論文 打音法によるコンクリート構造物の劣化診断への自己組織化マップ の適用

川端 健太*1·別府 万寿博*2·園田 佳巨*3·福井 雄気*1

要旨:打音検査は簡易かつ低コストで行える手法であるが、検査結果に曖昧さや熟練性を要する。これらの 欠点を克服するため多くの研究が行われているが、定量的な評価が容易である音圧の大きさに着目した研究 が多く、周波数特性まで総合的に考慮した診断は少ない。本研究は、打音法によるコンクリート構造物の劣 化診断に自己組織化マップ(SOM)を適用したものである。すなわち、SOMを用いて多次元の情報から健全 と欠陥の判別及び劣化レベルの判定が可能かどうかの検討を行った。その結果、音圧の大きさや減衰性、周 波数特性を総合的に考慮した SOM により良好な劣化診断が行えることを確認できた。 キーワード:打音法、音圧特性、自己組織化マップ、劣化診断

1. 緒言

打音検査は、ハンマーのみを用いて低コストで実施で きる手法であり,周囲の環境や天候に左右されずに簡易 に検査を実施できることから、従来からコンクリート構 造物の欠陥(浮き・剥離)箇所の把握のために多く用い られてきた。しかし、欠陥の状態によってはハンマーに よる打撃音の評価に熟練を要するという面を有してい る。そのような課題を改善するため、これまでに打音法 に関する研究が行われている^{1),2),3),4)}。例えば鎌田らの研 究」では、コンクリート内部の欠陥の状態が音圧特性に 与える影響に関して,供試体実験と有限要素解析による 検討がなされており, 音圧の大きさに閾値を設定し, 健 全と欠陥箇所を判別している。著者らの既往の研究²⁾に おいても、実際に橋梁検査で得られた打音の特徴量(音 圧・加速度の最大値や減衰時間)が正規分布に従うと仮 定し、2 シグマ限界を閾値として健全部と欠陥部の検出 精度を考察している。歌川らが提案している健全性評価 ソフトウェア⁴では,打撃力の最大値で音圧の最大値を 正規化する手法により、コンクリート欠陥部の深さを推 定している。つまり、定量的な評価が可能な特徴量が得 られる場合には、健全・欠陥の判定は比較的容易である ことがわかる。一方で、打音のもう一つの有用な特徴量 の候補と見なされる周波数特性については、ピークスペ クトルの位置や大きさに特定の傾向を見出すことが困 難であるため、コンクリートの劣化診断に直接的に用い ている例は少ない。ウェーブレット変換を用いた診断例 ^{5),6)}も見受けられるが,解析結果を評価する方法が複雑で あり, 定量的な判断が難しいなどの問題がある。

コンクリート構造物を適切に維持管理するためには, 欠陥・健全の区別に加え,欠陥の状態(劣化レベル)を 評価できる診断手法の構築が必要である。劣化レベルの 判定は、欠陥・健全の判定以上に高度な診断であるため、 劣化レベルを評価する場合には、音圧の大きさだけでな く、周波数特性の変化や減衰性を考慮に入れた多次元の 情報が必要であると考えられる。また、劣化診断におい ては、健全部の情報を基に相対的な劣化の度合いを判定 するが、実際には境界条件の相違や供用期間の経過に伴 って健全部の音圧特性も変化するため、供試体試験で得 られた健全部の特徴を実構造物の劣化診断の基準に用 いることは難しいという問題があると考えられる。

本研究は、実際に供用しているコンクリート橋の橋脚 部をハンマーで打撃して得られた打音の情報を用いて、 自己組織化マップによる劣化診断システムの構築を行 ったものである。供用中の橋梁に対して打音法による試 験を行い、健全部と欠陥部の打音データの相違を比較検 討し、音圧特性の違いを基にして自己組織化マップに用 いるデータを検討した。提案した入力データを用いた自 己組織化マップにより、コンクリートの劣化診断が良好 に行えることを示した。

2. 実橋梁における計測

2.1 検査の対象箇所と計測条件

本計測では、打音法による試験で得られる音圧の特性 を把握するため、写真-1に示す供用中であるA橋の橋 台部において打音検査を行い、その中でまず写真-2に 示す欠陥部において浮きや剥離が認められる縦35cm、横 45cm の部分の周囲及び内部を打撃した際の音圧を計測 した。打撃点は、この損傷領域を5cm四方に分割した格 子点とした。左上から順に打撃点1、打撃点2、…とし、 右下を打撃点80とした。打撃は入力荷重の測定が可能

*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士課程 (正会員) *2 防衛大学校 建設環境工学科 准教授 (正会員) *3 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 教授 工博 (正会員)



写真-1 検査箇所の外観と検査箇所



写真-2 欠陥1の写真と打撃点番号



なインパルスハンマーを用いて行い,打撃点から 2.5cm 離れた位置にマイクロホンを設置した。マイクロホンは 打撃点の方向に向けるようにして手で支持した。マイク ロホンの計測可能な最大音圧レベルは 140dB, 0.02kHz ~20kHz の周波数域で正面入射レスポンス±1dB の応答 特性を有する。データレコーダのサンプリング周波数は 50kHz とし,1つの打撃点において 10回の打撃を行った。 2.2 打音の音圧特性

計測で得られた結果の一例として,A橋の健全部と欠陥部(ここでは、明らかに打撃の際の異音により容易に 判断できる部分を欠陥部と呼ぶ)における音圧の時刻歴 波形を図-1に示す。図のように、欠陥部の音圧は健全 部に比べて極めて大きいこと、また、音圧の継続時間が 長くなる傾向にあることが確認できる。なお、健全部と



図-2 A橋における最大荷重と最大音圧の関係





図-3(b) 振幅比の推移

欠陥部では音色が明瞭に異なっていた。この結果から, 欠陥の有無や欠陥の状態を打音データから推測するに は,音圧の大きさや継続時間,減衰性,周波数特性が有 用な情報となることがわかる。そこで,これらの特徴量 に着目し検討を行った。

(1) 振幅比

健全部と欠陥部における音圧の大きさの相違を明ら かにするため、インパルスハンマーにより得られた最大 荷重とマイクロホンで得られた最大音圧の関係を調べ た。その一例として、健全部である打撃点5、打撃点10 と、欠陥部である打撃点14、打撃点64の最大荷重-最 大音圧関係を示したものを図-2 に示す。これより,入 力荷重の最大値と最大音圧に線形的な関係が認められ る。また,健全部と欠陥部では単位入力荷重あたりの応 答値が異なり,健全部よりも欠陥部の方が音圧が高くな る結果が得られた。そこで,式(1)に示すような振幅比³⁾

(単位入力荷重あたりの音圧の大きさ)を用いることで, 入力荷重の大きさのばらつきが打音データに与える影 響を軽減し,健全部と欠陥部にどのような差が生じるの か検討を行った。

振幅比 =
$$\frac{P_{\text{max}}}{F_{\text{max}}}$$
 (1)

ここで、 P_{max} は音圧の最大値、 F_{max} は入力荷重の最大値である。

音圧の振幅比のコンター図を図-3(a)に、振幅比が大 きい打撃点から順に並べた図を図-3(b)に示す。なお、 この結果は同じ打撃点を 10 回打撃した際の振幅比の平 均値である。図-3(b)より、振幅比の最大は約 0.14 Pa/N であり、次第に漸減して約 0.004 Pa/N へ収束しているこ とがわかる。なお、34番目以降のフラットに収束してい る打撃点は、耳で聞いた音から判断すると明瞭な健全部 であった。すなわち、健全部と明瞭な欠陥部の間には連 続的な推移領域があることがわかる。また図-3(a)より、 検査部の上部と下部に振幅比が大きい部分が存在する ことが確認できた。この部分は、写真-1 に見られるよ うな浮きや剥離が認められる部分に近い打撃点と対応 しており、また、図-3(b)中の(A) で示す、音圧の大 きさを特徴量とすることによって欠陥部の診断がある 程度行える領域であると言える。

(2) 周波数特性

橋梁の打音試験から得られた周波数特性を,図-4, 図-5に示す。各打撃点の周波数特性に関しては、ノイ ズを除去するため、音圧の時刻歴波形のデータの上方包 絡線と下方包絡線の平均値を減算することでトレンド 除去を行い、0.01秒までのデータにFFT (Fast Fourier Transform)処理を行うことで求めた。また、欠陥の有無 によるピーク周波数の変動を比較するため、式(2)に示す ように最大スペクトル値が1になるように正規化を行っ た。

$$S_{n}'(f_{x}) = \frac{S_{n}(f_{x})}{Max\{S_{n}(f_{x})\}}$$
(2)

ここで、 $S_n'(f_x)$ は正規化後の f_x (kHz) におけるスペ クトル値、 $S_n(f_x)$ は正規化前の f_x (kHz) におけるスペ クトル値、 $Max\{S_n(f_x)\}$ は正規化前の周波数スペクトル 全体での最大値である。添え字のnは、n 回目の打撃実 験で得られた結果であることを示す。さらに、10 回打撃 した際の平均値を、各打撃点の代表の周波数スペクトル として、式(3)のように処理をして求めた。



$$S'_{Ave}(f_x) = \frac{\sum_{n=1}^{10} S'_n(f_x)}{10}$$
(3)

ここで、 $S'_{Ave}(f_x)$ は、式(2)で求めた f_x (kHz)における 正規化されたスペクトル値 $S_n'(f_x)$ の10回の平均値であ る。なお、図ー4、図ー5については、上記の処理を行っ た後に、比較のためさらに最大スペクトル値が1となる ように正規化を行っている。

得られた結果の一例として,振幅比に基づいて健全部 と認められた打撃点5,打撃点10と,欠陥部と認められ た打撃点14,打撃点64の周波数特性を図-4に示す。 健全部と認められた打撃点の多くは図-4(a)のように およそ2kHzにピークが確認できた。これは,健全部で は打撃点直下に空洞や浮きが存在しない密実な状態で



図-7 実効値比の算定

あるので,打撃した際のコンクリート表面の振動がほぼ 同じ挙動を示すためと考えられる。一方,欠陥部と認め られた打撃点は,打撃点14のように2kHzより低い周波 数にピークが存在したり,打撃点64のように2kHzより 高い周波数や複数の周波数帯に対しピークを有してい ることがわかった。この理由は,欠陥部では打撃点直下 の浮き・剥離の状態がそれぞれ異なるため,ピーク周波 数が一意に定まらず,また欠陥毎の周波数スペクトルの 概形もそれぞれ異なるものと考えられる。一方,振幅比 の値が小さかった打撃点46や打撃点47の周波数スペク トルを図-5に示す。なお,打撃点46,47は,図-3(b)

中ではそれぞれ 42,44 番目に相当する(振幅比 だけを確認すると健全部だと判断される)打撃点である。 すなわち,図-3(b)中の(B)で示すように振幅比の値 は小さいが,健全部の特徴である 2kHz にピークが見ら れず,概形も異なる領域であることがわかる。周波数特 性の違いは打撃を行った際のコンクリート内部の状態 から起因する表面振動として表されるので,図-3(b)中 の(B)で示す領域は音圧の大きさでは判断できないよ うな劣化が生じており,健全部とは内部の状態が異なる ことが推測される。

3. 自己組織化マップによる劣化診断

前章では、健全部と欠陥部における音圧の大きさや減 衰性および周波数特性の違いを確認した。特に、従来か ら指摘されていた最大音圧の大小に加え、欠陥部では周 波数波形に乱れが生じていることがわかった。そこで、 化学分析などで測定スペクトルの評価に応用実績があ る自己組織化マップ^のを用いて、欠陥と健全の識別およ び欠陥の損傷レベルの判断が行えるかどうかの検討を 行った。

3.1 自己組織化マップのアルゴリズム

自己組織化マップ(Self-Organizing Maps,以下 SOM と呼ぶ)とは、Kohonenによって開発された大脳皮質の神経機能をモデル化したニューラルネットワークである⁸⁾。SOM の学習は教師なし競合学習である。SOM は 階層型ニューラルネットワークの一種であり、図-6 に 示すように入力層と出力(競合)層の2層で構成される。 第1層はn次元の入力層 x(t)であり、第2層は競合層と 呼ばれ、出力を視覚的に見るため一般的に2次元配列と なっている。

学習のステップは以下のようになる。

 $|x-m_c| = \min|x-m_i|$

- ユニットの数(マップの大きさ)を決定し、すべて のユニット内の参照ベクトル*m*_iの要素をランダム に決定する。
- 入力ベクトル x(t) を与える。このとき, x(t) とのユ ークリッド距離 |x-m_i| を最小にするようなニュー ロンiを探し,そのニューロンをcとすると,次式 で表すことができる。

3. 参照ベクトル*m*。を持つニューロンを勝者ユニット とする。勝者ユニット,およびその周辺の近傍*N*。内 のユニットは次式に従って入力ベクトルを学習す る。

 $m_i(t+1) = m_i(t) + h_{ci}(t)[x(t) - m_i(t)]$ (5)

- ただし、 h_{ci} は近傍関数とし、以下のように定義する。 if $i \in N_c$ $h_{ci} = \alpha(t)$ else $h_{ci} = 0$ (6) ただし、 $\alpha(t)$ は学習率係数とする。
- 4. 2~3 をT回繰り返し、学習を行う。近傍サイズは $N_c = N_c(t)$ という時間の関数で表され、 $\alpha(t)$ と $N_c(t)$ は学習とともに式(7)、式(8)のようにそのサイ ズを小さくしていく。

$$\alpha(t) = \alpha_0 (1 - t/T) \tag{7}$$

$$N_{c}(t) = N_{c}(0)(1 - t/T)$$
(8)

ただし、 α_0 は α の初期値であり、 $N_c(0)$ は $N_c(t)$ の 初期値である。

すべての入力ベクトルに対して、2~4を繰り返し行うことにより、各入力ベクトルに類似したユニットが集まるようになる。

以上より, SOM を利用することで,多次元のデータを 2次元に可視化することが可能である。

3.2 自己組織化マップの入力データ

SOM を作成する際に入力するデータとして, 音圧の大きさ, 減衰性, および周波数特性を考慮した。まず, 0kHzから 10kHz までの周波数スペクトルを, 0.1kHz 毎にサンプリングした 101 個のデータ(101 次元ベクトル)にした。次に, 音圧の大きさと減衰性を併せて考慮するため,



図-8 SOM を作成する際のパラメータの一例



図-9 橋梁調査における SOM

スペクトル値に実効値比⁹⁾を乗じた。ここで,実効値比 とは,**図-7**の赤色で示した面積を意味し,音圧の時刻 歴波形から得られる特性値の一つである継続時間や減 衰性を評価する指標である。本研究では,式(9)に示すよ うに,打撃を行ってから0.01秒までの波形の振幅の絶対 値の和を,与えた荷重の最大値で除すことにより,打撃 力のばらつきも考慮した。

実効値比 =
$$\frac{\int_{0m \sec}^{10m \sec} |A(t)| dt}{F_{\max}}$$
(9)

ここで、A(t)は時刻tにおける音圧、 F_{max} は打撃力の最 大値である。振幅の最大値が大きいほど、また、振幅が 減衰しにくいほど実効値比が大きくなる。

以上の操作によって得られたデータ(以下入力スペクト ルと呼ぶ)の一例を図-8に示す。図から,健全箇所で は得られる実効値比が小さいため,入力スペクトルの最 大値も小さくなることがわかる。また,欠陥部では最大 実効値比が大きい特徴があるが,スペクトルの波形がそ れぞれ違うことから,SOM上では異なった位置にマッピ ングされると考えられる。



図-10 SOM で左上と右下に格納された周波数特性



図-11 SOM を用いた診断

3.3 打音データを用いた SOM による診断の検討

本研究では、ヘルシンキ工科大学と Laboratory of Computer 社が提供する「SOM_PAK¹⁰」を利用して SOM を作成した。入力スペクトルは前節で記した要領で 101 次元に設定した。30×30の2次元ニューロンユニットを 持つ SOM 上に投影したグレーマップを図-9に示す。な お、初期学習率係数 $\alpha_0 = 0.2$ 、初期近傍サイズ $N_c(0) = 18$ とし、学習回数は 100 万回とした。この値は SOM を作 成する際に一般的に推奨されている値である。この図は, ユニット間の距離がグレーレベルで示され、ユニット間 の距離が遠いほど灰色が濃くなっている。この図より, 右上に行くほど両ユニット間が白く表されており, 左下 に行くほどグレーが濃くなっていることがわかる。これ は、互いの入力スペクトルが非常に近似している健全部 が右上に格納されていることを示している。ここで、振 幅比との対応を考察するため、振幅比が高い打撃点から 順に赤(1~7番目),橙(8~14番目),緑(15~21番目), 青(22~28番目),灰(29~33番目)の順で欠陥部に色 づけした。この図より、右上から遠ざかるに従い振幅比 が高く、 欠陥レベルが高いと推定される打撃点が配置さ れているということがわかる。すなわち, SOM を用いて



図-12 別の欠陥箇所で得られた入力スペクトル

劣化レベルの診断を行えることを示している。また,左 上に配置された打撃点 27 と右下に配置された打撃点 67 の周波数特性を図-10に示す。このように周波数特性が 異なる打撃点は遠いユニットに格納され,周波数特性の 違いが正しくパターン認識されていることが確認でき た。健全部の音圧特性は、コンクリート構造物の種類や 供用期間によって少しずつ変化すると考えられるが,健 全部の音圧特性を自動的に基準化できる SOM は、コン クリート構造物の劣化診断に対して非常に有用である と考えられる。

続いて,作成したマップを用いて,同じ橋梁の写真-2 と異なる場所(写真-1中の欠陥 2~4)で調査を行っ た際の打音結果(健全部 3 箇所,欠陥部 3 箇所)の劣化 レベルを判定した。音圧特性から得られた入力スペクト ルと,学習の終了した SOM ユニットとの誤差二乗和が 最も小さいユニットにマッピングしたものを図-11 に 示す。図より,健全箇所と欠陥箇所がマップに応じて適 切に診断されていることがわかる。ここで,欠陥 2~4 から得られた入力スペクトルを図-12 に示す。欠陥 3 の 実効値比は欠陥 1 や欠陥 2 と比べて小さいため,マップ 上でも健全に比較的近いユニットにマッピングされ,欠 陥の状態が比較的軽微であることが診断されている。

4. 結言

本研究は,打音法によるコンクリート構造物の診断に 対して自己組織化マップを適用したものである。実際に 供用中のコンクリート橋を打撃した際の音圧特性から 特徴量を抽出し,自己組織化マップを用いて診断が行え るかどうか試みた。以下に本研究で得られた成果を示す。

- (1) 浮きや剥離が認められるコンクリート橋梁の橋 脚に対して打音試験を行うことで、欠陥の有無や 状態により音圧の大きさ・減衰性・周波数特性が 変化することがわかった。
- (2) 音圧の大きさに着目することで欠陥部の診断を ある程度行えることがわかった。しかし、内部の

欠陥状態によっては、音圧の大きさだけでは判断 できないような劣化が生じていることが確認で きた。

(3) 周波数スペクトルに実効値比を乗じて得られた 入力スペクトルを用いた自己組織化マップを作 成した。提案した入力スペクトルにより作成した マップは、劣化レベルを適切に反映していること がわかった。このマップを用いることによって、 劣化診断が行えることを確認した。

謝辞

本研究は科研費(No.21360215)の助成を受けたもの である。

参考文献

- 鎌田敏郎,淺野雅則,国枝稔,六郷恵哲:コンクリ ート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の 適用,土木学会論文集,No.704/V-55, pp.65-79, 2002.5
- 大曲正紘,園田佳巨,宗本理:劣化したコンクリート橋の回転式打音検査に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.31, pp.2143-2136, 2009.7
- 浅野雅則,鎌田敏郎,六郷恵哲,児玉一郎:コンク リートの欠陥評価における打撃音波形パラメータ の役割,コンクリート工学年次論文集,Vol.25, pp.1583-1588,2003.7
- 4) 歌川紀之,北川真也:コンクリート表層部の欠陥検知システム「健コン診断ポータブル」,電力土木技術協会誌,No.349, pp.117-119, 2010.9
- 電気学会 ウェーブレット解析の産業応用に関す る共同研究委員会:ウェーブレット解析の産業応用, pp.135-142,朝倉書店
- 6) 稲葉智明,羅休,羽矢洋:音解析法の検証と評価法の適用事例,土木学会第57回年次学術講演会講演概要集,pp.339-342,2002.9
- 7) 徳高平蔵,岸田悟,藤村喜久郎:自己組織化マップの応用,海文堂出版,1999
- T.コホネン:自己組織化マップ、シュプリンガー・ ジャパン、2005
- 9) 魚本健人:コンクリート構造物の非破壊検査技術、 オーム社, pp.62-63, 2008
- 10) HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Laboratory of Computer and Information Science Neural Networks Research Centre : SOM_PAK AND LVQ_PAK, http://www.cis.hut.fi/research/som_lvq_pak. shtml