

トンネル点検に対する弾性波法非破壊検査技術

打音法、音響探査法の紹介

歌川紀之・北川真也・杉本恒美

トンネルの点検では、目視点検と叩き点検が実施される。目視点検については、画像処理技術の進歩により、これまでの覆工面のスケッチを代替する技術が開発、利用されつつあるが、叩き点検を代替する技術の開発は遅れている。ここでは、叩き点検を代替する技術として、弾性波法の非破壊検査技術である、打音法、音響探査法を紹介する。打音法は、叩き点検の結果を定量化する技術で、これまでの点検者の主観性を取り除いた技術であり、音響探査法は、高所作業車などを用いずにトンネル天端の叩き点検を実現する技術である。

キーワード：非破壊検査法、浮き・はく離、トンネル覆工、叩き点検、打音法

1. はじめに

トンネルを長期的に使用していくためには、適切な維持管理が必要となる。そのため、点検が実施される。トンネル点検やその他コンクリート構造物の点検では、目視点検と叩き点検が行われる。目視点検では、コンクリート表面の状態や表面に露出したひび割れの分布や幅を観察する。一方、叩き点検では、ハンマーでコンクリートを打撃し、その音から、コンクリート表層の浮きやはく離を探查する。これらの結果から、トンネル特にコンクリート覆工の健全性を評価する。健全性の評価から、トンネルの安全性や第三者への影響が予想される場合は、詳細な点検の実施や補修が成されることになる。したがって、目視点検や叩き点検の結果は、その基礎データとなるので重要である。

ここでは、叩き点検の精度、データのエビデンス性の向上、さらに作業の安全性・合理化を進めるための、叩き点検を代替する非破壊検査技術の開発について述べる。着目した技術は、弾性波法に分類される打音法、音響探査法である。弾性波法¹⁾とはコンクリート表面に設置した発信子や衝撃入力装置によって内部に弾性波を発生させ、これをコンクリート表面の受信子で測定し、内部の欠陥の位置や寸法を測定する方法である。広い意味で、叩き点検も弾性波法に分類される。叩き点検と打音法の違いは、前者はハンマーによる打撃音を点検者が耳で聞いて、欠陥の有無を主観的に判定する方法で、後者はマイクロフォンで打撃による音圧データを収録・分析し、欠陥の有無や規模を客観的に

に判定する方法であることである。

2. 現状の叩き点検の課題

ハンマーによる叩き点検を用い、覆工面の浮きやはく離、また、ボルトの緩みなどが調べられる。叩き点検は、叩いて音を聞くという簡単な作業で、致命的な欠陥を探し出すことができるため、土木分野、機械分野など広い分野で使われている技術である。しかし、叩き点検には以下の課題があり、改善が求められている。

- (1) 点検者の経験的な判断で評価されるので、欠陥であるか、健全であるのか、微妙な箇所（灰色の箇所）が出てくる。また、長時間の点検により、判断にぶれが生じる可能性がある。
- (2) 結果は、展開図などに異音箇所を書き込むのみ（程度は数量化されていない）なので、データのエビデンス性に課題が残る。
- (3) 点検作業の中で、叩き残し（検査未了部）の出る可能性がある。
- (4) トンネル天端などの点検については、高所作業車や足場などの上から、上向きの作業となるので、危険で、かつ苦渋作業となる。

とは言われているものの、叩き点検は簡便な手法であり、異音箇所については検査と同時に欠陥箇所として叩き落とす作業も可能なので、点検と同時にただちに補修するという観点では非常に有効である。ただし、実際の現場を考えると、異音箇所をすべて、叩き

落とすことは不可能なので、グレーゾーンについて叩き落とさず、経過を観察するケースもある。このあたりも、点検者の判断に委ねられていることが現状である。

3. 叩き点検を代用する非破壊検査技術

上記の叩き点検の課題を解決するために非破壊検査技術の開発や導入が考えられ、一部は実施されている。非破壊検査技術として、叩き点検と同じ原理を用いられている弾性波法、建築のタイル検査で用いられている赤外線法、覆工背面の空洞や舗装下の空洞の探査で用いられている電磁波法がある。なお、弾性波法については、加力方法や振動測定方法が異なるいくつかの方法（打音法、レーザー超音波法、音響探査法）があり、これらの手法についてのメリット、デメリットを表一に示す。非破壊検査の弾性波法の中に、超音波法やAE法、衝撃弾性波法などもあるが、叩き点検を直接代替する技術ではないのでここでは掲載しない。以下、現状、開発中の叩き点検を代替する弾性波法ベースの非破壊検査技術である、打音法および音響探査法を紹介する。

4. 打音法

(1) 概要

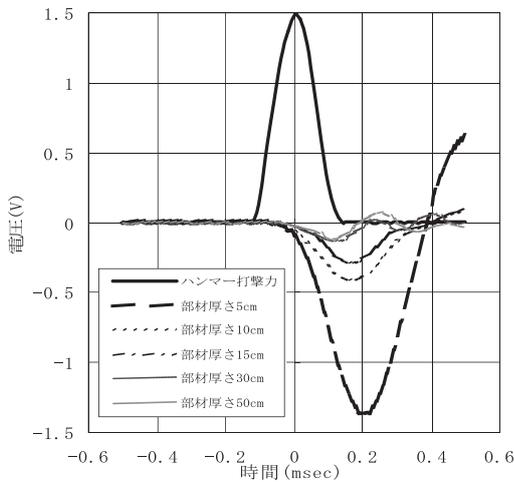
打音法²⁾とは、コンクリート表面を打撃又は加振し、その信号入力に対するコンクリートの応答を“音”として検出、信号処理をした後、客観的な基準に従ってコンクリート部材の健全性を判定するという、プロセスを具備する手法である。現状では、分析方法については指針²⁾には書かれていない。ここで説明する打音法は、コンクリート表面とはく離や空洞上面間の薄いコンクリート板のたわみ振動を発生させ、ハンマによる打撃力とその振動により生じた音圧をマイクロフォンで収録・分析することにより、音圧の大きさから板の厚さを評価し、健全部と欠陥部を判別する方法である。1m×1mの厚さの異なる(5cm, 10cm, 15cm, 30cm, 50cm)コンクリート板を打撃し、その音をフード付マイクロフォンで収録した結果(t = 0.6 msec までの時系列図)を図一に示す。図一に示すように厚さが小さい板(t = 5 cm)では、発生する音圧(振動)が大きく、厚さが大きくなるほど、音圧は小さくなり、t = 30 cm程度で、一定の音圧になることが分かる。本打音法ではこの原理を用い、1波目の最大振幅から厚さを評価する。

表一 叩き点検を代替する技術の長所・短所

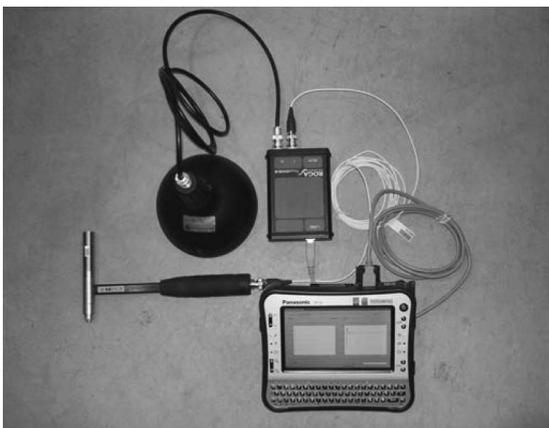
	概要	長所	課題・短所
弾性波法	打音法 ³⁾	ハンマーによる打撃音をマイクロフォンで収録・分析し、欠陥の有無や規模(深さ・広さ)を評価する。	叩き点検に比較し、定量的な評価が可能。
	レーザー超音波法 ⁴⁾	レーザーによりコンクリート表面を加振し、その振動をレーザードブラ振動計で測定し、その振動データから、欠陥の有無を判定する。	非接触で遠距離から探査可能。 高電圧が必要。 レーザー照射の危険性。 測定の効率化や探査範囲を広げるためには、ロボット化が必要。
	音響探査法 ^{5~8)}	スピーカで発生させた音波により、コンクリート表面を振動させ、その振動をレーザードブラ振動計で測定し、その振動データから欠陥の有無や規模(広さ)を評価する。	非接触で遠距離から探査可能。 加力が小さいため、ノイズ除去技術が必要。 測定の効率化や探査範囲を広げるためには、ロボット化が必要。
赤外線法 ⁹⁾	物体表面から放射される赤外線を検出素子を用いて二次元的に走査し、検出された赤外線量を映像として表示する方法である。はく離や空洞などの欠陥部と健全部では、気温・日射の変動時に、温度分布が異なるタイミングがあり、その差異から欠陥部を抽出する方法である。	短時間で広領域の探査を非接触で可能。	環境条件に左右される。 アクティブ法(人工的な温度変化利用)は、大断面では難しい。 覆工のうき・はく離探査という観点では、叩き点検に比較し、探査深度がやや小さい。
電磁波法 ¹⁰⁾	インパルス状の電磁波をコンクリート内に放射すると、その電磁波がコンクリートと電気的な性質が異なる空洞部で反射する。その経過時間から、空洞の位置を検知する。	非接触で探査可能なため、ロボット技術により広領域に対応できる。 コンクリート内部の空洞やジャンカを見つけることができる。	非接触でも測定は可能であるが、遠距離からの測定は難しい。 浮き、はく離など間隙が小さい欠陥の検出が難しい。 鉄筋などの影響が大きい。

振幅値比（1波目の最大振幅／最大打撃力）から求められた部材厚さの分布図を作り、健全部の厚さ（例えば、トンネル覆工であれば30cm）と比較することにより、欠陥の有無や、表面からはく離部分や空洞の表面まで近い部分などの欠陥深さを評価することが可能となる。

用いたシステムは、写真—1に示す健コン診断ポータブルで、インパクトハンマー、フード付きマイクロフォン、ADコンバータ、モバイルPCから構成される。本システムはバッテリー駆動のため、現地測定において、電源は必要としない。



図—1 厚さが異なるコンクリート板により発生する音圧波形



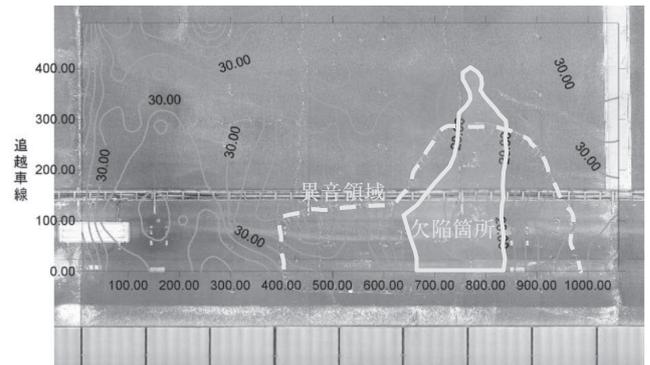
写真—1 使用した打音法の測定機器（健コン診断ポータブル）

(2) 探査事例

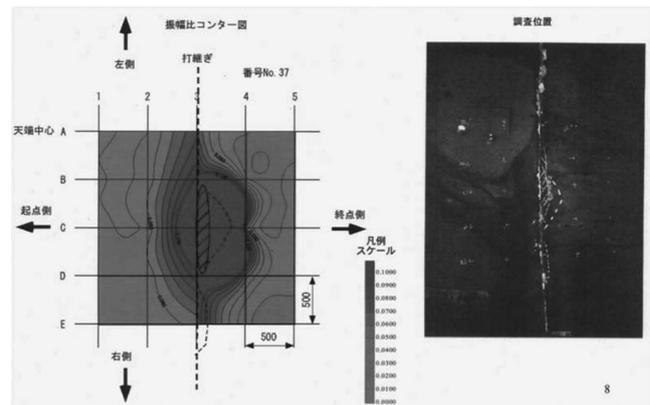
本技術を道路トンネルの覆工探査（側壁部およびつま部）に用いた結果を以下に示す。覆工側壁（5m × 10.5m）の探査結果（厚さのコンタ）を覆工表面の写真に重ねた結果を図—2に示す。なお、測定は0.5m間隔で、高所作業車の上から実施した。ここで、白色の領域が、打音測定における浮き、はく離などの欠陥

箇所を示し、白色の破線が、叩き点検の異音領域を示す。覆工表面の写真と比較し、ひび割れに沿った箇所ではなく離が生じていることが分かった。

つま部周辺（測定箇所を右写真に示す）を測定した結果（振幅値比表示、2m × 2mの正方形領域）を叩き点検と比較し、図—3に示す。本結果から、叩き点検の結果より広い領域（黒色箇所）ではく離が生じていることが分かる。



図—2 打音法による測定例1（トンネル覆工壁部）



図—3 打音法により測定例2（つま部周辺）

(3) 適用性と課題

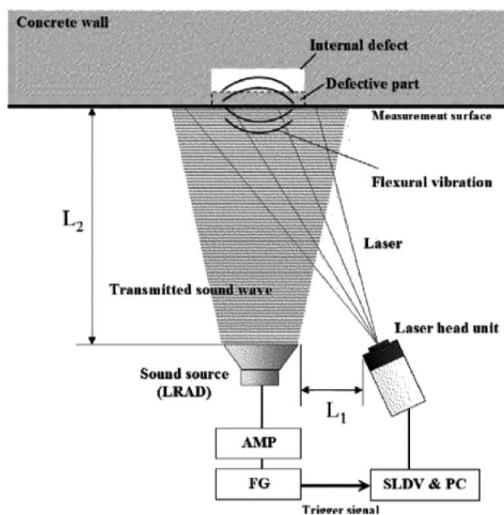
叩き点検に比較し、測定点のマーキングなど手間がかかるものの、定量的な測定結果がデジタルデータ（エビデンス性が高い）で残り、変状の変化を追うことも可能なため、有効な技術と考えられる。

本技術が使われるようになるためには、ロボット化など検査の自動化・合理化を進める必要がある。また、本評価法（振幅値比から厚さを評価する）については、音響探査法や他の弾性波法でも適用可能であり、叩き点検の定量化技術という観点では利用できるものと考えられる。

5. 音響探査法

(1) 概要

音響探査法は非接触で離れた位置から、探査が可能になる技術で、トンネル天端の叩き点検が、高所作業車や足場なしに路面上から実施できるようになる。図一4に示すように、ハンマーで加力する代わりに、スピーカ（LRAD）から発生させた大きな音（コンクリート表面で100 dB）を用い、コンクリート面を振動させ、その振動を耳で聞く代わりに、スキャニングレーザドプラ振動計（SLDV）により振動（面外の振動速度）分布を測定・分析し、欠陥を探査する技術である⁵⁻⁷⁾。着目している振動は、打音法、叩き点検と同様に、はく離部分に発生する板のたわみ振動である。打音法に比較し、加力は1/100程度と小さく、レーザドプラ振動計の感度が高いので、データにノイズが含まれる可能性があり、着目するたわみ振動を抽出するために文献⁸⁾に示すようなノイズ処理を行っている。



図一4 音響探査法の機器構成図

(2) 探査事例

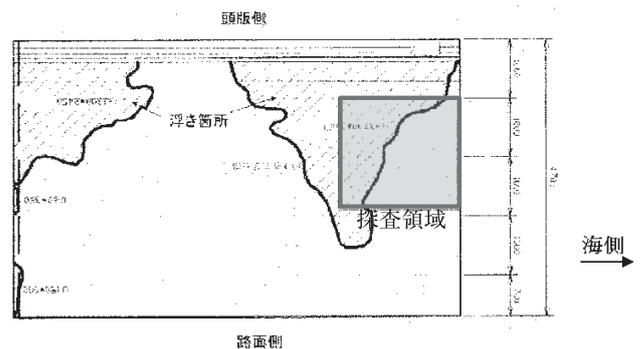
写真一2に示す高速道路下のボックスカルバートの探査を実施した。本ボックスカルバートは、海岸線から100 m程度の位置にあり、塩害による鉄筋腐食が原因で、はく離が生じており、20年前には、断面修復工と防水ライニング補修が実施されている。叩き検査の結果を図一5に示す。

探査は、海側の壁部と天井部で実施し、図一5の壁部2 m × 2 mの領域の探査結果を以下に示す。測定結果を振動エネルギー比（健全部に比した振動のしやすさ）のコンタで図一6に示し、叩き点検の結果

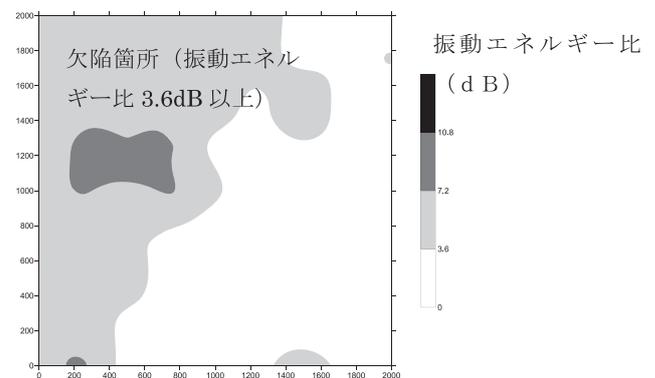
と比較した。ここでは欠陥部と健全部を分けるしきい値（健全部の振動エネルギーとそのばらつきから決定）を3.6 dBとすると、叩き点検の結果と良好に一致していることが分かった。また、本探査では高速道路の交通規制は実施しておらず、道路供用時でも測定が可能であることが分かった。



写真一2 音響探査を実施したボックスカルバート



図一5 壁部の叩き点検の結果と音響探査を実施した領域



図一6 音響探査法の結果（振動エネルギー比）

(3) 適用性と課題

現地の高速道路下のボックスカルバートでも、供用中に探査ができることが分かった。また、本測定では振動エネルギー比を用いており、固有周波数を介さな

いでも、欠陥の位置が分かる。

課題としては、以下の項目が挙げられる。

- (1) 現地の広い領域の探査では、測定の自動化が必要である。
- (2) 測定では、100 dB の音を発生させるため、周辺への騒音被害が危惧される。そこで、現在、指向性の鋭い超音波音源を用いることにより音を1点に集中させ、周辺への影響を小さくする技術の開発を進めている。

6. おわりに

叩き点検を代替する技術として、弾性波法である、「打音法」「音響探査法」について紹介した。今後これらの技術が現場で使われるようになることを望むものである。維持管理において、エビデンスが重要になるのであれば、このような客観性のある評価ができる技術は必要と考えられる。

当社における打音法の技術開発は、実際着手した時期は1990年代初めで、20年以上経過している。1999年の福岡トンネル内でコールドジョイントに起因したコンクリート塊の落下や近年の2012年の笹子トンネルの天井版落下などを経て、叩き点検の改良は叫ばれてきているが、実現していないことが現状である。そのような状況下でも、技術者の努力により、笹子トンネルや豊浦トンネル以外には、人身に関わる第三者への大きな覆工関連の事故は発生していないものと考えられる。これは、トンネルは変状などが無ければ安全性が高い構造物であるとともに、たゆまぬ検査と施工における覆工品質の向上などいくつかの要因があると考えられる。しかし、今後少子化が進む中で、構造物の年齢も高くなるので、効率よく、精度高く、点検を行い、対策を取っていくことは大変重要なことである。そのために、できるだけ良い点検技術を後世代へ残すことが必要である。

叩き点検を代替する非破壊検査技術の長所・短所については、筆者の主観が入っており、また技術開発は日進月歩のため、事実と異なる可能性もあるので、ご意見をいただければ幸いである。あくまでも良い検査技術を後世へ残すことが大事であり、今後、さらに良い技術が開発されることを望むものである。

謝 辞

なお、音響探査技術については、平成22年～25年度の国土交通省の「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の支援を受け、桐蔭横浜大学、明篤技研および当社と実施した成果である。また、現地測定では、NEXCO 中日本、NEXCO 西日本の協力を得た。関係者には謝意を表する。

JCM A

《参考文献》

- 1) (株)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'14【基礎編】
- 2) (株)日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第3部：打音法, NDIS 2426-3, 2009.
- 3) 北川他；健コン診断ポータブルの開発—打音法によるコンクリート診断技術—, 佐藤工業株式会社技術研究所報, vol.34, 2009.
- 4) 島田他；レーザーを用いたコンクリート欠陥検出の進展, 非破壊検査 61 (10), pp.519-524, 2012.
- 5) R.Akamatsu, et.al. : Proposal of Non Contact Inspection Method for Concrete Structures, Using High-Power Directional Sound Source and Scanning Laser Doppler Vibrometer, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.52, 07HC12, 2013.
- 6) K.Katakura, et.al. : Study on detectable size and depth of defects in noncontact acoustic inspection method, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.53, 07KC15, 2014.
- 7) 杉本他：コンクリート非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法, コンクリート工学会年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2062-2067, 2014.
- 8) 杉本他：音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発—(2) トーンバースト波とゲート処理を用いたS/N比の改善—, 土木学会(第69回)年講, 2014.
- 9) 久保他：赤外線熱計測によるトンネルコンクリートの浮き・はく離調査手法の検討, 土木学会(第69回)年講, 2014
- 10) 江澤他：トンネル覆工コンクリート検査用3次元映像化レーダを開発, 三井造船技報, No.184, 2005.

【筆者紹介】

歌川 紀之(うたがわ のりゆき)
佐藤工業株式会社技術研究所
上席研究員



北川 真也(きたがわ しんや)
佐藤工業株式会社土木事業本部設計部
副課長



杉本 恒美(すぎもと つねよし)
桐蔭横浜大学大学院・工学研究科
教授

