

3. 打音法診断基礎実験

本打音診断システムを開発するにあたり、システムを構成する打撃機構や解析・判定方法を選定するために、各種基礎実験を行なった。

3. 1 基礎実験 1⁴⁾

はく離や空洞を模擬したコンクリート供試体を用いて、健全な供試体との打撃音の違いをもとにした健全性の判定の可能性について検証した。

(1) 劣化模擬供試体

供試体の大きさは 90cm×45cm×30cm (図. 2)、コンクリートの設計基準強度は 21N/mm² である。

①はく離を模擬した供試体

コンクリート曲げ試験用の供試体 (10cm×10cm×40cm) を割裂して所定のひび割れ幅となるように設置し、周囲にコンクリートを打設した。

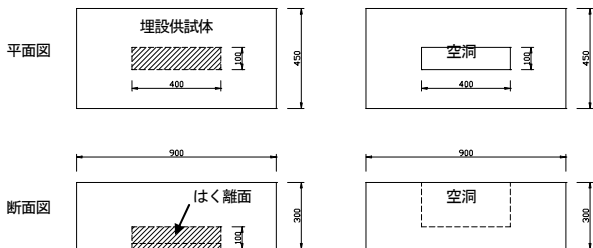
②空洞を模擬した供試体

10cm×40cm の一定面積で奥行き方向に空洞を設けた供試体である。

表3 劣化模擬供試体

試験体 No.	模擬した劣化	ひび割れ 深さ (mm)	空洞までの 距離 (mm)	ひび割れ 幅※
1	健全	—	—	—
2	水平はく離	20~30	—	小
3	水平はく離	20~30	—	大
4	水平はく離	50	—	小
5	水平はく離	50	—	大
6	水平はく離	100	—	小
7	水平はく離	100	—	大
8	斜めはく離	—	—	小
9	斜めはく離	—	—	大
10	空洞	—	50	—
11	空洞	—	100	—

※ ひび割れ幅 小 (0.3~0.7mm)、大 (1.0~2.0mm)



はく離を模擬

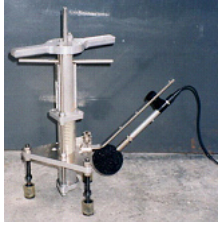
空洞を模擬

図 2 劣化を模擬した供試体

(2) 打撃装置及び判定指標

基礎実験 1 で使用した打撃装置と劣化部の判定を行なうために用いた判定指標 (打撃音の音圧レベル) を表 4 に示す。

表 4 打撃装置と判定指標 (基礎実験 1)

	実験 1-1	実験 1-2
	打撃装置 1	打撃装置 2
打撃装置	 手動でスプリングバネを圧縮し、その反発力でハンマヘッドをピストン運動させ供試体表面に衝突させる	 モーターに取り付けたカムでスプリングバネを圧縮し、その反発力で柄の付いたハンマヘッドを回転運動させ供試体表面に衝突させる
ハンマーの質量	55~230g	150~350g
判定指標	音圧レベル (500~2kHz)	音圧レベル (4~6kHz)

3. 2 基礎実験 2⁵⁾

基礎実験 1 の結果をもとに、実構造物として既設の鉄道高架橋床版と道路橋床版及び新設の道路トンネル覆工の健全性調査を行い、並行して行なった部分的な破壊検査や電磁波レーダーなどの非破壊調査結果と比較し、健全性判定方法や判定基準について検討した。

表 5 打撃方法と判定指標 (基礎実験 2)

対象構造物	鉄道高架橋床版	道路橋床版	道路トンネル覆工
調査目的	はく離調査	空洞、ジャンカ調査	空洞調査
打撃方法	基礎実験 1 で用いた「打撃装置 2」	人力によるハンマー打撃 (質量: 1.3kg)	人力によるハンマー打撃 (質量: 1.3kg)
判定指標	音圧レベル (500~2kHz、2~5kHz)	音圧レベル (500~2kHz、2~5kHz)	音圧レベル (500~2kHz、2~5kHz) 最大音圧振幅 振動継続時間

3. 3 実験結果

紙面の関係上、基礎実験の結果は他の発表論文

4.5)に譲るとし、ここでは、その結果のまとめを以下に示す。

- ① 質量が 250g 程度のハンマーを用いれば、コンクリート表面から 10cm 程度までの深さの劣化の有無を判定できる。
- ② ジャンカ、空洞、はく離の識別は不可能である。
- ③ 健全性の判定指標は、打撃音の音圧レベルと最大音圧振幅とする。振動継続時間は、ノイズや暗騒音の影響があり、打撃音と認められる最小値(閾値)の設定が難しいため、判定指標とすることは困難である。
- ④ はく離の厚さが薄い場合は、最大音圧振幅と低音域(500~2kHz)の音圧レベルが健全部のそれよりも大きい。
- ⑤ 深さの深い劣化については高音域(2~5kHz)の音圧レベルが健全部のそれよりも大きい。
- ⑥ ハンマーの質量を大きくすると深い場所の劣化の判定が可能である。

4. 本システムの基本コンセプト

基礎実験の結果をもとに、打音診断システムの基本コンセプトを「通常、トンネル覆工調査として人力で行なわれている点検ハンマーを使った打音法における打撃方法、判定方法を再現する一方で、人力による打音法の問題点を解決する。」こととする。

人力による打音法の問題点の解決方法は以下の通りである。

- ① 打撃装置を機械化することにより一定の打撃力で打撃することができる。
- ② 打撃音を解析し、一定の判定基準をもとに健全性を定量的に判定できる。

(1) 診断性能

人力による打音で診断できる以上の能力は要求せず、表面から深さ 10cm 程度までの劣化の存在可能性を判定する。また、劣化の種類と打撃音の特性について定性的な傾向は見られるが、理論的裏付けが困難であり定量評価できないため、劣化の種類の識別はしないものとする。

(2) 診断の役割(位置付け)

人力による打音調査は、目視でコンクリートの表面状態を確認しながら、ひび割れ等に沿って 10cm 程度以下のピッチで打撃し、劣化の種別(はく離の有無等)や浅層部分の劣化の有無を判定する。このような工程を完全に機械化するためには高度な技術が必要であり、経済性を考慮すると非現実的である。

したがって、本システムは、打音法による概略調査を行うものとし、平面的に 30~50cm ピッチのメッシュ交点を打音して健全性を診断し、その判定結果が不明確な箇所について人力により再確認するものとする。

(3) 汎用車への搭載

経済性の観点から専用車に搭載することはせず、その都度、高所作業車をリースしてそのステージに打撃装置を搭載する。

(4) 調査範囲

調査範囲は、覆工全体を調査できることが望ましいが、道路トンネルなどに設置されている化粧板部は調査できないことや車両の安全性上問題となるアーチ部のみの調査を想定して、仰角 90°(鉛直上向き)から 20° までとする。打撃装置の側面図を図 3 に示す。

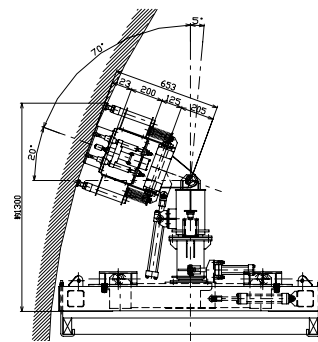


図3 打撃装置側面図(仰角20°)

5. 打撃装置

上記コンセプトをもとに、打撃装置の仕様を以下の通りとする。

本システムの打撃装置は、試作用の打撃装置(図 4)と同じものを 50cm ピッチで 5 基 1 列に配置した。装置全景を図 5 に示す。

(1) コンパクトであること

柄の付いた点検ハンマータイプではハンマー動作のためのスペースを必要とするため、垂直運動であるピストンタイプとした。

(2) 低振動、低騒音

動力機構から発生するモーターの回転、スプリングバネの摩擦音など、振動や騒音はコンクリートの健全性を診断するうえでは、大きな障害とならないが、診断精度向上のためには機械式は適切ではない。また、油圧式では人力と同程度の打撃力（ハンマーの質量：250g、速度：1.5～2m/s）を得ることは困難である。

したがって、打撃装置の動力をソレノイド（電磁石）式とした。

(3) 人力による打撃動作の再現

人力による打撃力は、加速度センサーを取り付けたハンマーで健全な供試体を打撃し、加速度を測定した。これをもとにハンマーの打撃時の速度として1.5～2m/s（個人差有り）とし、これをハンマーの設計速度としてソレノイドを利用した打撃装置の試作機（図4参照）を製作した。この試作機で、健全な供試体を打撃し、人力の打撃音と比較、検討を行い、ソレノイドに流す電圧（100V）と時間（20ms）を決定した。ハンマーの打撃動作は人力による打撃と同様に、打撃時は押し付けることなく、打撃後はフリーな状態となり、しかも、2度打ちしないような機構とした。



図4 ソレノイド式打撃装置（試作機）

(4) 軽量化

高所作業車は、全国各地で容易に調達できるように、比較的多く流通している積載荷重1tとした。

打撃装置の打撃面への押し付け力：5 基×20kg/

基=100kg

高所作業車、打撃装置オペレータ（2人）：150kgとして、さらに余裕分（50kg）を考慮して、打撃装置の質量は700kgを目標とした。

結果的に材料としてアルミなどを利用することにより450kgまで低減することができた。

(5) 打撃位置の移動

打撃装置の移動は、高所作業車の移動、高所作業車のブーム制御によるステージ移動によるものとし、鉛直移動（50mm）、フレームの回転（±5°）、水平移動（100mm）などの微調整機能は、打撃装置に持たせた。



図5 打撃装置全景

6. 打撃音の解析と健全性の判定

調査箇所の打撃音の大きさ（音圧）と高さ（周波数特性）が健全部のその平均値からどの程度相違しているかをもちに、健全性を判定する。以下にその判定方法を示す。

6. 1 打撃音の取得

無指向性マイクロフォンにより集音し、打撃点からマイクロフォンまでの距離は10cmとした。システム系統図を図6に示す。

また、打撃装置、周辺機器やトンネル覆工面への反射の影響及び周辺からの暗騒音の影響を軽減する対策として打撃ハンマー及びマイクロフォンの

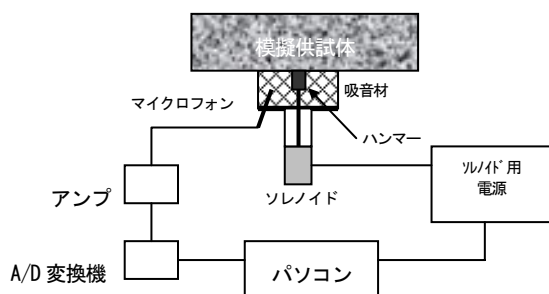


図6 システム系統図

周囲に、内部に吸音材（多孔質アルミパネル（ $t=1.3\text{mm}$ ）、グラスウール（ $t=25\text{mm}$ ））を取り付けた円筒形のカバーを設置した。カバー内部を図7に示す。

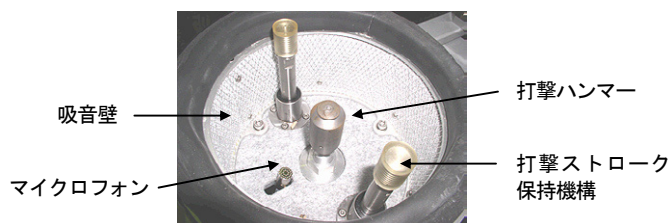


図7 打撃ハンマー

健全部のデータは、健全であると判断される箇所の打撃音をあらかじめマイクで集音、記録、解析し、音圧レベルと最大音圧振幅が正規分布に従って分布しているものとして平均値と標準偏差を算出する。

健全部のデータは、1ヶ所につき10回の打撃音を収録するものとし、異なる10ヶ所を打撃し、計100回の打撃音を健全部のデータとする。また、調査箇所については5回の打撃音の平均値を当該箇所のデータとする。

6. 2 打撃音の解析

打撃音の高さは、FFT解析を行い500～2kHzの低音域と2k～5kHzの高音域の2つの周波数帯域に応じたフィルタを作成して、時間軸上でフィルタリングを行い、音圧レベルの周波数解析を行なう。打撃音の大きさは、500～5kHzでフィルタリングした時系列データの最大振幅とする。

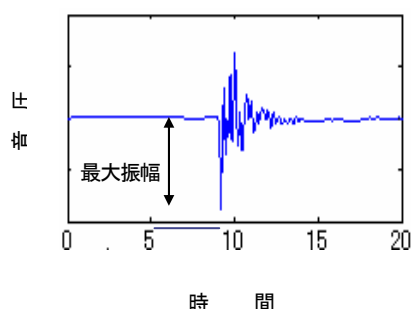


図8 打撃音の時系列データ

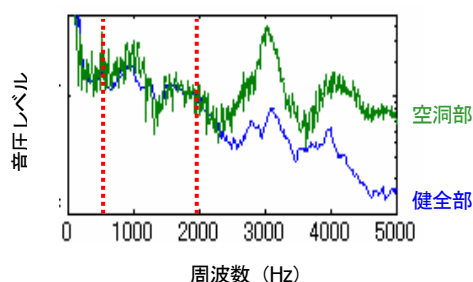


図9 周波数解析結果

6. 3 健全性の判定

上記低音域と高音域の音圧レベルと最大音圧振幅を健全性の判定の指標とし、表6に示す基準をもとに、調査箇所の打撃音について判定指標ごとに評価点を求める。

表6 各判定指標ごとの判定基準

調査箇所の打撃音の判定指標の範囲	評価点
平均値 $-a\sigma$ ～平均値 $+a\sigma$	3点
平均値 $-a\sigma$ ～平均値 $-b\sigma$ または 平均値 $+a\sigma$ ～平均値 $+b\sigma$	2点
平均値 $-b\sigma$ 以下 または 平均値 $+b\sigma$ 以上	1点

表6の平均値とは、健全部の打撃音の判定指標の平均値、 σ は標準偏差、 a 、 b は任意の定数である。 a 、 b はデータの積み重ねにより適切な診断ができるように決定する。総合評価点は、下式の通り、各判定指標の評価点を加算して求める。各評価指標の重み付け係数は評価結果に対する影響度に応じて可変とする。

総合評価点 $=\Sigma$ （各判定指標の評価点 $\times$ 重み付け係数）
式(1)

この総合評価点をもとに表7に従って健全性を判定する。

表 7 健全性の判定

総合評価点	健全性の判定
差分の $2/3 + \text{最小値}$ より大きい	健全
差分の $2/3 + \text{最小値}$ 以下、 $1/3 + \text{最小値}$ 以上	要確認
差分の $1/3 + \text{最小値}$ より小さい	劣化

※ 差分＝最大値－最小値

ここで、最大値とは、総合評価点を取り得る上限値、最小値は総合評価点を取り得る下限値である。

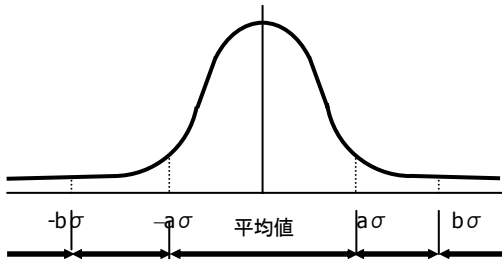


図10 健全部の打撃音の評価指標の分布

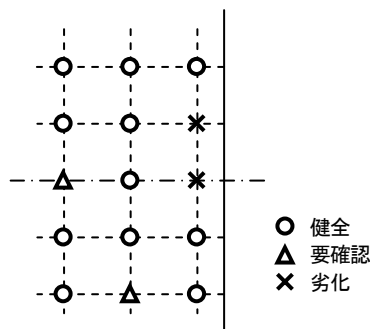


図11 打音診断結果出力例

7. 今後の課題

本システムについては、当面、以下の項目について検証、検討を行なう予定である。

- ① 打撃装置の高所作業車ステージへの取り付け方法について検討する。
- ② 実際のトンネルにおいて動作性能、診断性能の確認を行なうとともに、診断方法について再検討を行いシステムの性能向上を図る。

また、今回開発したシステムでは、人力による打音法の当面の問題点は解決されたが、本格的に人力による打音法を再現するためには以下のような機能を付加させなければならないと考える。

- ① 障害物を回避したりコンクリート表面の状態を観察するための視覚機能
- ② この視覚機能と打撃音により得られた情報をもとに、打撃位置を判断する機能または遠隔操作機能
例えば、打撃した箇所で軽音が発生した場合、劣化範囲をより詳細に特定するために、打撃間隔を小さくするなど打撃箇所を適切に判断、移動できる動作機構
- ③ 打撃位置自動検出機能
- ④ 人力打音と同程度の速度で調査ができる運動機能

参考文献

- 1) Applied Research Co.,Ltd.: 弾性波レーダシステム (iTECH-3), 2001.11 (Ver3.3)
- 2) 歌川紀之、中村英孝、伴通ほか: 打音法によるトンネル覆工健全性評価のための現地実験, 土木学会年次学術講演会, pp.308-309, 2001.10
- 3) 鈴木文大、榎本秀明、稲川敏春ほか: トンネル覆工コンクリートを対象とした打音評価法, 物理探査, 第54巻第6号, pp.374-387, 2001
- 4) 森 康雄、岩井孝幸、戸上郁英、時岡誠剛: 打音診断システムの自動化に向けた基礎実験, 土木学会年次学術講演会, pp.769-770, 2003.9
- 5) 土屋勝彦、森 康雄、岩井孝幸、時岡誠剛: コンクリート打音診断システムの基礎的検討, コンクリート構造物の非破壊検査への期待論文集 Vol.1, pp.227-236, 2003.7