての課題

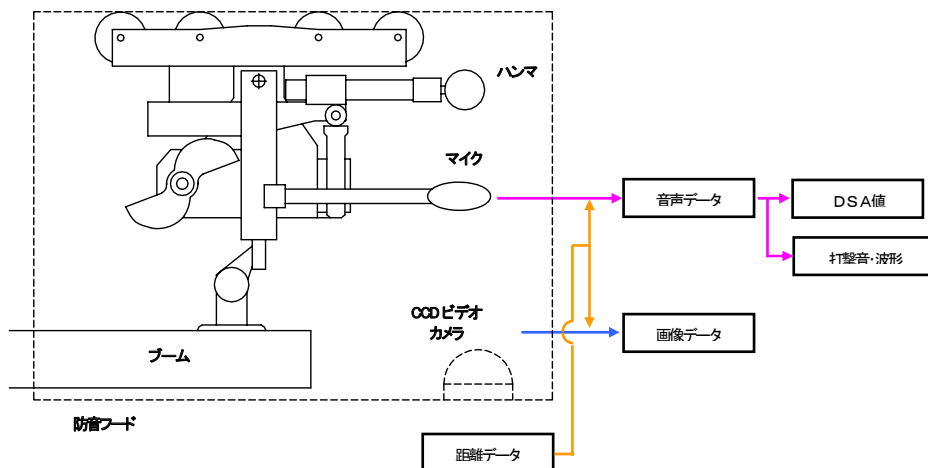
項 目	現状の問題点	自動化に向けた課題	対応策
評価基準の客観化	主観的であり個人差がある	客観的で安定した評価の実現	音響エネルギー分析手法の導入
作業全体の効率化	苦渋作業であり、広範囲の調査ではマンパワーを要する	迅速かつ容易な調査の実現および省力化	自動打音装置の開発 トンネル軸方向での連続調査
調査結果の記録・保存	調査結果の保存が困難	データ保存・表示が容易	調査結果のデジタルデータ化
経 済 性	広範囲では経済性が低下する	安全で経済的なシステム開発	既存技術の有効活用

るためには、打撃音をマイクロフォンで収録し、その音響エネルギーを分析する手法を採用することとした。また、ハンマ打撃している覆工表面についても防音フード内に取り付けたCCDビデオカメラで撮影、記録することとした。これらの音響、映像記録は、打撃位置の情報とともに保存することにより、両記録について同位置で比較することが可能となり、結果の評価や異常値の除去にも活用できる。また、測定結果を記録後処理によりデータを加工することや分布図を容易に作成することが可能となるほか、調査結果がデジタルデータとして保存されるため、③の調査結果の記録・保存の課題にも対応できる。

②の作業性については、自動打撃装置を開発することで対応した。打撃を自動化することにより、作業性



図－1 自動打音調査システム構成例



図－2 システム概念図

の改善と同時に打撃力の安定化を図ることが可能となる。また、調査方向をトンネル周方向ではなく、トンネル軸方向とすることで、電磁波探査に使用されるアンテナ保持機構をそのまま適用することが可能となり、保持装置自体を小型・軽量化することができる。なお、十分な調査密度を確保するためには、軸方向に一定間隔の測線を設けて、調査を行うことで対処することとした。

3. 自動打音調査システムの構成

(1) 装置の全体構成

前述のような設計思想に基づいて開発された自動打音調査システムの概要を図－1に示した。図に示したように、本システムは、打撃ユニット、保持ユニット、打音分析ユニットから構成される。以下に各ユニットの構成を簡単にまとめる。

1) 打撃ユニット：打撃ユニットはバネにより一定の力でハンマを押出す部分と走行ガイド装置および打撃音を集音するマイクロフォンから構成される。これら全体を防音フードで覆うことで交通騒音等の影響を遮断することとした。

また、防音フード内にCCDビデオカメラを取り付けることにより、打撃覆工面の映像を記録できる。

2) 保持ユニット：電磁波探査用のアンテナ保持装置をベースに構成されており、移動車輦上に固定される。保持ユニットは可動性を有しており、その先端に打撃

ユニットを取り付けることにより、天端～肩部・側壁までの調査が可能な構造となっている。

3) 打音分析ユニット：打音分析ユニットは移動車輦の運転席等に搭載され、調査結果をリアルタイム表示するとともに記録・保存を行う。その際、打点位置は移動車輦に取り付けた距離計によって計測し、同時に記録・保存するものとした(図－1、図－2参

照). 本システムに用いられる距離計は, 測定誤差が測定距離の 1%未満であることから, 適切な調査区間の設定や, 途中でマーキングを入れることで誤差が加算されないようにすることが可能であり, 実用上の問題は生じないものと考えられる.

なお, 図-1は 2t トラックをベースとして組み立てた本システムの構成例であるが, 本システムは保持ユニットが据え付け可能な台車であれば搭載が可能であり, 水路や歩道トンネル等の小断面トンネルから高速道路トンネルなどの大断面トンネルまで幅広く適用が可能である.

また, 保持ユニットのブーム台部分は約 60cm 四方と小さく, 高所作業車のステージ部にも取り付けが可能であるため, 保持ユニット自体のブーム長さによらず, さらに大断面トンネルなどにも対応することができる.

(2) 打撃音分析装置の原理と概要

本システムに適用した打撃音分析装置は, 500g の球形ハンマで叩いた打撃音を狭指向性マイクロフォンで収録し, 以下に示す方法で求められる音響エネルギー指数 (0~200 の数値) で表示するものである.

図-3に示すように, 健全部の音響エネルギーの分布に対して, 欠陥部 (浮き, 空洞, 劣化部など) のエネルギー分布は, より低周波成分にピークが移動する. ここで, 図中の欠陥部のピークに相当する, 特定帯域の音響エネルギーに着目し, この部分の音響エネルギーと打撃により発生した全音響エネルギーとの比をとることで音響エネルギー指数を求めている. 具体的には, トンネ

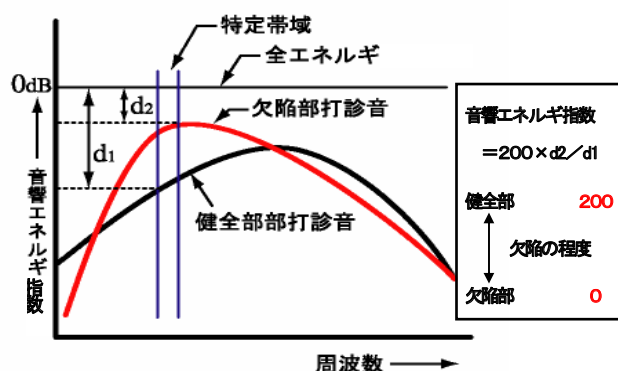


図-3 音響分析の原理

ル覆工に剥離等の欠陥がある場合には音響エネルギー指数が 0 に近い値を示し, 健全な場合には 200 に近い値を示す.

なお, 音響エネルギー指数は覆工の強度などコンクリートの物性自体を判定するものではないが, これまでの実績からこの指数が 100 程度より大きな値であれば健全であると考えてよいことが確認されている.

この音響エネルギー分析装置 (図-4) は, これまでは人力打撃用として開発され, 多数の適用実績を有するものであるが, 今回の開発に伴い, 打音分析速度の向上と出力のデジタル化について改良を行い, 一定時間間隔で打撃される音響データを確実に取得することを実現した. 今回新たに開発を行った部分について, 合わせて図-4に示した.

4. 現場適用実験

現場適用実験は, 建設後 30 年以上を経過した道路トンネルにおいて実施した. この実験は, 本システムを実際のトンネルに適用した場合の基本的な性能を評価することを目的としている. 具体的には, 取得データの安定性と調査データと覆工状況の対比等について確認することとした. 以下に各項目に対する検討結果を示す.

(1) 取得データの再現性

本システムによって得られるデータの安定性について評価するために, 天端および肩部における延長約 30m の測線を設定し, この上で繰り返しデータを取得

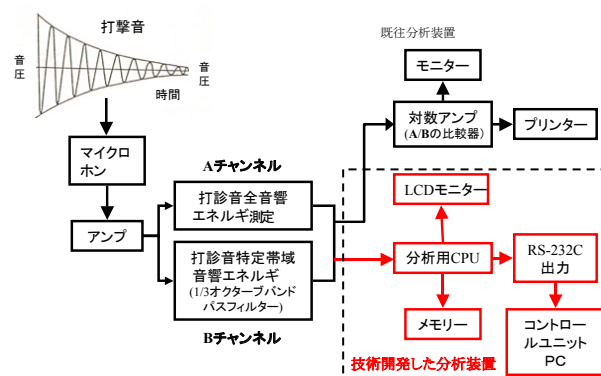


図-4 打撃音分析装置の概要

して検討を行った。図－5に天端部測線において2回測定した音響エネルギー指数の分布を示した。この図からわかるように、2回の測定結果はほぼ一致しており、音響エネルギー指数の値は130～180の間で分布している。一方、肩部における調査結果では、平均的な音響エネルギー指数が130程度と天端に比較してやや低いものの、全体としてほぼ同等な結果が得られた。これらのことから、本システムによる調査結果には十分に再現性があるものと考えられる。

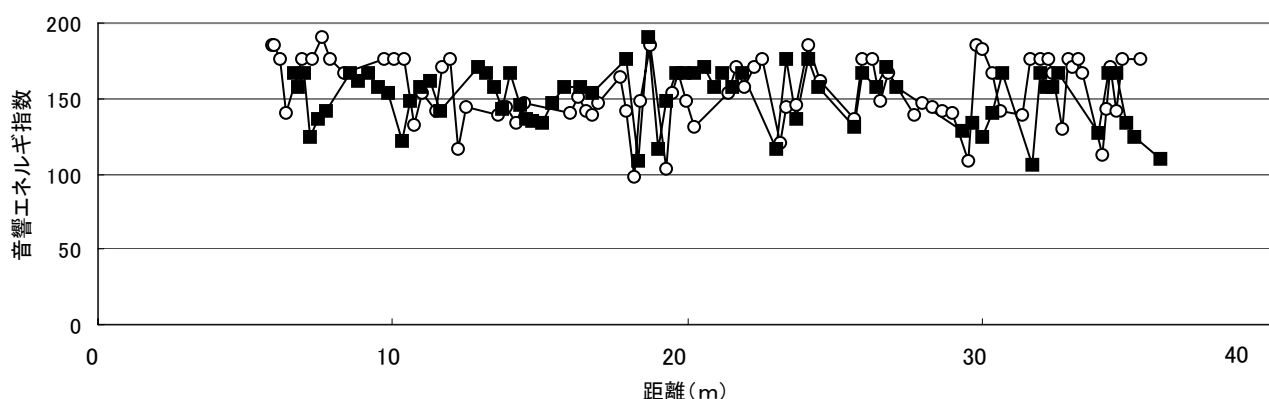
また、前述したように、通常のトンネル覆工においては、この指数が100以上の部分では覆工が健全であると判定できることが確認されており、本実験を行った区間では覆工の健全性が保たれているものと判断される。このことは目視観察によっても、この区間で覆工表面の劣化や閉鎖クラックなどの変状が見られなかったこととも合致している。なお、図－5の取得データにばらつきが生じた原因としては、打撃位置が各測

点とも微妙に異なっていることや、トンネルの覆工の表面にはフィルム状に泥が付着していたことなどの影響が考えられる。

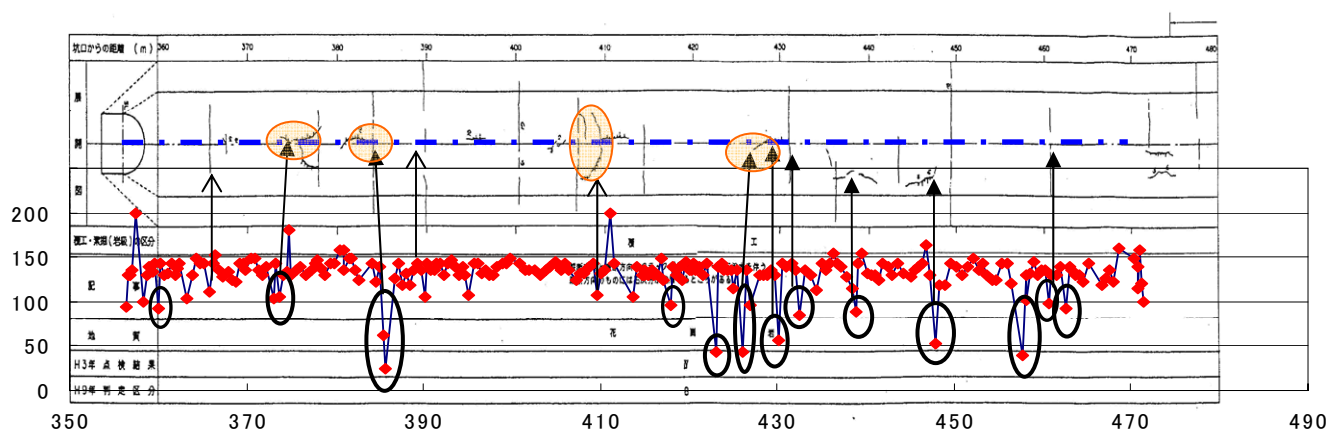
(2) 調査結果と覆工状況との対比

本システムで連続的に測定した場合のデータの安定性と、実際の覆工の状況との対比を確認するために、前述した安定性の評価実験とは別に、約100mの測線を設けて連続測定実験を実施した。測定結果を図－6に示したように、ほぼ全区間において安定したデータが取得されていることがわかった。また、音響エネルギー指数の平均値は131、標準偏差20.6と、安定性確認実験結果とほぼ等しい結果が得られた。

この図の中で、音響エネルギー指数が100以下を示す位置（○で囲んだ部分）は、そのほとんどが展開図に示された覆工面のひび割れまたは目地近傍に対応しており、これらの近傍で覆工表面の状況を反映したもの



図－5 データ取得安定性の確認実験結果



図－6 調査結果と展開図の対比状況

と考えられる。

なお、実験時のトラックの移動速度は時速 1.5～2.0km/h であり、このときの打点間隔は 30～45cm 程度であったことから、縦断方向の測線間隔を 50cm 程度に配置することにより、ほぼ 50cm 四方に 1 点以内の打点密度での調査が可能であるものと考えられる。

(3) 人力打撃と自動打撃との比較

本システムで移動しながら取得した測定データに対する調査結果の確実性を評価するために、自動打音装置と人力による打音調査結果との比較を行った。実験は、約 8m の測線を設けて本システムによる連続測定を実施した後、同じ測線上を熟練者により可搬式の測定装置を用いて 50cm 間隔でデータ取得を行うことにより実施した。図-7 に示した測定結果から、自動打音結果は人力による打音と同様に安定したデータが取得されていることが確認された。このときの、音響エネルギー指数の平均値は人力による打音が 160 であったのに対して、本システムの測定結果は、150 程度の値が得られており、やや低い値となっているものの十分に再現性のあることが確認された。特に、182m 付近の音響エネルギーが急激に変化する点に対しては、人力も本システムも同様の傾向を示しており、微妙な覆工の変化を把握することが可能であった。

5. 調査結果の活用方法に関する検討

(1) 覆工表面健全性の平面分布図の作成

本システムの調査結果は、図-5 に示したようなグラフをリアルタイムで取得することができるほか、複数の測線の調査データをもとに平面分布図を作成することが可能である。図-8 は再現性の確認実験を行った 30m 区間（図-5 の測定区間）において天端と両肩部の 3 測線を設けて実施した結果をもとに平面分布図を作成した例である。この例には、覆工の目地と目視観察で確認されたひび割れについても記入している。なお、この事例では測線設置密度が粗いため、やや不自然な覆工表面の音響エネルギー指数分布となっているが、必要に応じてより密な測線配置での調査を行うことにより、十分な精度で平面分布図を作成することが

できるものと考えられる。こうした表示により、直感的に劣化部分の推定ができることに加え、連続する空洞や劣化部分などがある場合は、その範囲も推定することが可能となるものと考えられる。また、図-9 のような打音調査を行っている覆工壁面のビデオ画像と比較することにより、劣化部の状況と音響エネルギーの比較検証、打継ぎ目や埋設金物など劣化ではない部分の異常データを除去するかどうかの検証をすることも可能となる。

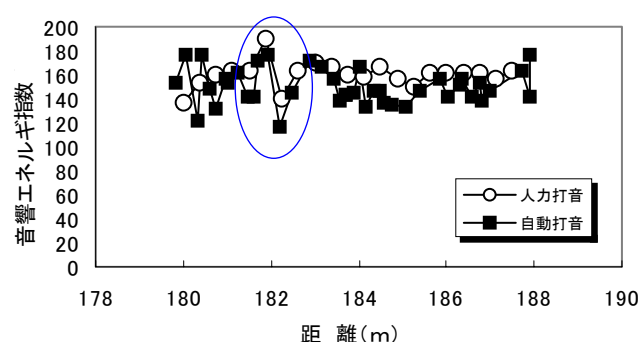


図-7 音響エネルギー指数の比較

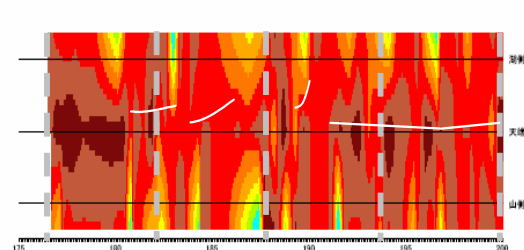


図-8 調査結果の平面分布図



図-9 覆工壁面の画像

(2) 電磁波探査結果との併用

本システムは前述したように電磁波探査装置と共用可能な保持装置を用いていることから、自動打音調査と電磁波探査を一つの作業台車を用いて実施することが容易にできる。このことにより、ハンマ打撃により把握される覆工表面および比較的表面に近い部分の劣化、剥離、浮き等の不具合と、電磁波探査により把握される覆工の巻厚や覆工背面空洞などの調査結果を組み合わせることにより、総合的に評価することができ

図-10 は供用中のトンネルにおいて、本システムで行った打音調査結果と電磁波探査結果の分布図、それらを組合わせた分布図を示したものである。打音調査、電磁波探査の結果は上3つの分布図のようにそれぞれ別々に示されるが、測線、距離を基準に3つを組合わせることにより、図-10の一番下の図のような直感的に調査結果を確認できるような分布図を作成することが可能となる。また、目視観察で確認されたひび割れの分布を破線で書き加えるとさらに状況を把握す

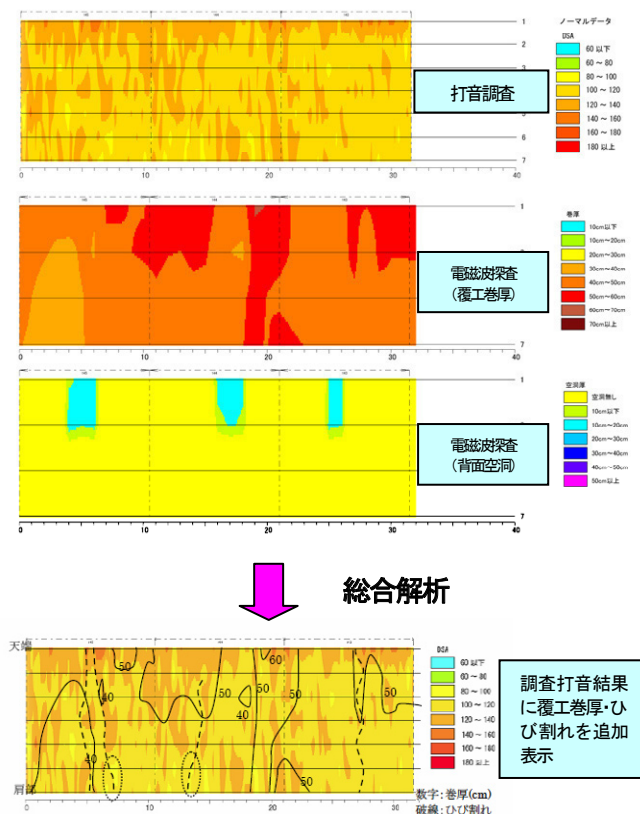


図-10 レーダー探査との総合解析結果

ることが容易となる。

このように、調査結果が同時に確認できることにより、覆工の表面だけでなく内部構造から打音調査で異常が見られた部分の原因についても推定することが可能である。

(3) 評価基準の客観化

本システムは前述したように数値化した測定結果により評価し、デジタルデータとして記録する。このことは調査対象を継続的に監視することが可能であることを示している。本システムで調査したトンネルを一定周期後に再度調査し、測定データを比較することで継時的変化や新規に発生した劣化部分を確認できると同時に、補修した箇所がある場合には対策による効果についても客観的に検証することが可能となる。このように、竣工検査、健全性の診断検査、補修後の効果の確認など、いろいろなケースで本システムによる検査の適用が考えられる。

6. まとめ

本研究では、筆者らが開発した自動打音調査システム「易打天」が、現場実験を通じて十分に覆工のハンマ打音調査に適用できることが確認された。また、打音調査と電磁波探査の組合わせによる覆工健全性の総合的な評価も可能であることを示すことができた。同時に調査結果についても客観的なデータとして記録できることで、継時的変化の検証が可能であると考えられる。これらのことから、本システムの適用に関して有効性を確認すると同時に、様々な検査への適用の可能性についても示すことができた。

今後は、新設トンネルの竣工時検査への適用や既設トンネルの健全性評価などにおいて、現場調査結果を蓄積しながら、より実用性の高いシステムとするための改良を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 笠博義, 小泉和広, 稲垣正晴: トンネル覆工の自動打音調査システムの開発, 土木学会トンネル工学研究発表会, vol.13, pp.343-348, 2003