

コンクリート供試体を用いた打音診断評価実験

須田 健・川上 純・田端 淳

Keywords : tunnel, lining concrete, 1/3 octaves band, impact sound, exfoliation, cavity

トンネル、覆工コンクリート、1/3オクターブ帯域、打音、剥離、空洞

1. はじめに

筆者らは、トンネル覆工コンクリートの一次診断を目的として、人力作業の自動化による定量的診断が可能な、トンネル覆工コンクリート打音診断システム「ソニックマイスター」を開発・実用化した。今回は、コンクリートの健全性評価法と、診断精度の向上を目的として行なった、供試体を用いた試験の概要とその結果について述べる。

なお、本システム機械の詳細については、既発表の文献¹⁾を参照されたい。

2. 音の収録方法

コンクリートを打撃した場合、コンクリートの健全性によってコンクリートの応答が異なる。コンクリート健全性の評価は、コンクリートの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、簡易的な接着方法では、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、ソニックマイスターでは、打撃時の音により評価する方法を採用している。

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2つの音がある²⁾。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、マイクロホンにハンマーの近傍に設置し、人間と同じように混合音を収録する方式とした。

3. 打撃力の検討

打音法によるコンクリートの健全性の評価法としては、打撃時の発生音の他に打撃の反発力を用いる方法も考えられる。そこで、打撃ハンマーにロードセルを設置して打撃力を測定し、その打撃力によりコンクリートの健全性を評価する方法について検討した。

3.1 打撃力

まず初めに、ハンマーによりコンクリートを打撃した時の打撃力の安定性について検討した。図-1は、ハンマーの先端付近にリング型ロードセルを取り付け、計測した打撃力波形である。打撃力のパルス幅は、約0.5msecで、打撃力の最大値は約 $2.5 \times 10^4 \text{N}$ である。

数回打撃した結果、打撃力の最大値およびパルス幅のバラツキは数%であり、安定した打撃が行われていることを確認した。

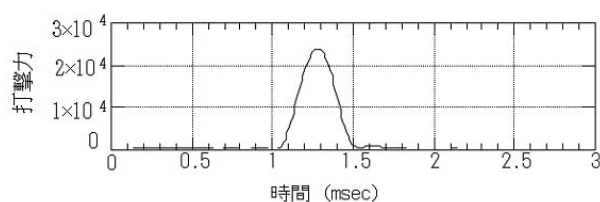


図-1 打撃力波形例
An Example of Impact Force Waveform

3.2 ハンマー向きの影響

トンネル覆工コンクリートは、打設時の型枠のゆがみのため表面が必ずしも滑らかでなく、また計測車がトンネル軸に対して平行に設置されない場合があり、ハンマーとコンクリート面が垂直にならない場合が想定される。

そこで、コンクリート面に対するハンマーの向きを垂直から 5° 変化させて打撃し、その時の打撃力波形を測定した。

図-2 はハンマーの向きを変えた実験での打撃力最大値であり、打撃力はハンマーの向きによってほとんど変化していない結果となった。これは、打撃ユニットがコンクリート面に対して垂直ではない状態で設置された場合でも、打撃ユニットの調芯機能(自動でコンクリート面に垂直に当てる)が働き、打撃ヘッドがコンクリート面に垂直になり、斜め打撃にはならなかったためである。

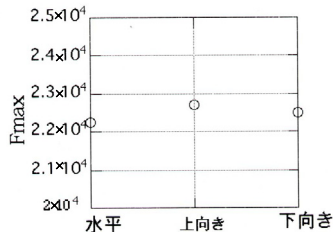


図-2 向きの影響

An Influence in the Direction

3.3 ハンマーのストロークの影響

実際のトンネルでは、壁面に凹凸や段差があり、ハンマーのストロークが変化することが考えられる。本打撃装置は、ハンマーに油圧を作用させて打撃する方式であり、この油圧はハンマーの作動中は常に作用している。したがって、ハンマーのストロークが変化すると打撃力も変化することが考えられる。そこで、ハンマーのストロークを変化させて打撃力を測定した。なお、ストロークの変化は、打撃装置をコンクリート面に設置させている脚の長さを変化させることにより行った。

図-3 にハンマーのストロークと打撃力最大値の関係を示す。ストローク（脚）が長くなると、衝撃力の最大値は大きくなる傾向がある。

しかし、ストロークが3mm 変化した場合の、打撃力の変化は10%程度であり、デシベルに直すと0.8dB と小さく、健全性の評価にはほとんど影響を与えないものと考えられる。

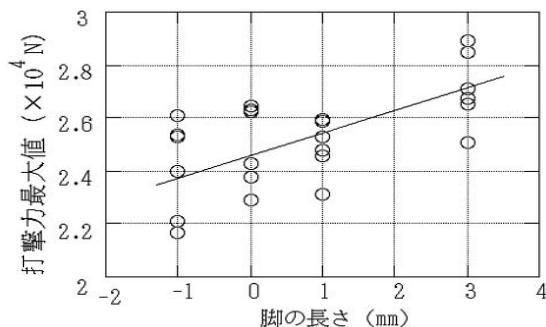


図-3 ストロークと打撃力の関係

Relationships between the

Stroke and Impact Force

4. 打撃力による健全性評価

打撃力の波形から、コンクリートの健全性を評価する方法について、コンクリート供試体を用いた実験により検討した。

図-4 にパラメータを、図-5 に健全部・剥離部における打撃力パラメータを比較した結果を示す。

- ・ 衝撃力最大値 : F_{max}
- ・ 力積 : S
- ・ パルス幅 : $t_2 - t_0$
- ・ 勾配 : $F_{max} / (t_1 - t_0)$
- ・ $Q = F_{max} / ((t_2 - t_1) S)$

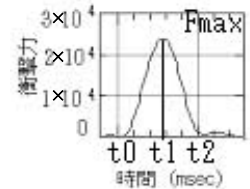


図-4 パラメータ

Parameter

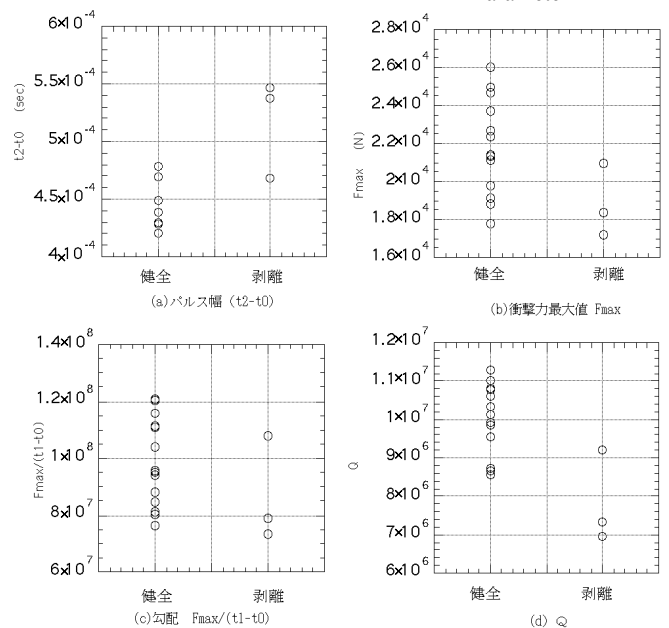


図-5 打撃力比較結果

Results of Impact Comparison

打撃力比較結果より、以下のことが分かった。

- ・ 剥離部は健全部に比べて、パルス幅が大きい。
- ・ 打撃力は剥離部のほうが小さい。
- ・ Q 値は健全部の方が大きい。

以上のように、室内実験では、パラメータによっては、コンクリートの健全性を評価できる可能性があることが分かった。今後は現地実験により確認する予定である。

5. 打音による評価実験

5.1 実験方法

空洞や剥離部から発生する音の性質を検討するため、コンクリート内に空洞および剥離を模擬した供試体を作

成して打音実験を行った。コンクリート供試体の概略図を図-6に示す。

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、1000mm×1000mm×1000mm 角のブロックとし、そのブロック内部に、正方形の空洞を設けた。空洞の大きさは、200×200mm、400×400mm、600×600mm の3通りで、深さは50～300mm (50mm ピッチ) とした。剥離モデルは、コンクリート表面との角度を15°、30° および45° の3種類とした。

計測は打撃点から約4cm離れた位置(図-7参照)に設置した加速度計によるコンクリート表面の振動、ハンマーの打撃力および打撃音の3種類について行った。

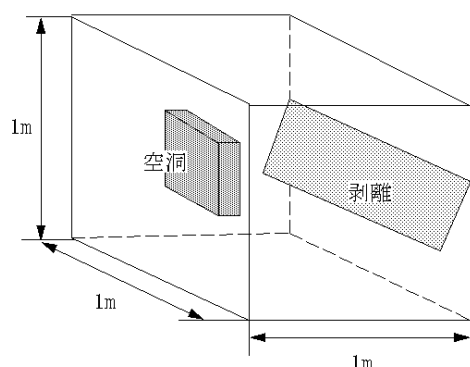


図-6 コンクリート供試体
Concrete Specimens

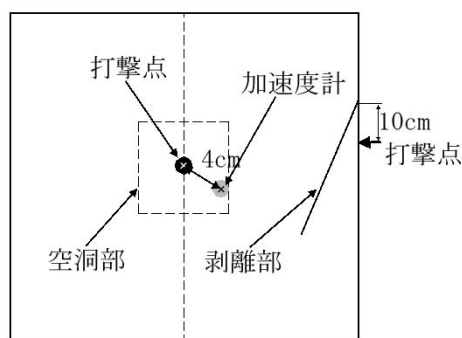


図-7 打撃点とセンサー位置
Sensor and Impact Point

5. 2 人間による評価

打撃実験を行うに当たって、人間がハンマー打撃して判定を行った。

空洞の大きさ 400×400mm の試験体を人力で評価した結果を表-1に示す。人力による評価において、ほぼ全員が同じ判定をしたのは、深さ 100mm 空洞までで、深さ 150mm 以上では判定が分かれた。したがって、空洞の大きさ 400mm の場合は、深さ 100mm までが人間による判定限界であると考えられる。

表-1 空洞深さによる人力判定(空洞 400×400mm)

Cavity Depth Different Decision by the Human Power

深さ (mm)	不健全	健全	判定
50	7	0	○
100	6	1	○
150	4	3	△
200	5 [*]	2	△
250	3	4	×
300	2	5	×

^{*} : 2名は空洞外を不健全と判断

5. 2 実験結果

図-8は、健全モデル、空洞モデルの中央(空洞の大きさ 400×400mm、深さ 100mm) および傾斜 30° の剥離部から 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、評価への影響は少ない。

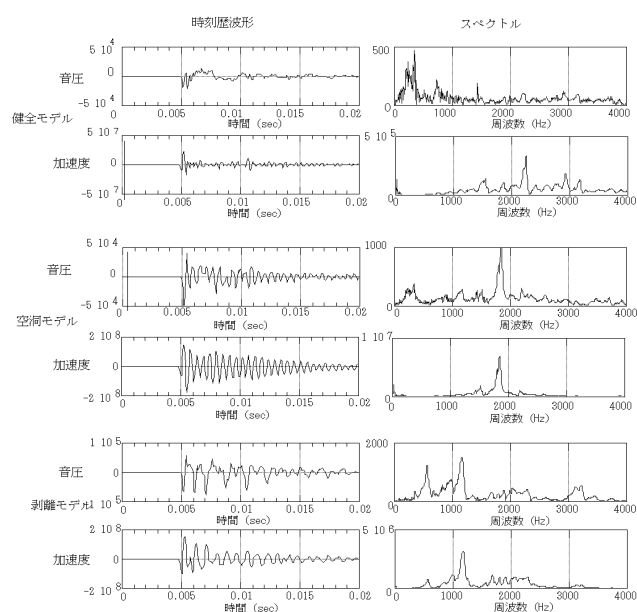


図-8 空洞部と剥離部における音圧波形とスペクトル
Sound Pressure Waveform and Spectrum

空洞モデルでは、1800Hz 前後に卓越したピークがある。これは、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、剥離モデルに見られる 1200Hz 付近の卓越ピークも剥離部のコンクリートの共振であると考えられる。

図-9 は、空洞モデル(400x400mm 深さ 100mm)と剥離モデル 30° 音圧の 1/3 オクターブ帯域毎のレベルと健全部の音圧レベルとの差を示したものである。健全モデルに比べて空洞モデルおよび剥離モデルは、音圧レベルが 20dB 以上大きくなっている。これより、音圧レベルによりコンクリートの健全性の評価が可能であることが分かる。

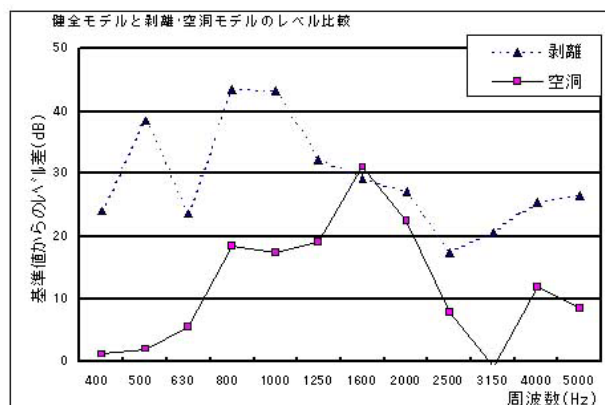


図-9 空洞・剥離部の健全部との音圧レベル差
Difference in sound pressure level

空洞の大きさを一定にして、空洞の深さを変えた実験では、以下のことが分かった。

- ・空洞の深さが浅い場合は、共振振動が発生して、音圧レベルが大きくなる。周波数スペクトルでは、明瞭な卓越振動数のピークが見られる。
- ・空洞が深くなるとともに、周波数スペクトルの卓越振動数のピークは高くなる。
- ・空洞が深くなると、音圧レベルは小さくなり、周波数スペクトルにおける卓越振動数のピークは不明瞭になる。
- ・空洞の深さが 150mm を越えると、卓越振動数のピークが不明瞭になり、健全部とほぼ同様な波形となる。

空洞が深くなるとともに、卓越振動数が高くなるのは、空洞とコンクリートの表面で作られてコンクリート板が共振しているためと考えられる。

図-10 は、空洞の大きさ 400mm について、空洞の深さ 50mm～300mm の 1/3 オクターブ帯域毎の音圧レベルと健全部の音圧レベル差を示したものである。

健全モデルに比べて、空洞モデルでは、深さ 100mm までの音圧レベルが 20dB 以上大きくなっている。この結果から、音圧レベルによる不健全部の判定は、人間と同じような能力を有していることが分かる。

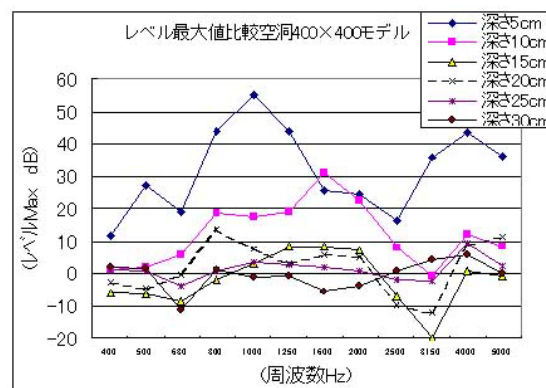


図-10 音圧レベルと空洞深さの関係
Sound Pressure level Cavity Depth

6. まとめ

今回の打音による評価実験において、以下の知見を得た。

- 1) 音圧と加速度振動の関係は、音圧波形とスペクトルにおいて、よく似た傾向が見られ、音圧を利用した測定で、剥離空洞調査が可能である。
- 2) 空洞部の特性は、同じ径の空洞であれば、深くなるにつれ、周波数ピークが高くなる。
- 3) 400mm × 400mm の空洞の判定は、人も機械も 150mm 以上の判定は難しい。

空洞や剥離モデルでは、コンクリートが共振振動を起こして、振幅の減衰が小さくなっており、この減衰により評価する方法も有力である。今後は、打撃力や減衰による評価法も加えて評価する方法についても検討を行い、診断精度を向上させていく予定である。

参考文献

- 1) 平野逸雄, 他: トンネル覆工コンクリート打音診断システムの開発, 大成建設技術研究所報, Vol35, p 35-1-4, 2002
- 2) 榎本秀明, 他: トンネル覆工コンクリートを対象とした打音評価手法, 物理探査学会第 104 回学術講演会, p65-69, 200