

# 打音法によるコンクリート内部異常部の リアルタイム画像化システムの開発

吉荒 俊克\*1・松沢 英俊\*1

## 1. はじめに

打音法の実施時に打撃位置を瞬時に計測する装置を開発した。同時に、採取した波形から「音色」や「響き」といった特徴量を瞬時に計算し、あらかじめ健全と考えられる部位で採取した特徴量との違いをリアルタイムに画像化するソフトウェアを開発し、両者をシステム化した。このシステムでは結果を見ながら試験を行うことができるため、確実に全体を試験したことを容易に確認できるほか、異常部の位置関係などに注意しながら打音試験を実施することができる。大型試験体を対象とした検証実験では、本システムによって効率的に全面検査を行い、埋め込まれた人工内部空洞をすべて確認することができた。

## 2. 画像化システムの概要

### 2.1 システム開発の目的

打音法で得られる音波をマイクロホンなどによって電気信号として採取し、人間が直感的に正常・異常を判断する現在の方法に替え、定量的に解釈しようとする試みが広く行われている。このような実験的・理論的な研究を通じ、例えば内部の空洞などによって表層部の膜振動が卓越するような状態となった場合、得られる波形の周波数や継続時間の特徴の変化から、ある程度の定量化は可能であると考えられている。しかし変化の度合いは内部の状態以外にも打撃具の種類や電気信号に変換するための測定系の違いによっても複雑に変化し、特に打撃を一定に保つことが難しいため、現実的には単一の波形からの定量的な解釈は難しくなることが多い。

一方人間が感能で行っている打音法は、正常・異常の判断は単一の打撃音をもとに行うことは少なく、異常部の面の広がりや分布といった位置情報を助けとし、全体を総合的に判断していると考えられる。判断自体は定性的であるが、より定量的な情報を得たい場合は超音波法や局部破壊検査などと組み合わせればよく、むしろ全体を評価できるという点では低速な定量的手法よりも優れてといえる。しかし実施者の技量や知識などによってばらつきが生じてしまうことや、記録性が悪い点などが問題として挙げられる。

本システムでは、打音法のばらつきや記録性の悪さを改善し、高速な全体評価を簡便に行うことを目指した。

### 2.2 システムの概要

#### (1) 打撃位置の算定

画像化を実現するためには打撃位置を検知することが不可欠となる。打音法で対象物の表面を打撃したときに発生する弾性波は、ほとんど無指向に対象物内部や面方向に広がってゆくが、この弾性波の到達時間を打撃音を採取するセンサとは別に測定面に配置したセンサによって測定し、その時間とセンサ位置から、打撃位置を算定することができる。

ある位置  $P$  を打撃した場合の未知数は、 $P$  の空間的な位置と打撃した時間だが、座標を二次元に限れば

---

\*1 非破壊検査株式会社 技術本部安全工学研究所

空間的な位置  $x, y$  および時間  $t$  の 3 つとなる。位置  $x_i, y_i$  の分かっているセンサ  $S_i$  に弾性波が到達した時間が  $t_i$  であった場合、弾性波の速度を  $C$  とすると、以下の関係が成り立つ。

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} = C \cdot (t_i - t) \quad (1)$$

したがって図 1 に示すように位置の分かっているセンサを 3 つ以上  $n$  個配置し、同じ基準のもとで弾性波の到達時間を測定すれば、 $n$  個の式 (1) から打撃位置および打撃時間を算定することができる。 $n$  個のセンサへ弾性波が到達する順は不定で、打撃位置によっては同時に到達することもあるため、各センサへの到達時間を独立して計測できる必要がある。

本システムでは最大 8 チャンネルのセンサを接続することができ、独立して最大 6.5msec までの時間を  $0.1 \mu \text{ sec}$  単位に計測する装置を製作した。

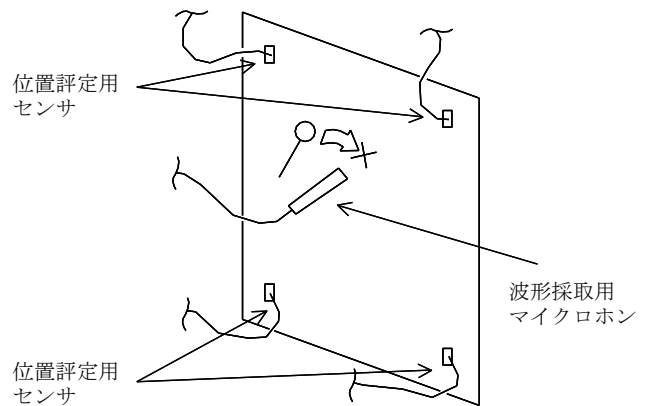


図 1. 位置標定の算定概念

## (2) 採取波形特徴量の計算

打撃音はマイクロホンによって採取し、マイクアンプを通して適当な振幅に調整してから A/D 変換を行ってコンピュータへ取り込む。すでに述べたように内部の空洞によって打撃音の周波数や継続時間などが変化するため、これらの特徴量として抽出することとした。具体的には適当な周波数範囲のエネルギーの時間変化を計算することとし、周波数の範囲は後で任意に変更できるようにした。

特徴量の評価は人的な判断と同じように、標準的な健全と考えられる部位における特徴量との類似度によって行うことを考えたが、打撃を一定の強さで行うことが難しいため、打撃音の大きさによらない計算方法が求められる。本システムでは健全部とある打撃位置の特徴量をそれぞれベクトルとみなし、ふたつのベクトルの余弦を計算することとした。これで両者の絶対的な大きさによらず、相似の関係にある場合は 1 となり、相似関係が成り立たない場合は 1 よりも小さくなる。この計算では周波数や継続時間がどう変化するかを考慮しないため、評価は定性的だが、客観的に数値化した評価を行うことができる。

健全部の特徴量が  $\alpha = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 、ある打撃部の特徴量が  $\beta = (b_1, b_2, \dots, b_n)$  と表された場合、両者の余弦  $\cos \theta$  は下式で表される。

$$\cos \theta = \frac{\sum (a_i \cdot b_i)}{\sqrt{\sum (a_i^2) \cdot \sum (b_i^2)}} \quad (2)$$

## (3) 画像化

打撃位置に類似度を色分けし、10cm 程度の範囲に表示することで二次元表示を行う。このとき測定の終わっていないところは異なる色分けにしておくことで、抜けのないように確実に全体測定を行うことができる。ひとつのデータの表示範囲は測定中にも任意に設定でき、異常部の再打撃のときなど、場合に応じて細かくすることもできる。同じ位置が打撃された場合の処理は、上書きではなく平均化とした。これはノイズ

の混入などによって類似度を正しく評価できなかつたとき、すでに取り込まれている正常なデータに対する影響を極力抑えたいことによる。画像化と表示の概念を図2に示す。

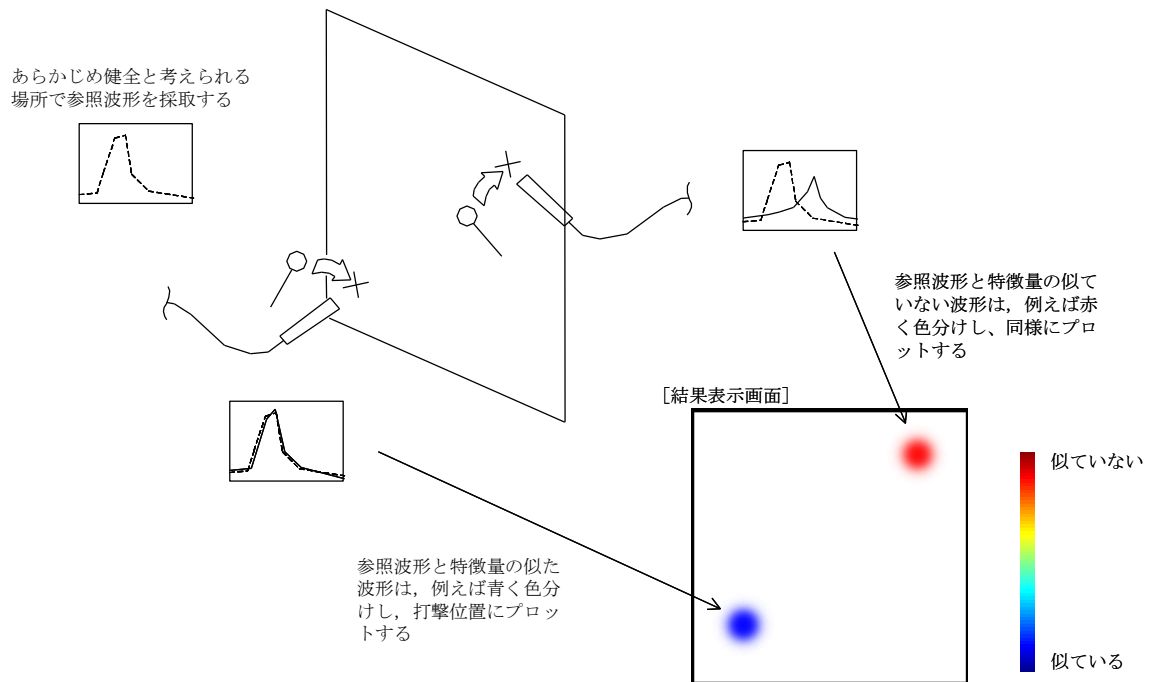


図2. 特徴量の色分けと画像化の概念

またより視覚的な認識を実現するため、得られた二次元の画像データを投影変換し、デジタルカメラなどで撮影した写真画像に重ね書きする機能を付加した。画像データ上の色分けは一次元に重み付けされたものであり、すべてのデータを重ね書きするよりも適当なしきい値以上だけを表示した方が分かりやすい場合があると考え、これを処理できるようにした。なお投影変換は写真画像上に空間位置の分かっている4点が写っていれば一通りに決定することができるが、これには座標の分かっている位置標定用のセンサを4つ使うのが便利であった。

実際に表面からの深さ2cmのところのコア穴を加工した小型試験体の画像化データを、あらかじめデジタルカメラで撮影した写真上に投影した例を図3に示す。

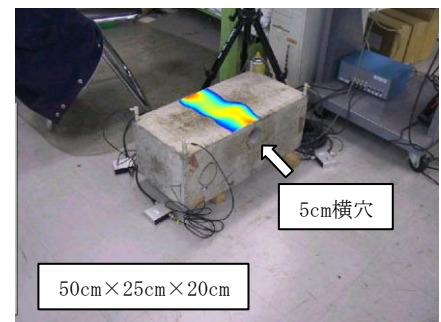


図3. 写真画像への重ね書き

#### (4) 記録

現段階では特徴量の評価方法をひとつに絞ることは難しいため、打撃音はすべて記録し、必要に応じて再評価できるようにした。

### 2.3 システムによる打音検査方法

本システムの外観を図4に、システムを使用した打音検査のイ



図4. システム外観写真

メージを図5に示す。実施者はパーソナルコンピュータに表示される画像化データを確認しながら測定範囲全面のデータ採取を行う。画像化結果の表示はリアルタイムに行われるので、必要に応じて再打撃するなど、結果の再現性について効率的に確認しながら検査を実施することができる。

表1に本システムの仕様を示す。昨今のコンピュータ能力の高度化によりほとんどの機能をソフトウェアで実現することができたため、シンプルな構成とすることができた。また時間読取装置以外は汎用の市販品を用い、コストを抑えた。

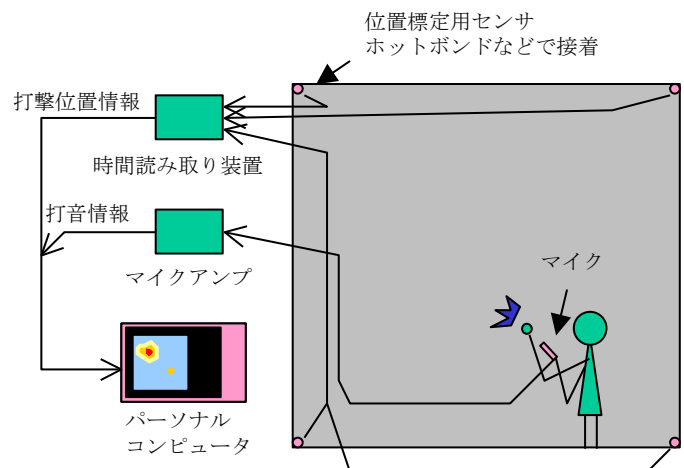


図5. 本システムによる打音検査のイメージ

### 3. 検証実験

#### 3.1 小型試験体

##### (1) 試験体

試験体は 1m×1m×40cm のもので、表2に示す寸法・深さに空洞を模擬した発砲スチロールを埋め込んである。

##### (2) 打撃音の採取条件

打撃具にはφ10mmの鋼球に金属性の柄を付けたものを用い、マイクロホンを打撃位置から約30cm離れた位置に保持して打撃音を採取した。このときのA/D変換はサンプリング周波数50kHz、データ点数を512点とした。

##### (3) 実験結果

画像化および写真画像への重ね書きを図6に示す。2章に示したシステムにより、空洞を模擬した人工欠陥①および②を視覚的に認識しやすい形に表示することができた。これらの検出位置は模擬空洞を配置した場所と良く合致しており、打撃位置の算定が妥当に行われていることが確認できた。

本実験で図6の結果を得るのに要した時間は約5分であった。

表1. 打音解析システム仕様

項目	仕様
パーソナルコンピュータ	Pentium3/1GHz, WindowsXP
A/D変換器	分解能12ビット, 最大1MHzサンプリング
時間読取装置	分解能0.1μsec, 最大8ch独立測定
位置標定用センサ	広帯域AEセンサ
マイクロホン・マイクアンプ	汎用自由音場用

表2. 模擬欠陥の寸法と設計上の深さ(単位mm)

番号	横幅×高さ	深さ
①	300×300	80
②	200×200	80

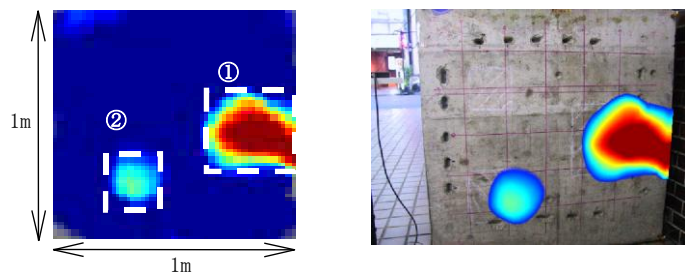


図6. 画像化結果および重ね書き結果

### 3.2 大型梁モデル試験体

#### (1) 試験体

試験体は長さ 12m、断面が高さ 50cm×幅 60cm の桁モデルで、側面の表 3 に示す寸法・深さに空洞を模擬した発砲スチロールを埋め込んだものを用いた。

表 3. 模擬欠陥の寸法と設計上の深さ (単位 mm)

番号	横幅×高さ×厚さ	深さ	番号	横幅×高さ×厚さ	深さ
①	100×300×100	80	⑤	100×300×5	50
②	100×210×60	85	⑥	300×300×5	58
③	300×300×20	95	⑦	300×300×20	45
④	300×300×5	95	⑧	100×210×60	25

#### (2) 測定範囲の分割

打音試験は模擬空洞の配置された部分を 5 区間に分割し、それぞれの区間ごとに 4 隅に位置標定用の広帯域 AE センサを熱可塑性の接着剤を用いて固定して実施した。側面から見た模擬空洞の位置と測定区間の位置関係を図 7 に、区間 5 の測定状況を図 8 に示す。

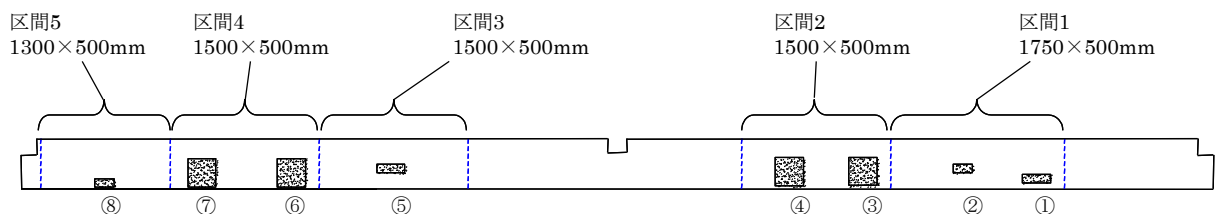


図 7. 模擬空洞の配置と測定区間の位置関係

#### (3) 打撃音の採取条件

打撃具にはφ10mmの鋼球に金属性の柄を付けたものを用い、マイクrohンを打撃位置から約 30cm 離れた位置に保持して打撃音を採取した。このときの A/D 変換はサンプリング周波数 50kHz、データ点数を 512 点とした。



図 8. 測定状況

#### (4) 実験結果

区間 1～2 の図示結果を図 9 に示す。まず打撃面から見た模擬空洞の面積が 300mm×300mm の③および④が明確に検出されていることが分かる。これよりも面積の小さい①と②は若干不明瞭だったが、局部的に色調を調節することで異常部と判断できた。この検出位置は模擬空洞を配置した場所と良く合致していた。

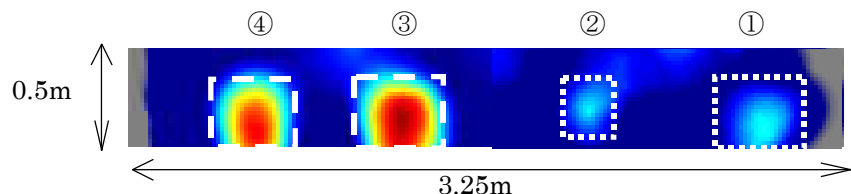


図 9. 区間 1～2 の図示結果

区間 3～5 の図示結果を図 10 に示す。図 9 と同様に 300mm×300mm の⑥と⑦が良く検出されたが、両者の大きさは若干異なって得られた。⑧は区間 1 の②と同じ寸法だが図 9 よりも明瞭に検出された。これは②より

も浅い位置に配置されていることによると考えられる。⑤は若干不明瞭ながらも色調を適度に調節することで異常部と判断できた。これらの検出位置も模擬空洞を配置した場所と良く合致していた。

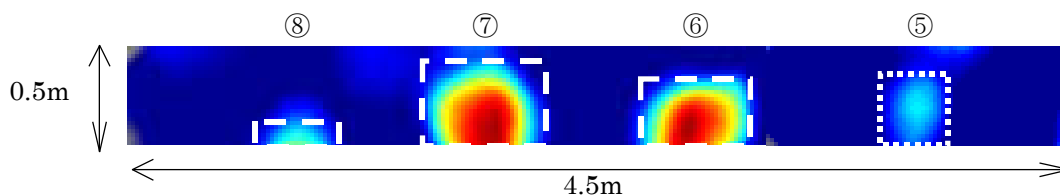


図 10. 区間 3～5 の図示結果

表 4 に模擬欠陥の検出結果を示す。この結果から、空洞が矩形の場合短辺大きさが深さの 2～3 倍ある場合は明瞭に検出することができるが、空洞の短辺の大きさが深さと近づくと検出しにくくなることが分かった。しかし後者のような場合でも、色調の調整や位置情報を判断材料に加えることで、何らかの異常があることを確認できると考えられた。

なお本実験で 5 つの区間を測定するのに要した時間は約 20 分であった。人的に打音法を実施するのとはほとんど変わらず、別途記録を行う必要がないことを考えれば、非常に効率的だといえる。

表 4. 模擬欠陥の検出結果

番号	横幅×高さ×厚さ	深さ*	検出結果
①	100×300×100	80	△
②	100×210×60	85	△
③	300×300×20	95	◎
④	300×300×5	95	◎
⑤	100×300×5	50	△
⑥	300×300×5	58	◎
⑦	300×300×20	45	◎
⑧	100×210×60	25	○

\* 深さは設計上の値

◎：良好に識別可能、○：識別可能

△：局部的に色調を調節することで識別可能

#### 4. まとめ

試験体を対象とした検証実験で、波形の特徴の類似性を打撃位置に図示する方法で、効率的に全面検査を行い、埋め込まれた模擬欠陥をすべて検出できることが示された。また欠陥の面積が小さいほど検出しにくくなるが、位置情報を合わせて判断することで、単一の波形を解釈する方法よりも簡単に評価することができることが分かった。

このシステムは通常の人的な判断による打音検査に比べ、以下のような利点を持つと考える。

- 客観的な数値による判断を行うことができ、結果が実施者の技量や知識に左右されにくい。
- 結果の二次元表示が可能で異常部を視覚的に認識しやすい。試験中に結果を確認できるため、疑わしい場所などの再打撃・再確認が効率的に行える。
- 試験結果をすべて記録することができ、全面検査を保証できる。

本実験ではコンクリート内部の空洞の検出を行ったが、対象物が平面状で打撃時の音色に変化が生じ、位置標定用のセンサを接着することができる場合全般に適用可能である。例えば鋼板とコンクリートの剥離を鋼板側から試験する用途や外装タイルの剥離検知などの用途にも有用であると考えられ、検証実験を通し、用途の拡大や最適な評価方法の構築を図りたい。

#### 謝辞

本研究のうち梁モデル試験対の検証実験にあたっては、株式会社国際建設技術研究所の葛目社長にご協力いただいた。記して感謝の意を表します。