

トンネル覆工の自動打音調査システムの開発

DEVELOPMENT OF AUTOMATED IMPULSE ACOUSTIC SOUNDING SYSTEM FOR TUNNEL LINING

笠 博義¹⁾, 小泉和広²⁾, 稲垣正晴³⁾

Hiroyoshi KASA, Kazuhiro KOIZUMI, Masaharu INAGAKI

Impulse acoustic method using by hummer is applied generally for sounding of tunnel lining in Japan. Automated impulse acoustic sounding system for tunnel lining was developed. The system consist of hitting unit, supporting unit and acoustic analysis unit, and the system was set up on the vehicles. Some kinds of experiments for function of the system were carried on actual tunnels or sham test facilities. As the results, they were clarified the system was able to obtain reproducible data sufficiently and the system could find damaged lining area exactly.

Key words: impulse acoustic sounding, tunnel lining, automated system, site investigation

1. はじめに

トンネル覆工剥落などの事故を防止し、トンネル覆工に必要な機能を確保していくためには、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である。こうした点検・検査方法には目視観察とハンマ打撃による方法が基本的な調査法として広く適用されており、より目的を限定しての調査では電磁波探査、超音波探査などさまざまな方法が適用されている。このうち、目視点検に関しては、ラインセンサカメラやレーザを用いた調査技術の開発が進んでおり、一部実用にも適用されている。これに対して、ハンマ等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が、いずれも開発・試験適用段階であり、今後の実用化が望まれている。

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について、その概要^{1),2)}と現場適用実験結果³⁾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. ハンマ打撃による調査法の問題点と自動化に向けての課題

従来のハンマ打撃による覆工調査は、人間が直接覆工の状況を見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。さらに、覆工剥落が懸念される場所においてはその場で容易に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、データ保存などの点で問題があるほか、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、長大トンネルを点検・

1)正会員 ハザマ本店土トンネル統括部, 2)正会員 (株)ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業部・地盤究開発センター, 3)正会員 (株)ウォールナット 調査部

表－１ ハンマ打撃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	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
作業性	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	自動打撃装置の開発 トンネル軸方向での連続調査
結果の記録・保存	調査結果の記録ができない	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

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システム開発の方向性を明確にすることとした。この表に示すように、現状の方法の問題点は、①評価基準の客観化、②調査結果の記録・保存、③作業全体の効率化などに集約され、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簡便性等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。同時に、このデータを打撃位置の情報とともに保存し、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を可能とした。こうすることによって、調査結果は電子データとしてインデックス化して保存できるため、②の調査結果の記録・保存の課題にも対応できる。

③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ほとんど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

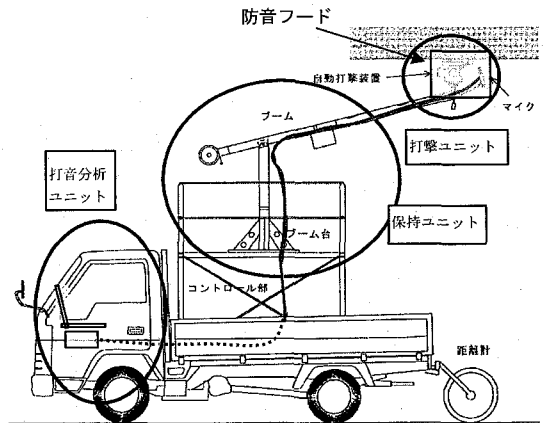
（１）装置の全体構成

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：打撃ユニットは一定の力で覆工を打撃するハンマと連続探査を可能とするガイド装置およびマイクロフォンから構成され、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。

２）保持ユニット：レーダ探査用のアンテナ保持装置をベースに構成されており、探査時は移動車輛上に固定される。その先端に打撃ユニットを取り付け、天端～肩部・側壁までの調査が可能な構造としている。

３）打音分析ユニット：打音分析ユニットは移動車輛の運転台上に搭載され、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。また、打点位置は移動車輛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。本システムに用いている距離計は、測定誤差が測定距離の１％未満であることから、調査区間の設定や、途中でのマーキングの挿入で誤差の加算を防ぐことにより、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。



図－１ 自動打音調査システム構成例

(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の球形ハンマによる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-2に示すように、覆工健全部の音響エネルギー分布に対して、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強度などのコンクリート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-3)は、これまでもも可搬型として開発され、多数の適用実績を有するものであるが、本システムへの適用に伴い、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-3に示した。

4. 自動打撃装置に関する模擬トンネル実験

自動打撃装置の特性および安定性を確認するため模擬トンネル実験を実施した。この実験では自動打撃装置に取り付けて使用するマイクロフォンの位置や打撃面と球形ハンマとの離間距離等の最適な配置を検討することを目的とし、実務経験10年以上の熟練技術者による人力打撃結果との比較により、評価を行うものとした。

(1) 実験概要

実験は、図-4に示したように、鉄筋コンクリート製の模擬打撃面に保持ユニットを介して打撃ユニットを設置して行った。このとき、保持ユニット自体は移動しないため、実験では、同一地点のみを打撃しないように打撃面をわずかにずらしながらデータ取得を行った。なお、人力による打撃は上述したように熟練技術者が行い、この結果と自動打撃によって得られた音響エネルギー指数との変動係数に着目して比較することにした。なお、打撃回数は、人力による測定が6回、本システムによる測定が8~15回である。

(2) 打撃面とマイクロフォンの離間距離

これまでの音響エネルギー分析装置においては、人力で調査を行う場合の最適なマイクロフォンの離間距離を打撃面から20~30cm程度としていたことから、本実験では人力調査結果はこれに従って実施した。この結果と自動打撃装置による調査結果との比較について図-5に示した。

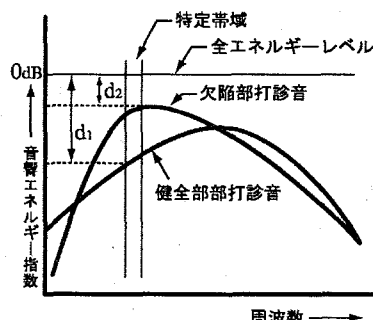


図-2 音響分析の原理

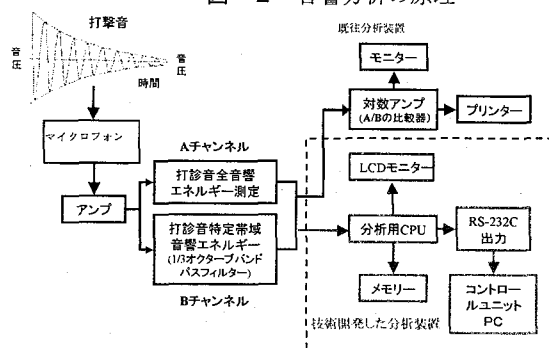


図-3 打撃音分析装置の概要

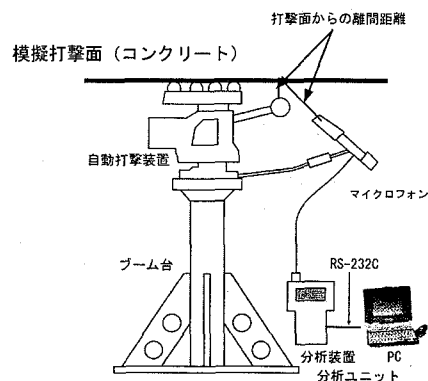


図-4 模擬実験の概要

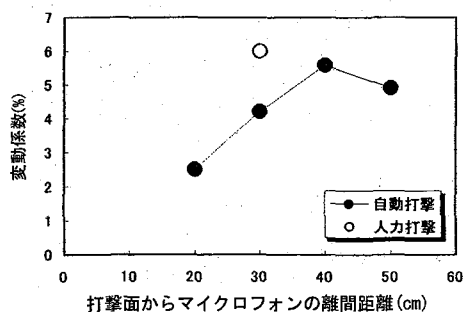


図-5 マイクロフォンの離間距離と変動係数

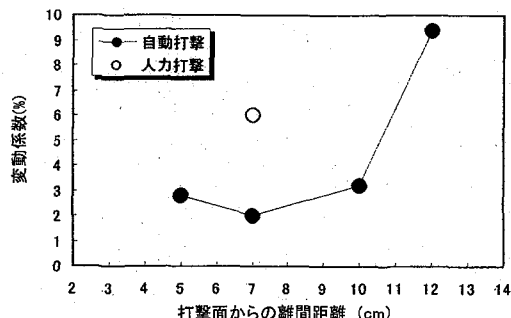


図-6 ハンマの離間距離と変動係数

この図からわかるように、人力による打撃の変動係数は6%を示すのに対して、自動打撃装置は、20～30cmの離間距離では変動係数が2.5～4.2%となり、40cmの離間距離で5.6%の変動係数を示している。このことから、離間距離によらず自動打撃装置の結果は熟練者による人力打撃結果よりも変動係数が小さく、再現性が高いことがわかった。同時に、自動打撃装置における最適なマイクロフォンの離間距離も、人力調査と同様に20～30cm程度であることが確認された。

(3) 打撃面と球形ハンマの離間距離

人間により打音点検を行う際の打撃面とハンマとの離間距離と打撃力は毎回変動し、打撃により発生する音圧も一定ではないものと考えられる。これに対して、本自動打撃装置はハンマ打撃距離を固定することで打撃力を一定にすることが可能である。ここで、覆工に悪影響を与えず十分な打撃力を得るためには、打撃面とハンマとの離間距離を最適値に固定する必要がある。図-6に示した打撃面からハンマまでの離間距離と変動係数との関係から、自動打撃装置は、5cm～10cmの離間距離で2.8～3.2%の変動係数を示し、離間距離が10cm以上になると急激に変動係数が大きくなることが確認された。このことから、離間距離を5cm～10cmの範囲内に設定すれば、自動打撃装置の結果は熟練者による人力打撃結果よりも変動係数が小さく、再現性が高いことが確認された。

5. 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、取得データの再現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) 取得データの安定性

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、天端および両肩部において延長約30mの測線を設定し、この測線上で何回かデータを取得して検討を行った。図-7に天端部測線において2回測定した音響エネルギー

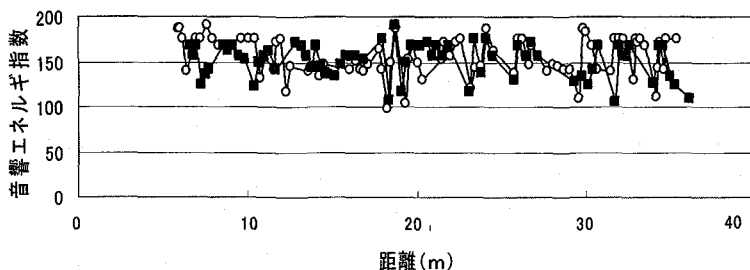


図-7 データ取得安定性の確認実験

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は130～180（平均値：146、標準偏差：20）であった。一方、両肩部において各2回実施した実験では、音響エネルギー指数の平均値は130～135、標準偏差20～30となり、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ひび割れの閉合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-7 に示した 2 回の測定データにおいて、ある程度の差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、本トンネルの覆工の表面には覆工表面全面にフィルム状に泥が付着しており、泥の付着状況により打撃音が局所的に変化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、前述したデータの安定性評価実験とは別に、約100mの測線を設けて連続測定実験を実施した。測定結果は図-8 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。

この図において、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、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、これらの近傍の覆工表面の状況を反映したものと考えられる。

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。

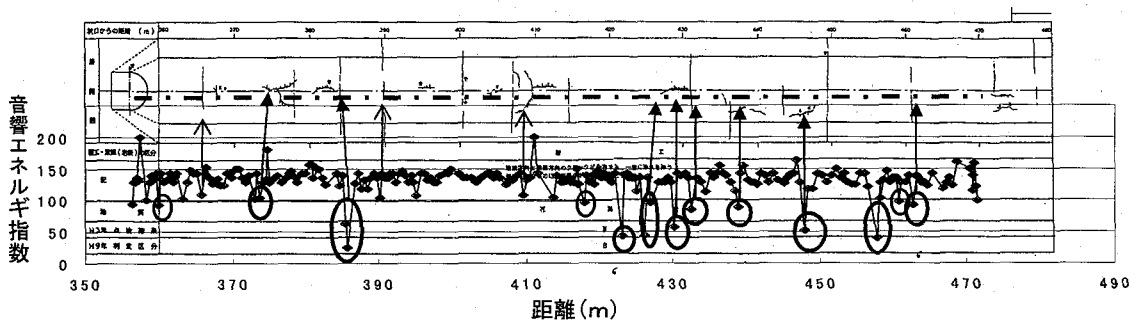


図-8 調査結果と展開図の対比状況

(3) 人力打撃と自動打撃との比較

模擬実験では、システムが固定された状況での検討結果であったため、移動しながらの測定結果と人力による打撃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、熟練者が携帯式の音響エネルギー測定装置を用いて50cm間隔でデータ取得を行うことによって実施した。図-9 に示した測定結果から、自動打撃結果は人力による打撃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。

このときの人力による打撃の音響エネルギー指数の平均値は160であったのに対して、本システムによる平均値は、149(計測1)と152(計測2)であり、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(計測1)も同様の傾向を示しており、微妙な覆工の変化を把握できる可能性を示している。

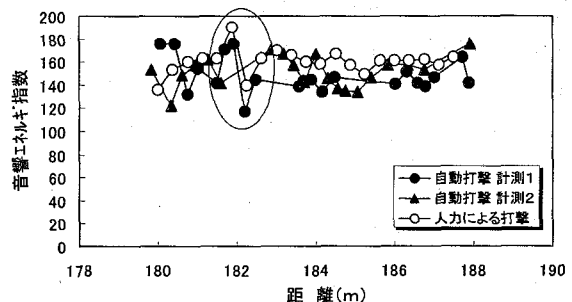


図-9 音響エネルギー指数の比較

6. 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-7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-10は再現性の確認実験



図-10 調査結果の平面展開図

を行った 30m 区間 (図-7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。この図には、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やや粗いが、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、連続する不具合などがある場合は、その範囲を推定することが可能となるものと考えられる。

(2) 電磁波探査結果との併用効果

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、ハンマ打撃調査と電磁波探査を一つの作業

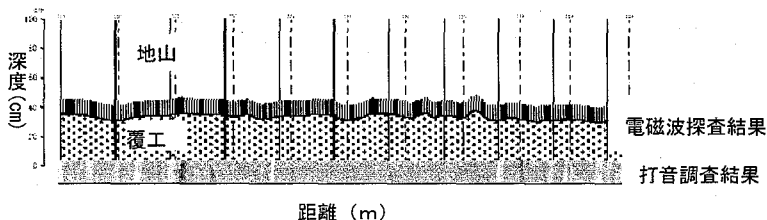


図-11 電磁波探査 (断面) との同時表示例

台車を用いて実施することが容易にできる。これにより、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、覆工の巻厚や覆工背面空洞などの電磁波探査によって把握が容易な不具合を総合的に評価することができる。図-11は竣工前のトンネルにおいて、同一測線上で行った本システムによる打撃調査結果と電磁波探査結果 (断面図) を示したものである。この図では、ハンマ打撃調査結果を図-10に示した凡例に従って色分けしたものを電磁波探査結果の断面図に組み合わせて表示している。図中の数カ所でやや音響エネルギー指数が低い部分が見られるが、これは測定箇所付近において工事用車両が発生した衝撃音の影響であることがわかっている。この図から調査を行った全区間において覆工厚、打音調査結果でも全く問題がないことが確認された。

このように、本システムにより覆工の巻厚と覆工表面の打撃調査結果について同時に確認することが可能であり、覆工の内部構造をもとにして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。

7. 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の概要について述べるとともに、模擬実験および現場実験を通じて本システムが十分に覆工の打音検査に適用できることが確認された。また、本システムによって得られるデータや電磁波探査結果をデータベース化し、トンネル施工時の情報や背面の地質情報などとともに「トンネル覆工カルテ」として記録することで、計画的なトンネル覆工の維持管理が可能となるものと考えられる。

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、現場でのデータを蓄積しながら、より実用性の高いシステムとするための開発・改良を行っていく予定である。

【参考文献】

- 1) 小泉, 他: トンネル覆工の健全性調査におけるハンマー打撃音分析技術の開発, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 2003
- 2) 稲垣, 他: トンネル覆工健全性評価を目的とした自動打音調査システムの開発, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 2003
- 3) 笠, 他: 自動打音調査システムを用いたトンネル覆工健全性調査の現場実験, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 2003