

論文

[1099] 打音法によるトンネル覆工厚および覆工背面空洞の調査法に関する研究

白木 徳夫\*1・伊東 良浩\*1・高橋 浩\*2・目時 康男\*3

1. まえがき

トンネル覆工の表面を打撃し、その打撃音から背面の空洞などの異常箇所を探知する打音検査法は、従来より一般的に行われてきた。しかし、打撃音に対する検討は十分にはなされておらず、判断は経験に委ねられていることが多い。そこで本研究は、トンネル覆工厚および背面空洞の探知を目的として、打撃音に対する理論的分析を試み、これを確認する実験を行ったものである。

2. 放射音の測定方法

打撃により生ずる打撃音の主要な発生機構は、打撃物と被打撃物の衝突時の急激な変形による音響放射と、主にその後の被打撃物の自由振動や内部の共振による音響放射とに分けることができると考えられる。そして、診断すべき被打撃物の物理特性に強く関連し重要な情報を担うのは、これらのうち後者の被打撃面からの後続放射音であると考えられる。また、コンクリートのようにコンポジットな材料が対象であると、小さな打撃点の条件が一定であるとは考えにくく、上記のうち前者の成分には再現性が期待できないと考えられる。したがって、トンネル覆工の診断を目的とした打音の測定のためには、打撃点から直接到達する前者の成分を排除し、打撃点から若干の距離を保った点における後者の成分を取録するのが良いと考えられる。

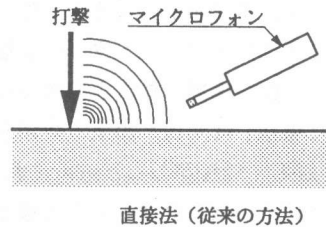
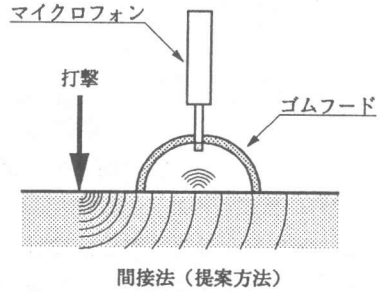


図-1 音の測定方法

測定方法は、図-1の

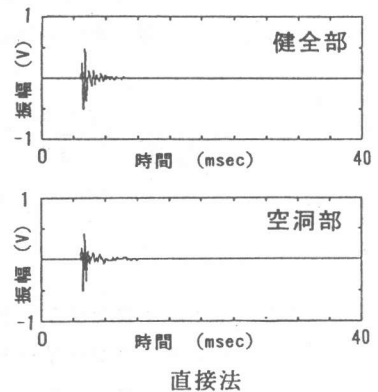
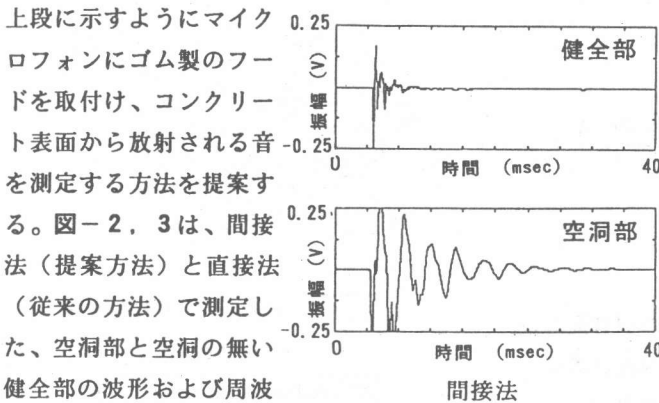


図-2 間接法と直接法の波形の比較

健全部の波形および周波数スペクトルである。

- \*1 佐藤工業(株) 中央技術研究所 土木研究部 (正会員)
- \*2 佐藤工業(株) 技術本部技術開発部 課長
- \*3 佐藤工業(株) 機電部 課長

間接法による測定結果と直接法によるものを比較すると、両者とも健全部に比べ空洞部では比較的low周波の音が多く発生していることがわかる。しかし、間接法の方が波形・周波数スペクトルとも健全部と空洞部の差異が顕著に現れている。なお、同一地点で打撃を繰り返した時に、間接法による方が音の波形や周波数スペクトルの再現性が高いことが確認されている。

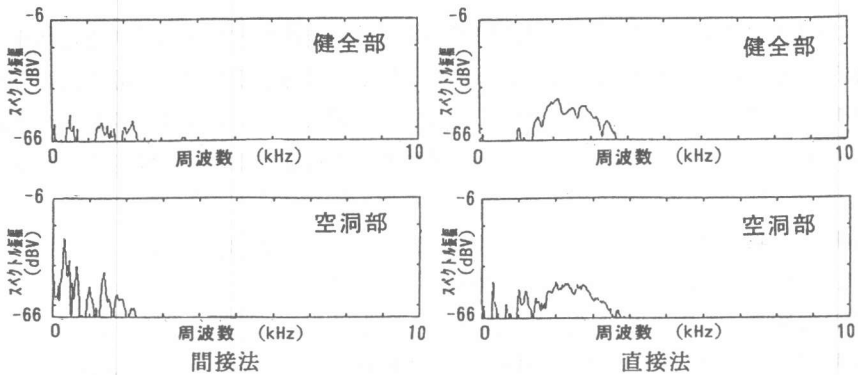


図-3 間接法と直接法の周波数スペクトルの比較

### 3. 放射音に関する理論的検討

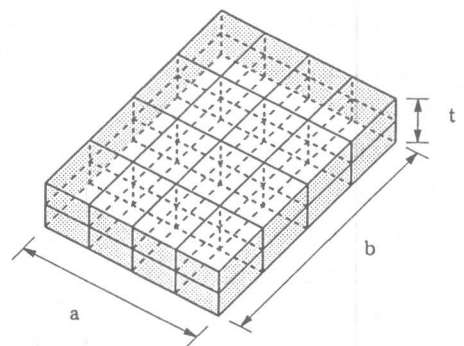
#### 3.1 背面に空洞を有する版の固有周波数に関する検討

図-2, 3で示したように、空洞上部のコンクリート版を打撃すると低周波数の音が卓越するが、これは空洞部のコンクリート版の固有周波数と関わりがあるものと考えられる。空洞部コンクリート版を薄肉の床版として自由振動モデルで近似するとすれば、一次固有周波数(周辺固定とした場合)は式(1)のように示される。しかし、版が厚く、空洞の範囲が小さい場合には、式(1)の適用に問題があると考えられる。

このため、コンクリート版の厚さの影響を検討するため、3次元動的解析プログラムを用いて空洞部のコンクリート版についての固有値解析を行った。解析に用いたモデルは、図-4に示すとおりである。

$$f_n = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{1.4}{a^2} + \frac{2.25}{b^2} \right) C \ell \cdot t \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $f_n$  ; コンクリート版の固有周波数  
 $C \ell$  ; コンクリートの弾性波速度  
 $t$  ; コンクリートの厚さ  
 $a$  ; 空洞の長辺  
 $b$  ; 空洞の短辺



・境界条件  
 : 側面(4面)の変位を固定

コンクリートの物性値

単位体積重量	2.3 t/m <sup>3</sup>
弾性係数	2.1×10 <sup>6</sup> tf/m <sup>2</sup>
ポアソン比	0.2

図-4 解析モデル

3次元解析によって得られた固有周波数（1～6次モード）、および式(1)より求められた値（1次モード、固定支持）を表-1に示す。

式(1)の値と解析結果を比較すると次のようなことがわかる。

- ①同一の版厚では、両者とも空洞辺長が小さくなるにつれ固有周波数は高くなる。辺長が小さくなると解析結果は、式(1)の値を大きく下回る。
- ②同一の空洞辺長では、両者とも版厚が大きくなるにつれて固有周波数が高くなるが、式(1)の値に比べ解析結果は、版厚による影響が小さい。

このようなことから、トンネル覆工のような、ある程度厚みを持つ版の自由振動を考える場合、理論式では、適用が困難になる可能性が高いと思われる。

表-1 コンクリート版の固有周波数計算結果

Case	辺長 (m)	版厚 (m)	式(1) (Hz)	固有周波数 (Hz)					
				1次	2次	3次	4次	5次	6次
1	2.0×2.0	0.3	526	149	295	295	310	310	392
2	2.0×2.0	0.4	701	162	295	295	312	312	392
3	2.0×2.0	0.5	876	173	295	295	321	321	392
4	2.0×2.0	0.6	1052	182	295	295	327	327	392
5	1.0×1.0	0.3	2103	363	591	591	654	654	784
6	1.0×1.0	0.4	2804	389	591	591	668	668	784
7	1.0×1.0	0.5	3505	405	591	591	674	674	784
8	1.0×1.0	0.6	4207	416	592	592	674	674	784
9	0.5×0.5	0.3	8413	832	1183	1183	1347	1347	—
10	0.5×0.5	0.4	11218	857	1185	1185	1325	1325	—
11	0.5×0.5	0.5	14022	869	1187	1187	1295	1295	1370
12	0.5×0.5	0.6	16826	877	1188	1188	1244	1270	1270

### 3.2 版の厚さ方向の共振周波数に関する検討

コンクリート版の厚さ方向に、連続的に周波数の変化する振動を与えると、ある特定の周波数で共振することが知られており（図-5）、このときの周波数と版厚の関係は、式(2)のように示される。

$$f_r = C l / (t \times 2) \quad \dots \quad (2)$$

ここで、 $f_r$  ; コンクリート厚さ方向の共振周波数

$t$  ; 覆工厚さ

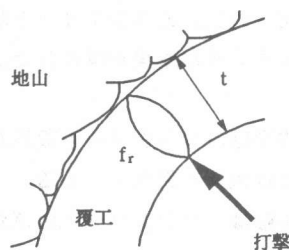


図-5 厚さ方向の共振の概念

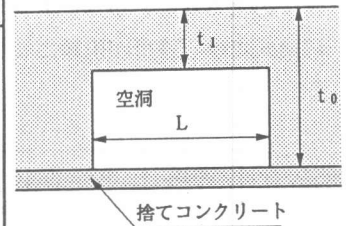
トンネル覆工コンクリート厚を 0.1～0.8m とすると共振周波数は、ほぼ 3kHz から 20kHz の範囲、即ち可聴領域にあることがわかる。したがって、マイクロフォン等の音響測定機器によって、コンクリート版の打撃による放射音を測定し、コンクリート厚さ方向の共振周波数を探知することができれば、打音法によっても版厚の測定が可能になると考えられる。

#### 4. 実験概要

前述の検討結果を確認するために、長さ 9.5m×9.75m、厚さ80cmのコンクリート版内部に、表-2に示すような寸法および厚さの異なる正方形の空洞を有する供試体を製作し、コンクリート表面への打撃実験を行った。コンクリートの物性値は、現場養生の管理供試体（材令28日）により、単位体積重量：2.31t/m<sup>3</sup>，圧縮強度：249kgf/cm<sup>2</sup>，弾性波速度：4236m/sec を得ている。

表-2 実験供試体

	無し	L=2.0 m	L=1.0 m	L=0.5 m
t <sub>0</sub> = 80cm	Case 0	—	—	—
t <sub>1</sub> = 30cm	—	Case 1	Case 5	Case 9
t <sub>1</sub> = 40cm	—	Case 2	Case 6	Case 10
t <sub>1</sub> = 50cm	—	Case 3	Case 7	Case 11
t <sub>1</sub> = 60cm	—	Case 4	Case 8	Case 12



コンクリートへの打撃方法は打撃エネルギーを一定にするため、φ60mmの鋼球（重量762g）を高さ50cmの位置から自由落下させる方法を用いた。その概念図を図-6に示す。測定は、空洞コンクリート厚さ・大きさの異なる12点（Case1～Case12）と健全部の1点（Case0）と比較した。

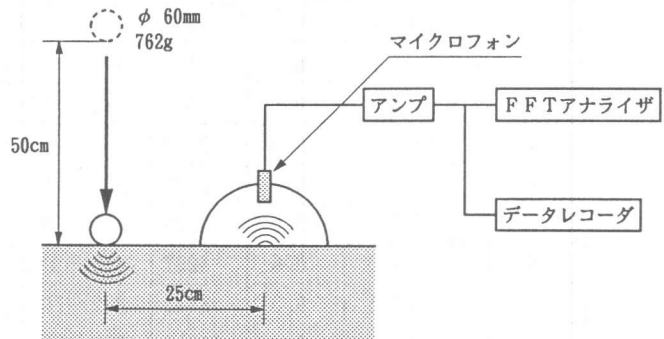


図-6 測定方法

#### 5. 実験結果

##### 5. 1 背面に空洞を有する版の固有周波数に関する検討

範囲（辺長）とコンクリート版厚の異なる空洞中央部に対して、衝撃を加えたところ、図-7、8に示すような結果が得られた。これらの図より以下のことがわかる。

- ①波形は、コンクリート版厚が薄くなるか、あるいは辺長が大きくなるにつれて健全部の波形とは大きく異なってくる。
- ②振幅は、コンクリート版厚が増すにつれて小さくなる。辺長についても同様に、辺長が小さくなると振幅が小さくなる傾向は認められるが、顕著ではない。
- ③残響時間は、空洞辺長 2m および 1m のものは、コンクリート版厚が薄くなるにつれ短くなっていく。しかし、空洞辺長 0.5m については、コンクリート版厚が薄くなっても残響時間は余り減少しない。
- ④コンクリート版厚が薄くなるか、あるいは辺長が大きくなるにつれて、空洞を有する部分の放射音の周波数スペクトルは、空洞の無い健全な部分と比較して、2 kHz 以下の低周波数成分が相対的に大きくなる。

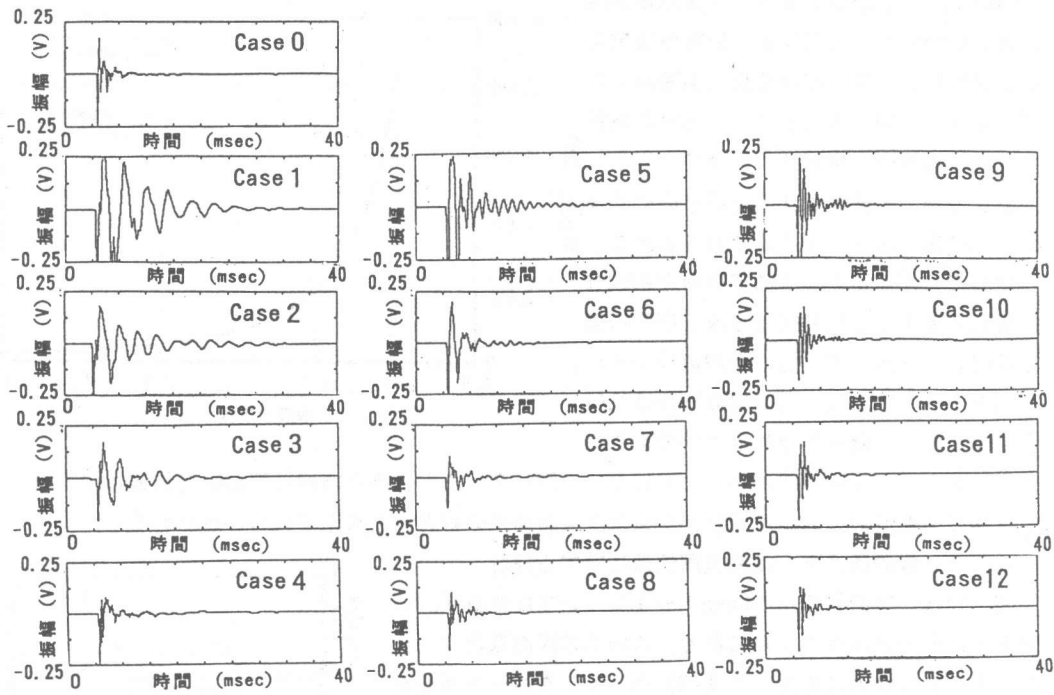


図-7 放射音の波形

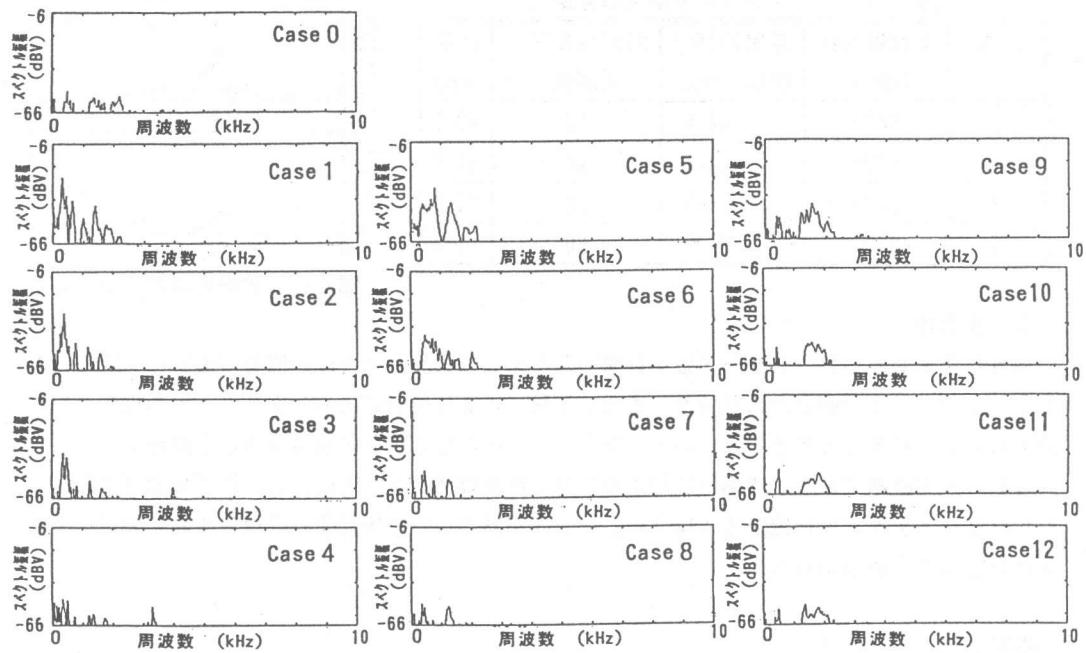


図-8 放射音の周波数スペクトル

Case 1, 5, 9のコンクリート版厚が30cmの場合について、式(1)より固有周波数をグラフ化し、3次元解析結果と実験結果をプロットして図-9に示す。なお事前解析で用いた物性値と供試体の物性値は厳密には異なるが、定性的な比較を行うのに支障のない範囲であると考え、検討を進める。

空洞辺長が2mの場合の低周波卓越成分に着目すると、実験結果は3次元解析結果と式(1)に一致している。空洞辺長が1m、50cmと小さくなるにつれ、実験結果は式(1)より小さくなり解析結果に近づいてくる。

他のコンクリート版厚さについても同じような傾向が認められ、解析結果がおよそ実験結果の傾向をとらえていると思われる。

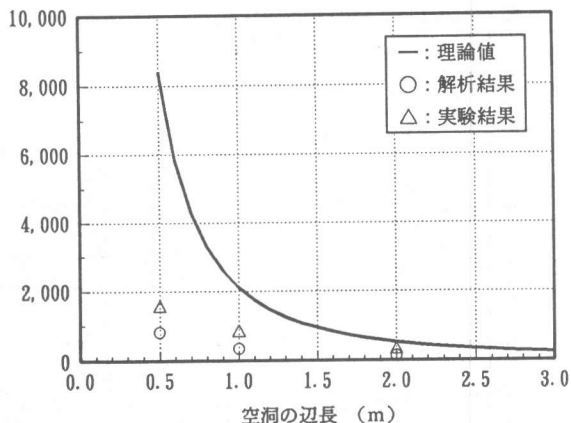


図-9 空洞辺長とコンクリート版の固有周波数の関係

### 5. 2 版の厚さ方向の共振周波数に関する検討

図-10は、空洞幅2mのCase 1~4について周波数3kHz以上の放射音のスペクトルである。この卓越周波数とコンクリートの弾性波速度を用いて式(2)からコンクリート版厚を算定すると表-3のようになる。

表より、全体的に厚めにコンクリート版厚が算定されているが、誤差は最大でも約5cmである。

表-3 コンクリート版厚の算定

Case	卓越周波数 (kHz)	算定コンクリート版厚 (cm)	コンクリート版厚 正解値(cm)	誤差 (cm)
1	6625	32.0	30	+2.0
2	4725	44.8	40	+4.8
3	4000	53.0	50	+3.0
4	3300	64.2	60	+4.0

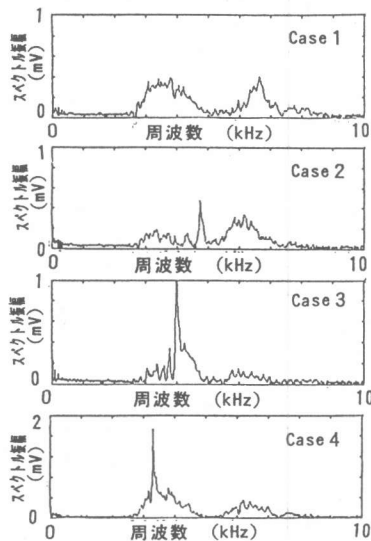


図-10 放射音のスペクトル

### 6. まとめ

内部に空洞があるコンクリート版を打撃したとき、コンクリート版の固有周波数に一致した音が生じていることが明らかになった。また、打撃による放射音にはコンクリート内の縦波共振が認められ、これを測定することによりコンクリート版厚の推定が可能であることがわかった。

これらの実験結果から、空洞を探知するには、周波数スペクトルの2kHz以下の部分に着目し、コンクリート版厚さを推定するには3kHz以上の部分について着目すれば両者を同一のデータで解析できることがわかった。

### 参考文献

- 1) 日本音響材料協会：騒音・振動対策ハンドブック、技報堂、1988
- 2) 日本建築学会：建物の遮音設計資料、技報堂、1982