

5. 打音検査自動化システムの開発

佐藤工業㈱：*篠川 俊夫、歌川 紀之、
伴 享

1. はじめに

従来のトンネル覆工コンクリートの打音検査は手作業によるたたき検査であり、足場の設置あるいは高所作業車等を用いて検査者が覆工コンクリート付近まで近づき、ハンマーなどの検査器具を用いて行っている。この方法は、覆工コンクリートをハンマーで打撃したときの音を覆工コンクリート面から離れた位置で検査者が耳で聞き、聴覚により音質の違いを判断している。そのため、検査者の経験と勘に頼るところが大きい、評価が主観的となり定量的に行えない、検査結果をデータベース化しにくいなどの問題点がある。また、トンネル天端付近では上向きに叩くことから苦渋作業となり、多大な労力と時間を要している。さらに、壁面からの深さが10cm程度を超えると変状を見つけることが難しい。

このような手作業によるたたき検査の問題点を解決するために、加振力を検出できるインパルスハンマー（打撃力を電圧等で出力できる機構を有するハンマーで、打撃入力に加振力や周波数などの特性を把握できる）を用いてコンクリート構造物を打撃し、フード付きマイクロフォンを用いて発生する打撃音を測定する打音法の開発を行ってきた^り（図-1参照）。この方法により、人やたたき方の違いによって変化する打音の判断を客観的に行うことができるようになる。ここでは、打音測定部分をユニット化することにより1回の打撃と打撃音の収録・評価を自動化して、連続的かつ効率的な打音測定が行えるようにシステム化した『トンネル覆工打音検査自動化システム「ライニングヒッターⅡ」』について報告する。

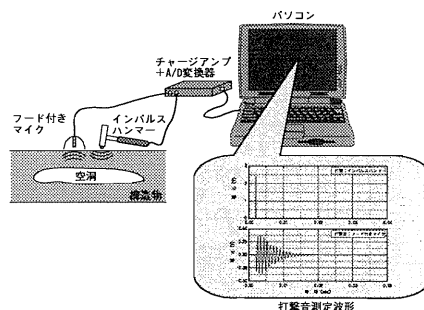


図-1 打音測定イメージ図

2. 打撃音の評価方法

打撃音のような過渡的な音を表す基本的な特性としては、振幅、減衰、周波数や位相などがある。打撃音の評価では、得られる打撃音を簡単なパラメータに置き換えて、パラメータの面的な分布や長期的変化を評価する方法が有効である。そこで、評価パラメータとして振幅、減衰、周波数に着目する。

(1) 振幅比 (A_m/A_i)

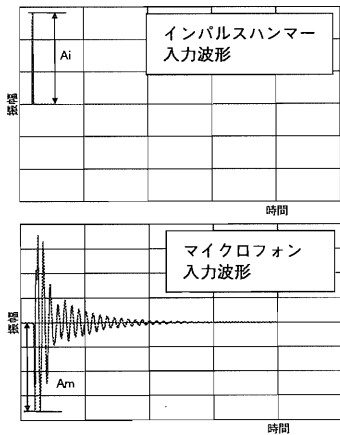
打撃音最大振幅値 (A_m) をインパルスハンマー加力振幅最大値 (A_i) で除した値で、振動の大きさを示すパラメータである (図-2参照)。

$$\text{振幅比} = A_m / A_i$$

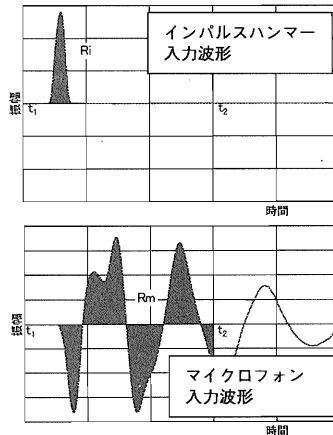
A_m : 打撃音最大振幅値

A_i : 加力振幅最大値

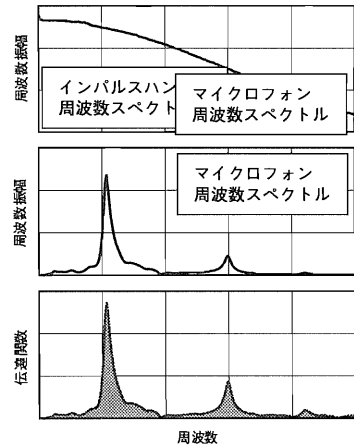
(2) 実効値比 (R_m/R_i)



図一 2 振幅比



図一 3 実効値比



図一 4 周波数重心

一定時間における打撃音実効値（Rm）をインパルスハンマー加力実効値（Ri）で除した値で、振動の大きさおよび減衰の大きさを示すパラメータである（図一 3 参照）。

$$\text{実効値比} = R_m / R_i$$

$$R = \sqrt{\left(\int_{t_1}^{t_2} a^2 dt \right) / (t_2 - t_1)}$$

R：実効値

a：振幅

t1, t2：実効値を算定する開始時刻，終了時刻

（3）周波数重心

測定範囲の周波数スペクトルの重心を計算したもので、打撃音の音色の平均的な高低を示すパラメータである（図一 4 参照）。

$$F = \frac{\int A f df}{\int A df}$$

F：周波数重心

A：周波数振幅

f：周波数

3. インパルスハンマーとフード付きマイクロフォンを用いた打音法

インパルスハンマーとフード付きマイクロフォンを用いた打音法を各種コンクリート構造物の調査に適用した結果、内部に空洞や浮きが存在する場合と健全な場合で打撃音が異なることが定量的に確認され、本方法が空洞や浮き等の変状を検査する方法として有効であることが検証されている（図一 5 参照）。鉄筋の有無、コンクリート面の向きやトンネル以外の用途など、いずれの場合でも有効であり、変状の深さも、従来のたたき検査の 10cm 程度に比較して 30cm 程度までの検知が現在可能である。

この打音法の特長は以下のとおりである。

- ①打撃に加振力の検出が容易に行えるインパルスハンマーを用いることで打撃力の違いの影響を受けない。
- ②打撃音をフード付きのマイクロフォンで測定することで周囲の騒音の影響を受けない。
- ③打撃音の評価を、打撃音出力の振幅、減衰、周波数に着目して、打撃入力と打撃音出力の比から判断することにより、定量的かつ客観的に行える。
- ④打撃音の分析結果をデータベース化することで、覆工コンクリートの変状の経年変化が把握できる。

さらに、この打音法を多くの実トンネルや試験体レベルに適用し、図-6に示すような打音評価パラメータと部材厚さの関係式を得ている。この関係式を用いることにより、得られた打撃音パラメータからはく離厚さや空洞までの距離を推定することができる。

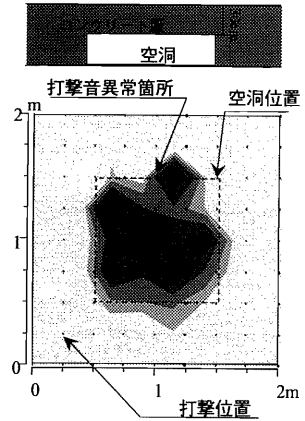


図-5 打音測定の検証例

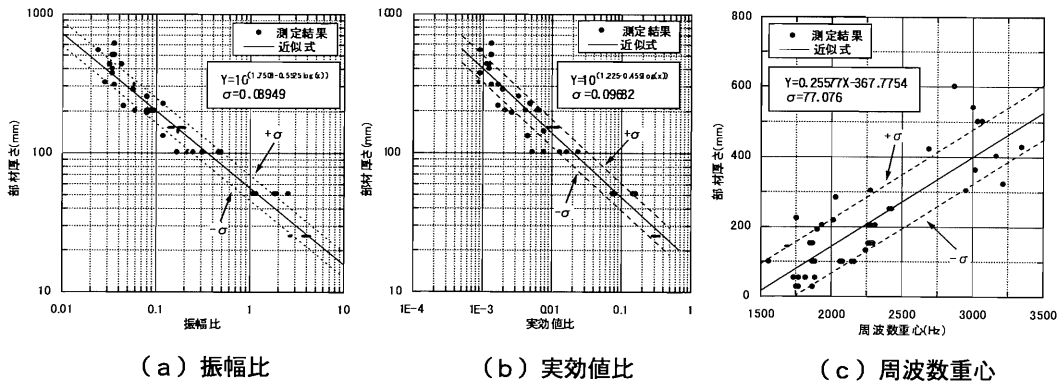


図-6 打撃音評価パラメータと部材厚さの関係

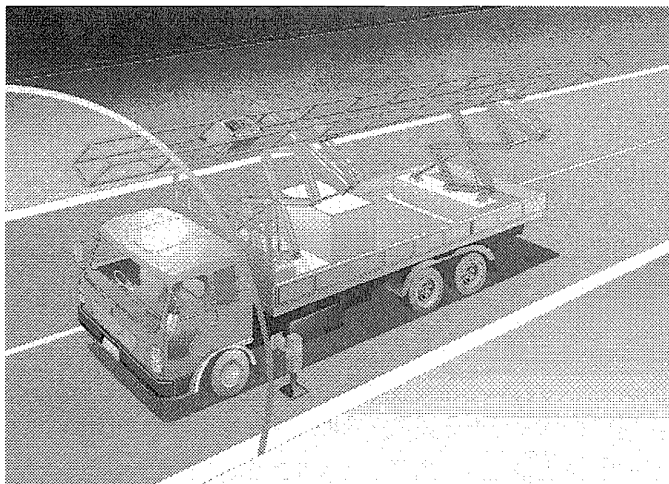
4. トンネル覆工打音検査自動化システム

この打音法は、従来のたたき検査と同様で、検査者が人力で打撃と打撃音の測定を行うため、作業の効率化を図る必要がある。そこで、打音測定部分をユニット化して打撃と打撃音の収録・評価を自動的に行う「トンネル覆工打音検査自動化システム」を考案した。トンネル縦断方向に12mの走行レール、円周方向に2.5mのアーチ形状の走行ガイドレールを装備し、1回のセットで約30㎡を自動的に検査していく(図-7、8参照)。

本システムでは、覆工コンクリート一打設長ごとに以下のような手順で打音検査を行う。

- ①検査台車に設置した伸縮支保を伸縮・傾斜させることにより打音測定ユニット走行レールをトンネル円周方向の任意の位置に移動する。
- ②打音測定ユニットを覆工コンクリート表面に接触させる。
- ③打音測定ユニット走行レールに沿って打音測定ユニットをトンネル縦断方向に走行・停止を繰り返して、覆工コンクリートの打撃と打撃音の収録を行う。

- ④その結果を瞬時に判断・評価し、トンネル覆工コンクリートの状態を診断する。
- ⑤診断の結果、変状箇所と評価された場合には、打音測定ユニットに取り付けたマーキング装置により覆工コンクリート面にマーキングする。
- ⑥一測線の測定終了後、打音測定ユニット走行レールをトンネル円周方向に移動させ、次の測線の測定を行う。

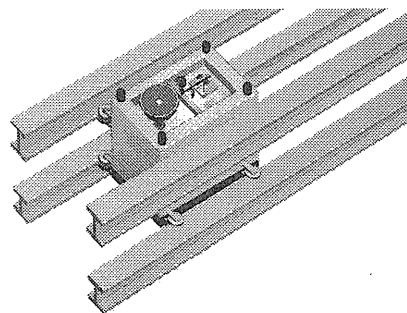


図一七 打音検査自動化システム

- ⑦トンネル覆工コンクリート一打設長の測定が終了したら、検査台車を次の打設位置へ移動する。

本システムの特長は以下のとおりである。

- ①打撃音の分析を瞬時にを行い、変状箇所と判断された箇所にマーキングをするので、離れたところから変状箇所の位置を目視確認できる。
- ②打音検査を自動化することで省人化が行え、人件費を低減できる。
- ③従来の手作業によるたたき検査に比較して検査時間が短縮できる（60 m² (12m×5m)を50cmピッチで打撃した場合の測定時間は約40分である）。
- ④高所作業が不要なため作業の安全性が向上する。
- ⑤フレキシブルに走行レールを移動させることができるためトンネルの断面や形状に左右されず検査が行える。
- ⑥トンネル覆工コンクリート一打設長の検査を検査台車の移動なしで行える。
- ⑦打音測定ユニット部分を他の検査装置と交換することもできる。



図一八 打音測定ユニット

5. おわりに

本システムにCCD（ビデオ）カメラを取り付け、壁面の状態や打音時の状況を画像として同時に記録することも検討している。これにより、非破壊試験法として詳細な調査に適用するとともに、定期点検として実施される目視検査と打音検査の2つの機能を本システムに持たせたいと考えている。現在、これら機能を持った実機の製作に着手しているところである。

参考文献

- 1)たとえば、歌川紀之ら：打音法によるトンネル覆工の健全性評価のための現地実験，土木学会第56回年次学術講演会（CS），2001（発表予定）