# 論文 打撃応答特性を自己組織化マップに適用したコンクリート内部欠陥 の領域判定の迅速化に関する検討

大越 悠生\*1・村上 祐貴\*2・倉橋 貴彦\*3・池田 富士雄\*4

要旨:本研究は、インパルスハンマと加速度センサを用いた打撃試験で得られた周波数応答関数を入力デー タとして自己組織化マップに適用し、コンクリート内部の浮きや剥離といった欠陥領域を評価する手法にお ける打撃試験の迅速化を目的とする。打撃応答特性取得のための加速度センサ設置位置の固定、打撃回数の 削減および動画解析による打撃位置座標の自動取得を行うことで、これまで 2.0m×1.8m の領域の測定に1時 間程度要していたが15分程度まで短縮した。内部欠陥を模擬した人工欠陥を埋設した試験体に対し検知精度 を確認した結果、同一位置の打撃回数が5回の場合、実務経験者と同程度の欠陥検知精度を得られた。 キーワード:打音点検、自己組織化マップ、周波数応答関数

## 1. はじめに

我が国の土木構造物の多くは高度経済成長期に集中 的に整備されたことから,建設後 50 年を経過した橋梁 の割合は 10 年後には約 50%になると報告されている<sup>1)</sup>。 建設後 50 年以上経過した橋梁は老朽化が進行している 場合があり,例えば,塩害や中性化は,内部鉄筋の腐食 膨張に起因したコンクリート片の剥落を誘発し,通行車 両や歩行者などの第三者被害に繋がる恐れがある他,構 造性能低下の要因となる。

笹子トンネル事故を契機に,構造物の維持管理が喫緊 の課題となり,道路構造物等の点検については,平成26 年に道路法が改正され,5年に1度の近接目視が法的に 義務付けられた。また,近接目視において異常が認めら れる箇所については打音点検や触診を行うことが明記さ れた。このように打音点検は,既存構造物の維持管理に おいて重要な位置付けにある一方で,打音点検は官能試 験であり,打音点検の欠陥検知精度は点検者によって異 なることが報告されている<sup>2</sup>。

このようなことを背景として,著者らは,点検者の経 験に依存せず,コンクリート内部の欠陥領域を定量的に 評価可能な点検手法の確立および実用化を目的とし,加 速度センサとインパルスハンマを用いて打撃試験を行い, 取得した周波数応答関数(伝達関数)を自己組織化マッ プ(Self-Organizing Map,以下,SOM)に適用する欠陥領 域評価手法を提案した<sup>3)</sup>。

一方,この打撃試験では,NDISの衝撃弾性波法<sup>4)</sup>を参 考に,応答信号を取得する加速度センサを粘着テープを 用いて打撃点近傍に設置して測定を行った。そのため, 打撃点ごとに粘着テープを用いて加速度センサを貼り直 す必要があることから,測定に時間と労力を要していた。 野内らは打撃試験に要する測定時間の短縮を図るため, 打撃応答を取得する加速度センサの設置位置を固定した 場合の欠陥検知精度について検討を行っている。その結 果,直径は最小で200mm,埋設深さは最大で70mmまで の欠陥領域評価が可能であることが示された。しかしな がら、上述の欠陥検知精度を得るために、同一箇所を5 回打撃していることに加えて,打撃位置を管理するため に、事前に対象面に格子を描く等して座標を設定する必 要があり、複数回の打撃と打撃位置情報取得のための前 準備に時間を要することが課題であった。そこで、本研 究では、これまで未検討であった打撃回数が検知精度に 及ぼす影響や打撃位置の座標取得方法の自動化について 検討を行い、実務経験者の欠陥検知精度との比較を行っ た。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 床版試験体概要

試験体概要を図-1 に示す。試験体は縦 1700mm,横 1700mm,厚さ180mmの床版試験体である。試験体上部 にはD16 鉄筋を300mm間隔で配筋し,試験体下部には D16 鉄筋を150mm間隔で配筋した。試験体内部には図 -1 に示した位置に内部欠陥を模擬したスチレンボード 製の人工欠陥(厚さ:5mm)が埋設されている。埋設し た人工欠陥(以下,欠陥)は円盤状であり,直径は100, 200,300,400,500mmである。人工欠陥は試験体半面 に同一深さで埋設しており,打撃面から欠陥表層までの 距離(以下,埋設深さ)は30mm,50mm,70mm,90mm の4水準である。以降,埋設深さ30mmと50mmの試験

\*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻 (学生会員)
\*2 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授(正会員)
\*3 長岡技術科学大学 機械創造工学専攻 准教授
\*4 長岡工業高等専門学校 機械工学科 教授



粗骨材の	フランプ	W/C	s/a	空原		単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
最大寸法 (mm)	(cm)	(%)	(%)	凤 量 (%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤		
25	12	44.0	40.4	4.5	149	339	733	1123	3.61		

体を床版試験体 A, 埋設深さ 70mm と 90mm の試験体を 床版試験体 B と称す。コンクリートの計画配合は表-1 に示す通りであり、セメントは早強ポルトランドセメン トを用いた。試験体は打設後7日間の湿布養生を行った のち、その後は気中養生とした。また、材齢7日での圧 縮強度は 35.4N/mm<sup>2</sup>であった。

#### 2.2 壁面試験体

試験体概要を図-2 に示す。試験体は幅 2000mm, 高 さ 1800mm, 厚さ 280mm の壁面試験体である。コンクリ ートの計画配合は床版試験体と同様の配合である。図-2(b)に示すように欠陥は鉄筋上にあり, 欠陥の厚みを変 えることで, 埋設深さを変えている。欠陥深さは 30~ 90mm の範囲で 10mm 間隔に 5 水準, 欠陥領域面積は 10000mm<sup>2</sup>, 90000mm<sup>2</sup>, 160000mm<sup>2</sup>の 3 水準とした。表 -2 に試験体に埋没されている欠陥のパラメータを示す。

## 2.3 打撃試験方法

試験体表面をインパルスハンマ(加振周波数範囲:0~ 8000 Hz,最大測定荷重:2200N,打撃体の直径:5mm) で打撃し,加速度センサ(測定周波数範囲:0.3 Hz~10×10<sup>3</sup> Hz,最大使用加速度4900 m/s<sup>2</sup>)を用いて打撃により生じ るたわみ振動を含んだ表面振動を測定した。測定におけ るサンプリング周波数は20×10<sup>3</sup> Hzとした。また,加速 度センサはアンプに接続し出力信号を3.16倍に増幅し た。測定は連続して行い,図-3に示すようにインパル スハンマの打撃力が閾値(500N)を超過した時点を基準



図-2 壁面試験体概要

表一2 埋設久陥ハファータ									
欠陥No.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
欠陥深さ (mm)	30	50	90	50	90	70	80	50	70
欠陥領域 (cm <sup>2</sup> )	100	100	100	400	400	900	900	1602	1600



時刻として,基準時刻より2.35×10<sup>-3</sup>秒前から基準時刻より1.00×10<sup>-1</sup>秒後までのインパルスハンマおよび加速度 センサのデータ(データ数2048)を抽出し,入力と応答 の時刻歴波形とした。

床版試験体の打撃点は 50mm 間隔で実施し,図-1に 示した黒色の実線の交点を打撃した。既往の研究 <sup>5</sup>にお いて各測定点の打撃回数は 5 回としていたが,打撃回数 を削減できれば測定時間の短縮に繋がることから,打撃 回数を 5 回とした場合に加えて 1 回,3 回とした場合で も実験を行い,打撃回数が欠陥検知精度に及ぼす影響に ついて検討した。壁面試験体の打撃間隔は 100mm とし た。衝撃弾性波法では打撃位置近傍に加速度センサを設 置する <sup>4</sup>が,本研究では迅速化を目的としていることか ら,加速度センサの設置位置は床版試験体においては試 験体の中心 (Q17) とし,壁面試験体についても試験体中 心に固定した。加速度センサは測定面上に厚さ 0.4mmの 両面粘着テープを用いて固定した。なお床版試験体は両



端部から 100mm の位置で直径 50mm の鋼管パイプ上で 支持している。壁面試験体については測定面裏側を鋼材 で支持した。

## 3. 欠陥領域評価手法

# 3.1 周波数応答関数

鈴木らは、打撃のばらつきが欠陥検知精度の低下に繋 がることを指摘している <sup>0</sup>。打撃力がばらつくことで、 打撃物と被打撃物の接触時間にもばらつきが生じ、入力 波形の周波数成分の変化に繋がる。インパルスハンマに よる打撃は、フラットな周波数特性を有しておらず、打 撃によって、加振周波数成分が変化するため、周波数分 布を正確に把握するためには周波数応答関数(伝達関数) で評価する必要がある。周波数応答関数は式(1)によって 定義されるが、本稿では測定ノイズの影響を低減するた め打撃回数が3回または5回の場合は式(2)から周波数応 答関数を算出した。なお、打撃が1回の場合は式(1)から 周波数応答関数を算出した。

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \tag{1}$$

$$=\frac{Y(f)X(f)^{*}}{X(f)X(f)^{*}} = \frac{C_{xy}(f)}{P_{xx}(f)}$$
(2)

ここで,H(f):周波数応答関数,Y(f):加速度センサ の出力スペクトル,X(f):インパルスハンマの入力スペ クトル,X(f)\*:インパルスハンマの入力スペクトルの複 素共役, $C_{xy}(f)$ :インパルスハンマと加速度センサのク ロススペクトル, $P_{xx}(f)$ :インパルスハンマのパワース ペクトルである。

## 3.2 自己組織化マップ (SOM)

本研究では,打撃試験で得られた周波数応答関数を網 羅的に利用するために,多次元データ間の類似性をもと にクラスタリングを行うことが可能な自己組織化マップ

(SOM)を用いて欠陥領域評価を行う。SOM はニューラ ルネットワークの一種であり、多次元データ間の類似性 を、2 次元平面上に関係性を保持した状態で表現する解 析手法である<sup>7)</sup>。

SOM によるクラスタリングマップの作成には Viscovery SOMine 7.0 を使用し,野内らの研究を参考に ノード数 2000, テンション (近傍半径) 0.5, クラスタ数 は6とした。入力値には周波数応答関数を使用した<sup>5)</sup>。 なお,周波数応答関数を所定の間隔で積分した値を入力 データとすることで,周波数特性に包含されるノイズの 影響を低減した。本解析では野内らの研究を参考に積分 間隔は 97.7Hz,積分範囲は 0~7910.2Hz とし,1 打撃点当 り計 81 個のデータセットとした。

# 4. コンクリート内部欠陥領域の評価

# 4.1 コンクリート内部欠陥領域の判定

SOM により生成された各クラスタの欠陥と人工欠陥 (スチレンボード)が埋設されていない領域(以下,健 全)の判定は、あらかじめ欠陥の埋設位置が既知である 試験体であることから、健全部のデータが属するクラス タはすべて健全と判定し、それ以外のクラスタは欠陥と 判定した。なお、加速度センサ設置付近の打撃データは 特徴量が非常に大きくなるため、加速度センサ設置位置 を中心として 50mm 以内の打撃点データは検討の対象外 とした。

#### 4.2 床版試験体の欠陥上検知率

床版試験体 A, B の試験体中心部 (Q17) に加速度セン サを設置した際の各打撃回数におけるグレーディングマ ップを図-4 に示す。ここでグレーディングマップとは SOM により得られたクラスタリング結果を試験体上の 打撃位置に対応させたものであり,色が同じであれば同 ーのクラスタに配置されたデータである。ただし,図-4(a)~(f)は試験体毎に解析を実施していることから,異 なる試験体の同一色のクラスタは全く別のクラスタであ ることを留意されたい。図中には健全クラスタの判定に 用いたクラスタの色を示す。なお、図-4(e)の健全部に おいて緑色のクラスタが数点、図-4(f)の健全部において、 黄色のクラスタが2点存在するが、両クラスタに属する データの大部分は欠陥上のデータであることから、両ク ラスタは欠陥のデータが含まれるクラスタとして扱うこ ととした。図-4の各欠陥内の数値は式(3)から算出した 欠陥上検知率であり、これらを整理した結果を表-3に 示す。ここで、欠陥と判定された領域とは欠陥上にあり、 健全クラスタと異なるクラスタに属する打撃データがあ る領域である。

図-4(a)~(c)に示すように,埋設深さが50mm以下 の床版試験体Aの場合,打撃回数3回および5回の場合 は、すべての欠陥が検知された。一方,打撃回数が1回 の場合では欠陥検知率が大幅に低下した。図-4(d)~ (f)に示した埋設深さが70mm以上の床版試験体Bで は、3回および5回打撃の場合は欠陥の検知率に明らか な差異は認められなかった。しかしながら、1回打撃の 場合においては、3回および5回の場合の検知率と比較 して検知精度が低下した。このように測定データには外 部ノイズが含まれており、複数回の打撃を行い式(2)に示 したようなクロススペクトル法を用いることでノイズを 低減する必要があると考えられる。

## 4.3 壁面試験体の欠陥上検知率

壁面試験体のグレーディングマップを図-5に示す。 床版試験体と同様,打撃回数が3回以上の打撃において は検知精度に大きな差異は認められなかった。

なお,図-5についても図-4に示した床版試験体と 同様に試験体毎に解析を行っている。

本手法の検知精度を確認するため,実務経験のある被 験者 12 名と非実務経験者 2 名を対象として,内部欠陥 領域の検知精度を測定した欠陥検知率式(4)より算出し た。

各被験者の欠陥検知率を表-4 に示す。本研究で提案 する手法で5回の打撃を行った場合,実務経験者の検知 率の平均と概ね同程度の結果を得られることができた。 また,非実務経験者の欠陥検知率が40%程度であり,本 手法は点検者不足が深刻な問題となっている地方自治体 が管理する構造物への展開が有効であると考えられる。

一方で本手法では、打撃を等間隔(100mm)で行ってい

	+ 17	欠陥上検知率(%)							
	直径 (mm)	床覑	反試験体	本 A	床版試験体 B				
		1回	3回	5回	1 回	3回	5 回		
埋設深さ:	500	46	88	88	46	84	83		
床版試験体	400	54	81	85	54	75	88		
A:50mm	300	0	81	59	0	0	0		
床版試験体	200	0	83	83	0	0	0		
B:90mm	100	0	0	0	0	0	0		
埋設深さ:	500	0	78	83	0	86	82		
床版試験体	400	63	83	75	63	75	79		
A:30mm	300	56	66	72	56	0	0		
床版試験体	200	0	75	58	0	0	0		
B:70mm	100	0	0	0	0	0	0		

表-3 センサ位置(Q17)の欠陥上検知率

ることから,特徴量の小さい欠陥部と健全部の境界の付 近の判定精度が低く,欠陥領域を小さめに評価してしま うため,安全側の評価として,同定した領域に割り増し 係数を乗じて領域を拡大する等の補正が必要になると考 えており,これは今後の課題としたい。

# 5. 格子を必要としない欠陥領域評価手法

## 5.1 打撃点の座標取得

上述したように、加速度センサを固定した場合におい ても複数回打撃することで検知精度はある程度確保され ることが確認された。しかしながら、本手法は欠陥領域 判定をリアルタイムで明示できないため、打撃位置情報 を把握する必要がある。これまでは検査対象面に格子を 描き、その交点を打撃することで打撃位置を把握してい たが、測定までに多大の時間を要してしまうことが課題 であった。

そこで本研究では打撃点の平面座標を取得するため に打撃試験を撮影した動画から打撃位置の抽出を行った

(図-6 参照)。試験体正面から撮影した動画を使用し, フレームごとにハンマのヘッド部分に取り付けたマーカ ーを自動的に検出し,X座標およびY座標を出力する。 インパルスハンマの時刻と同期することで,打撃時の座 標を抽出することができる。

# 5.2 欠陥領域評価

5.1 に示した手法を用いた打撃試験のグレーディング マップを図-7(a)に示す。なお、2.2 に示した壁面試験体 の試験では各交点を1回打撃する場合,合計303回打撃 することになることから,打撃回数は格子を引いた場合 の打撃回数に対して50回以内となるように打撃試験を 実施した。打撃回数は257回であった。グレーディング マップの作成については各打撃点を直線で結び2次元ポ

## 表-4 各被験者と本研究の欠陥検知率

試験者No.	欠陥検知率(%)
熟達者1	74.9
熟達者2	66.9
熟達者3	62.9
熟達者4	56.9
熟達者5	66.8
熟達者6	62.6
熟達者7	61.0
熟達者8	63.6
熟達者9	59.9
熟達者10	54.5
熟達者11	64.9
熟達者12	56.0
平均	62.6
試験者No.	欠陥検知率(%)
非実務経験者1	44.6
非実務経験者2	29.4
平均	37.0
木研究	欠陥検知率(%)
一个明九	
壁面5回打撃	63.9
壁面3回打擊	57.4
壁面1回打撃	36.1



図-6 動画解析による打撃座標の抽出

リゴンメッシュの作成を行った。作成したメッシュに基 づき、境界値(=0.5)として欠陥領域を作成した。比較の ため図-4(a)に示した格子を用いて1回打撃を行った壁 面試験体結果を 5.2 に示した手法で改めて作成したグレ ーディングマップを図-7(b)に示す。図-7(a)における 欠陥領域の判定は、実務を想定し、図-4、図-5のよう に欠陥埋設情報に基づいて判定せず各クラスタのプロフ ァイルから算出した二乗和をもと行った。プロファイル とは、全クラスタの平均値に対する、各クラスタの平均 値の偏差を示すものであり, 二乗和とは各周波数帯にお けるプロファイルを二乗して総和したものであり、編差 が小さいほど二乗和は小さくなる。欠陥部のデータは全 体的に偏差が大きくなり、それに伴い二乗和も大きくな ることから、本検討においては、図-8に示した各クラ スタの二乗和からクラスタ1,2,3および4を健全とし て、クラスタ5、6を欠陥とした。なお、閾値の決定につ



欠陥:赤色



(打撃回数 303 回) 図-7 格子の有無による比較

(b) 格子を用いた1回打撃



いては更なる検討が必要である。

本検討では打撃回数が1回のため検知精度は低いもの の,図-7(b)において検出された長方形の欠陥が図-7(a)においても概ね同様の欠陥が検知されていることか ら,ある程度無秩序に打撃をした場合においても、欠陥 を検知できることが示された。ただし、欠陥領域の境界 を健全部と欠陥部の中点としているため、図-7(b)の領 域とはずれが生じており、境界同定の方法については今 後さらなる検討を進める。

以上の結果,2000×1800mmの試験体においては測定 時間を1時間程度から15分程度に大幅に短縮すること ができた。さらに本手法では複数人での打撃試験も可能 であり,さらなる時間短縮が可能であると考えられる。

# 6. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 同一箇所の打撃回数が多いほど検知率が向上す ることが明らかとなった。
- (2) 本研究で提案する手法で同一位置の打撃回数が5 回の場合,実務経験者の平均と欠陥検知率と同程 度の欠陥検知精度であった。
- (3) 撮影した動画から打撃位置を特定し、格子を必要 としない欠陥領域評価を行うことができること が示された。その結果、従来の方法に比べて測定 時間が1時間から15分程度に短縮された。

#### 謝辞

本研究の一部は,科学研究費補助金(基盤研究(B), 課題番号:17H03290)により行った。ここに記して謝 意を表する。

## 参考文献

- 1) 国土交通省道路局:道路メンテナンス日報, 2018
- 舟波尚哉,村上祐貴,外山茂浩,小海元暉:熟達 点検者の打音点検動作の形式知化に関する基礎 的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.41, No.1, pp.1871-1876,2019
- 3) 野内彩可,村上祐貴,井山徹郎,外山茂浩:周波 数応答関数を入力値として自己組織化マップに 適用したコンクリート内部の欠陥領域評価,コン クリート工学論文集,Vol.29, pp.87-100, 2018
- 日本非破壊検査協会:コンクリート構造物の弾性 波による試験法―第2部:衝撃弾性波法, NDIS2426-2,平成21年6月29日制定
- 5) 野内彩可,村上祐貴,井山徹郎,池田富士雄:応答 信号取得位置を固定した打撃試験における自己組 織化マップによるコンクリート内部の欠陥領域判 定,コンクリート工学年次論文集,Vol. 40, No. 1, pp. 1755-1760, 2018
- 6) 鈴木理絵,中村光,三浦泰人,多田裕希:自己組織 化マップによる打音データ評価に関する基礎的研 究,コンクリート工学年次論文集,Vol. 39, No.
   1, pp. 1885-1890, 2017
- 7) 徳高平蔵,大北正昭,藤村喜久郎:自己組織化マ ップとその応用,丸善出版,2012