

論文 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

野内 彩可*1・村上 祐貴*2・井山 徹郎*3・池田 富士雄*3

要旨：本研究では、インパルスハンマと加速度センサを用いた打撃試験により得られる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する、コンクリート内部の欠陥領域評価手法における測定方法の効率化を目的とする。内部欠陥を模擬した人工欠陥を埋設した大型の床版試験体に対し、加速度センサの設置位置を固定して打撃点のみを移動させた。本手法により得られた各打撃点における周波数応答関数を自己組織化マップに適用してコンクリート内部の欠陥領域判定を試みた結果、打撃点と加速度センサ間の距離が半径 2.2 m 以内の範囲内では、直径 200 mm、埋設深さ 90 mm の欠陥まで内部欠陥の領域判定が可能であった。

キーワード：周波数応答関数、自己組織化マップ、非破壊検査

1. はじめに

我が国の人口構造の変化に伴う熟達点検者の不足や維持管理費の増大を背景に、各種計測用センサと ICT や RT 技術を駆使した、熟達点検者の技能に依存しない点検・診断手法の開発が各方面で進められている。

著者らはこれまで、道路法の改正によって、その位置付けが高まった打音点検の高度化を目指し、自己組織化マップ (Self-Organizing Map, 以下, SOM) を用いた欠陥領域判定手法を提案している^{1) 2)}。著者らの既往の研究では、人工欠陥を埋設した床版試験体 (断面 900 mm × 900 mm) に対し、インパルスハンマと加速度センサを用いた打撃試験を行っており、打撃の周波数スペクトルを考慮した周波数応答関数 (伝達関数) 全体を SOM でパターン認識し、欠陥領域の波形を分類可能か検討した。その結果、直径 200 mm、埋設深さ 90 mm の欠陥まで、コンクリート内部の欠陥領域の判定が可能であることを明らかとした¹⁾。一方、この打撃試験方法では、NDIS の衝撃弾性波法³⁾を参考に、応答信号を取得する加速度センサを打撃点近傍に設置して測定を行った。その際、加速度センサの固定には、取り扱いが簡易であり、 10×10^3 Hz 程度までの感度がほぼ一定である薄い粘着テープを用いた。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。

そこで本研究では、提案した欠陥領域評価手法における測定方法の効率化を目的として、加速度センサの設置位置を固定して、打撃点のみを移動させた打撃試験で取得した各打撃点の周波数応答関数を SOM に適用することで、コンクリート内部の欠陥領域の判定が可能か検討を行った。

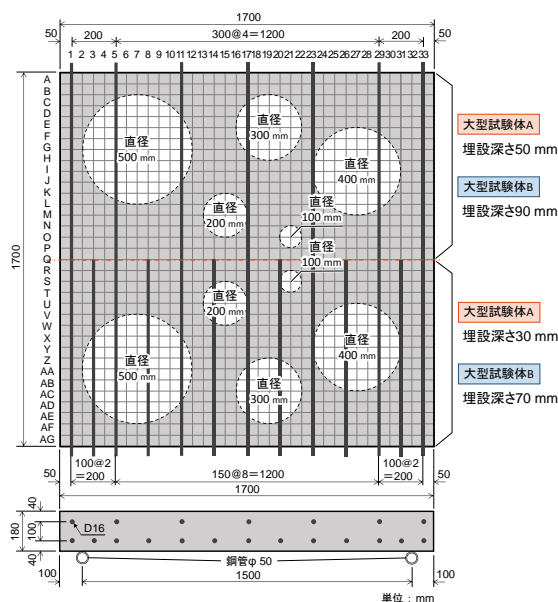


図-1 試験体概要

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体概要を図-1に示す。試験体は、断面 1700 mm × 1700 mm、高さ 180 mm の大型の床版試験体である。試験体上部には D16 鉄筋を 300 mm 間隔で配筋し、下部には D16 鉄筋を 150 mm 間隔で配筋した。試験体内部には、図-1に示したように、内部欠陥を模擬した直径 100, 200, 300, 400, 500 mm の円盤状の人工欠陥 (スチレンボード: 厚さ 5 mm) を試験体半面に同一深さで埋設した。人工欠陥 (以下、欠陥) の埋設深さは 4 水準とし、埋設深さ 30 mm と 50 mm の試験体を大型試験体 A、埋設深さ 70 mm と 90 mm の試験体を大型試験体 B と以降称する。コンクリートの示方配合は表-1に示す通りであり、

*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 博 (工) (正会員)

*3 長岡工業高等専門学校 機械工学科准教授 博 (工)

セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。試験体は打設後7日間湿布養生を行い、その後は気中養生とした。材齢7日時点の圧縮強度は35.4 N/mm²であった。

2.2 測定方法

打撃の入力には、インパルスハンマ（加振周波数範囲：0～8000 Hz，測定範囲：2200 N，打撃面の直径：5 mm）を用い、打撃により生じるたわみ振動の測定には、加速度センサ（周波数範囲：2 Hz～10×10³ Hz，最大使用加速度：700 m/s²）を用いた。測定におけるサンプリング周波数は、加速度センサの最大測定振動数の2倍以上となる25.6×10³ Hzとし、測定時間は0.08 sec，データ数は2048，周波数応答関数は5回の打撃による平均波形を採用した。

測定は複数の打撃点に対し、応答信号を取得する加速度センサの設置位置（以下、センサ位置）を1点に固定して行った。打撃点は図-1に示した50 mm 間隔の各格子の交点とし、例えば、試験体中心部の打撃点はQ17となる。加速度センサは打撃点と同一平面上に設置し、厚さ0.4 mmの粘着テープを用いて試験体表面に接着した。なお、試験体の支持条件は、試験体と支持材との接触面を最小限にするため、試験体両端部から100 mmの位置をφ50 mmの鋼管パイプ上で支持した。

3. センサ位置固定時の周波数応答特性の検討

3.1 打撃点およびセンサ位置が周波数応答特性に及ぼす影響

(1) 打撃点が周波数応答特性に及ぼす影響

応答信号を取得する加速度センサを図-1に示した大型試験体A（埋設深さ30，50 mm）の試験体端部の健全部（AA1）に設置し、打撃点のみをAA行内で移動させて打撃試験を行った。図-2に同一のセンサ位置（AA1）で取得した周波数スペクトルとAA行の各打撃点におけるインパルスハンマの周波数スペクトルから算出した周波数応答関数の一例を示す。図には、直径300，400，500 mmの欠陥領域上の打撃点および健全部の代表的な打撃点3点の周波数応答関数を示している。なお、周波数応答関数は式(1)の定義式を基に、測定ノイズの影響を低減させるため式(2)より算出した。

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

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

ここで、 $H(f)$ ：周波数応答関数、 $Y(f)$ ：加速度センサの周波数スペクトル、 $X(f)$ ：インパルスハンマの周波数スペクトル、 $X(f)^*$ ：インパルスハンマの周波数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

表-1 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
25	44.0	40.4	4.5	149	339	733	1123	3.61

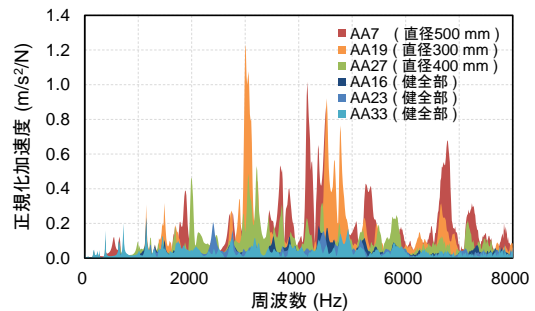


図-2 打撃点の影響（センサ位置：AA1（健全部））

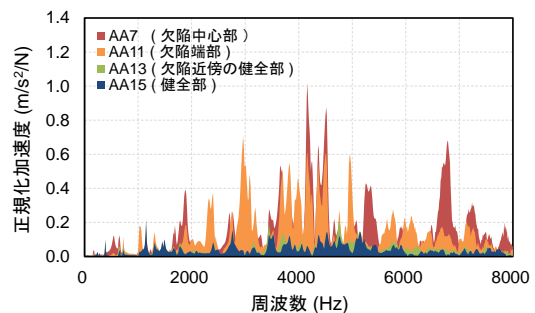


図-3 直径500 mmの欠陥周辺部の周波数応答関数（センサ位置：AA1（健全部））

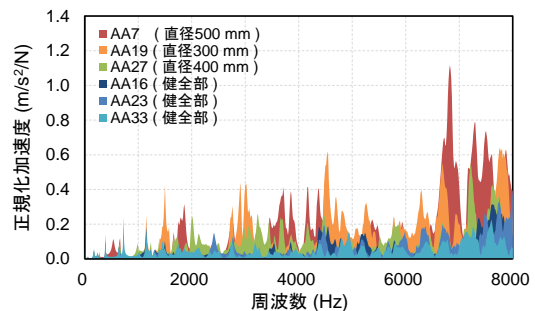


図-4 センサ位置の影響（打撃点：AA1（健全部））

パワースペクトルである。

打撃点が欠陥部の場合、打撃点が健全部の場合と比較して周波数応答関数の振幅値である正規化加速度が全周波数帯域で大きく、健全部とは異なる周波数応答特性を示すことが確認できる。

次に、直径500 mm，埋設深さ30 mmの欠陥周辺部の各打撃点の周波数応答関数を図-3に示す。近接した打撃点であっても、欠陥部と健全部では周波数応答関数の正規化加速度が大きく異なり、測定された周波数応答関数は、打撃点の影響を強く受けることが分かる。

(2) センサ位置が周波数応答特性に及ぼす影響

インパルスハンマの打撃点を大型試験体AのAA1に固定し、加速度センサのみをAA行内で移動させて打撃試験を行った。図-4に同一の打撃点（AA1）で取得し

たインパルスハンマの周波数スペクトルと AA 行の各センサ位置で取得した周波数スペクトルから算出した周波数応答関数の一例を示す。図には、直径 300, 400, 500 mm の欠陥領域上および代表的な健全部の 3 点に加速度センサを設置した際の周波数応答関数を示している。同一打撃点であっても、センサ位置により得られる周波数応答特性が異なり、打撃点が健全部でもセンサ位置が欠陥領域上の場合、センサ位置が健全部の場合と比較して、周波数応答関数の正規化加速度は 0~8000 Hz の全周波数帯域で大きい。このように、加速度センサにより取得される周波数スペクトルはセンサ位置の影響を受けることが分かる。

次に、加速度センサを大型試験体 A の直径 500 mm, 埋設深さ 30 mm の欠陥中心部 (AA7) に設置し、打撃点のみを AA 行内で移動させて打撃試験を行った。図-5 に同一のセンサ位置 (AA7) で取得した周波数スペクトルと AA 行の各打撃点におけるインパルスハンマの周波数スペクトルから算出した周波数応答関数の一例を示す。図には、直径 300, 400, 500 mm の欠陥領域上の打撃点および健全部の代表的な打撃点 4 点の周波数応答関数を示している。加速度センサを欠陥領域上に設置した場合にも、打撃点が欠陥部の場合、打撃点が健全部の場合と比較して周波数応答関数の正規化加速度は大きくなり、欠陥部と健全部では異なる周波数応答特性を示している。また、加速度センサを設置した直径 500 mm の欠陥領域上の打撃点では、周波数応答関数の正規化加速度が全周波数帯域で極めて大きく、直径 300 mm の欠陥領域上の打撃点と比較し、最大のピーク周波数である卓越周波数の正規化加速度が約 6 倍大きい。

以上より、センサ位置は周波数応答特性に影響を与えるが、打撃点の影響と比較してその影響は小さい。また、センサ位置によらず打撃点が欠陥部と健全部では周波数応答特性が異なり、打撃点が欠陥部の場合、打撃点が健全部の場合と比較して、周波数応答関数の正規化加速度は全周波数帯域において大きくなることが明らかとなった。

3.2 減衰特性が周波数応答特性に及ぼす影響

本研究では、センサ位置を固定して打撃点のみを移動させて打撃試験を行うため、打撃点と加速度センサ間の距離が変化する。これにより、周波数応答特性が距離減衰の影響を受ける可能性がある。そこで、打撃点を大型試験体 A の試験体端部の健全部 (Q1) に固定し、加速度センサのみを Q 行内で移動させて打撃試験を行った。

図-6 に同一の打撃点 (Q1) で取得したインパルスハンマの周波数スペクトルと Q 行の各センサ位置で取得した周波数スペクトルから算出した周波数応答関数の一例を示す。図には、代表的なセンサ位置 7 点の周波数応答関数を示している。距離減衰の影響は、周波数帯域によ

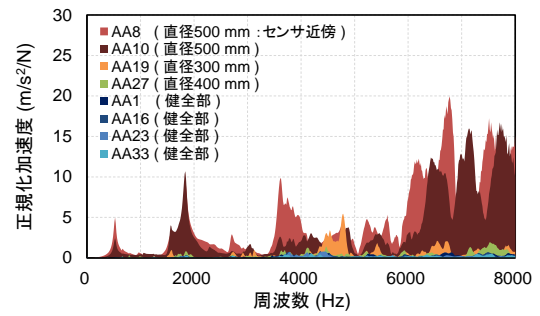


図-5 打撃点の影響 (センサ位置: AA7 (欠陥部))

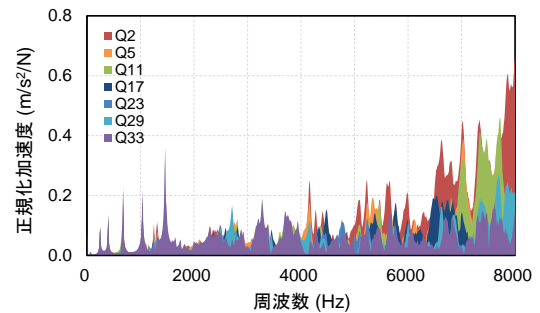


図-6 減衰特性の影響 (打撃点: Q1 (健全部))

って異なり、特に高周波数帯域において減衰が大きいことから、試験体上において発生する減衰特性の影響を一律に考慮することは困難である。そこで本研究では、まずは距離減衰の影響については考慮せず、SOM により内部欠陥の領域判定が可能か検討した。

4. センサ位置固定時の SOM による欠陥領域判定

図-5 に示したように、同じ欠陥領域上であっても打撃点により周波数応答特性が異なり、欠陥部との変化量が小さい場合には、欠陥領域の判定が困難である。

そこで本章では、周波数応答関数全体を SOM によりパターン認識することで、内部欠陥の領域判定を試みた。

4.1 パラメータの設定

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、ノード数 2000, テンション (近傍半径) 0.5, クラスタ数は 4, クラスタ手法は凝集性のあるクラスタを算出する SOM-Ward に設定した。SOM に用いる入力データには周波数応答関数を用いた。周波数応答関数では、インパルスハンマの周波数スペクトルの 0 Hz 成分に異常値が認められる測定データが複数あったことから、0~100 Hz を除く 100~8000 Hz の範囲から 100 Hz 間隔ごとに周波数応答面積 (計 79 次元) を算出した。また SOM は、各センサ位置において得られた打撃試験結果ごとに行った。なお、打撃点の近傍に加速度センサを設置した著者らの既往の研究¹⁾では、周波数帯域ごとに重み付けを変化させることで SOM により欠陥検知率が向上したが、本手法の場合には欠陥検知率の改善が見られなかったことから、重み付けは行って

注) 各図中のクラスタの色は同一であるが、クラスタ指標は異なる。

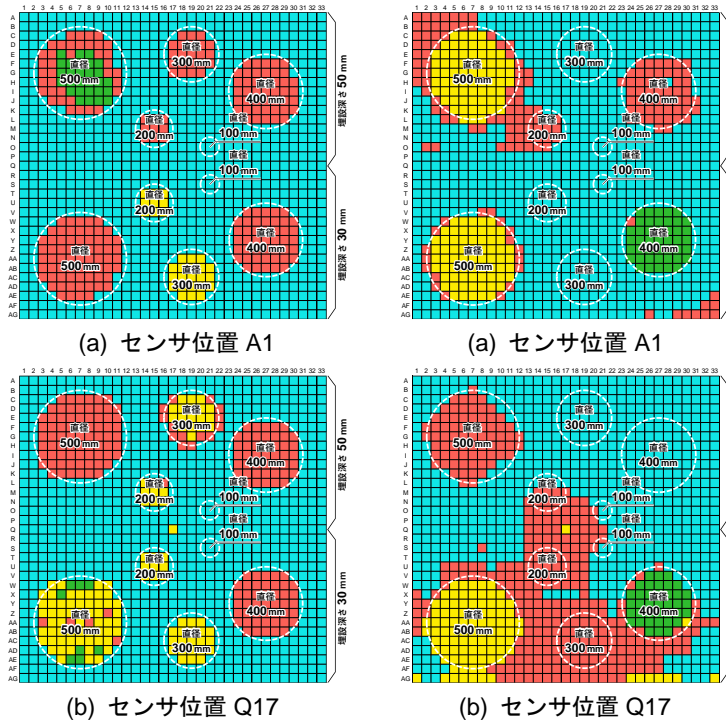


図-7 大型試験体 A の
グレーディング結果

図-8 大型試験体 B の
グレーディング結果

いない。この原因については現在検討中である。

4.2 SOM による欠陥領域判定

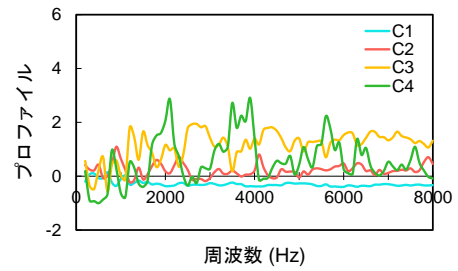
(1) センサ位置が健全部の場合

加速度センサを図-1 に示した大型試験体 A, B の試験体中心部 (Q17) および試験体隅角部 (A1) に設置して打撃試験を行い、得られた各打撃点の周波数応答関数を入力データとして SOM に適用することで、内部欠陥の領域判定を行った。

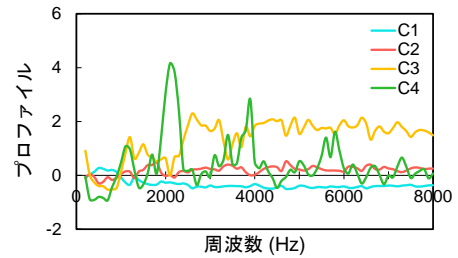
図-7 および図-8 に SOM により得られたクラスタリング結果を、実試験体上の打撃点に対応させたグレーディングマップを示す。加えて、表-2 にセンサ位置ごとの各欠陥の欠陥検知率を示す。ここで欠陥検知率は、欠陥領域上において後述するプロファイルを基に欠陥と評価されたブロック数を各欠陥の面積 (1 マスに 5 割以上欠陥を有するブロック数) で除すことで算出した。

図-7 (a) および (b) に示した大型試験体 A のグレーディングマップより、センサ位置が A1 と Q17 の場合、直径 100 mm の欠陥を除いて、全ての欠陥領域を判別できている。欠陥検知率は、センサ位置が Q17 の場合の方が高く、直径 100 mm の欠陥を除いて、埋設深さ 30 mm と 50 mm の全ての欠陥を 100% 検知できている。

次に、図-8 (a) および (b) に示した大型試験体 B のグレーディングマップより、センサ位置が A1 の場合は、埋設深さ 70 mm の直径 400 mm と 500 mm の欠陥および埋設深さ 90 mm の直径 500 mm の欠陥まで欠陥領域を判定可能である。しかしながら、センサ位置が Q17 の場合



(a) センサ位置 A1



(b) センサ位置 Q17

図-9 各クラスタのプロファイル
(大型試験体 B)

表-2 センサ位置による各欠陥の欠陥検知率

試験体名	人工欠陥のパラメータ		欠陥検知率 (%)	
	埋設深さ (mm)	直径 (mm)	A1	Q17
大型試験体 A	30	100	0%	0%
		200	100%	100%
		300	84%	100%
		400	100%	100%
		500	97%	100%
		50	100	0%
200	100%		100%	
300	88%		100%	
400	98%		100%	
500	94%		100%	
大型試験体 B	70		100	0%
		200	0%	0%
		300	0%	0%
		400	98%	84%
		500	97%	100%
		90	100	0%
200	0%		0%	
300	0%		0%	
400	0%		0%	
500	96%		0%	

には、埋設深さ 90 mm の欠陥までは欠陥領域を判定できず、センサ位置の違いにより欠陥検知率が異なる。この原因については現在検討中であるが、図-8(b)より、試験体のたわみ振動が現れやすい試験体中心部と埋設深さ 90 mm、直径 500 mm の欠陥が同一クラスタに分類されていることから、これらの周波数応答特性は類似性が高く、欠陥検知率が低下したものと推察される。

図-9 に大型試験体 B の各打撃試験における 4 つのクラスタのプロファイルを示す。ここでプロファイルとは、クラスタ全体の平均に対する各クラスタの平均の偏差を示した値である。図-9 (a) および (b) において、水色のクラスタ (C1) のプロファイルは全周波数帯域で 0 に近い負の値を示しており、周波数応答特性の変化の小さい健全部を示すクラスタであることが分かる。また、大

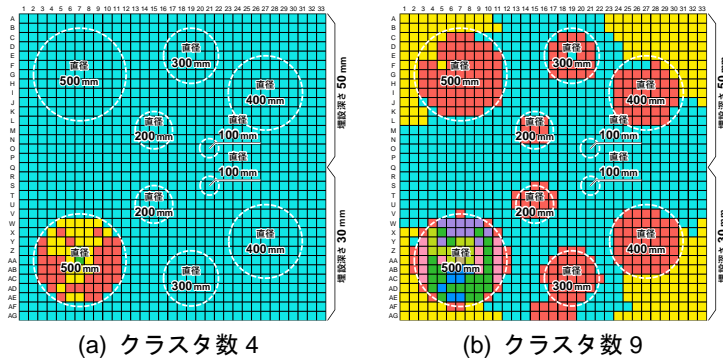


図-10 大型試験体 A のグレーディング結果 (センサ位置 AA7)

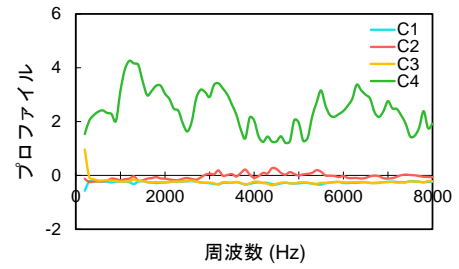


図-11 各クラスタのプロファイル (大型試験体 A : クラスタ数 9)

型試験体 B では、センサ位置によらず健全部の一部が欠陥領域と同じ赤色のクラスタ (C2) に分類されている。プロファイルを確認すると、C2 は欠陥部を示している黄色のクラスタ (C3) と緑色のクラスタ (C4) と比較して周波数応答特性の変化が小さく、健全部と近い特徴を有するクラスタであると考えられる。

(2) センサ位置が欠陥部の場合

続いて、加速度センサを大型試験体 A の直径 500 mm、埋設深さ 30 mm の欠陥中心部直上 (AA7) に設置した場合に、SOM による内部欠陥の領域判定が可能か検討した。

図-10 (a) に SOM により得られたクラスタリング結果を、実試験体上の打撃点に対応させたグレーディングマップを示す。センサ位置が欠陥領域上にある場合、加速度センサを設置した直径 500 mm、埋設深さ 30 mm の欠陥領域上でのみ欠陥領域を判定可能であった。これは、加速度センサが欠陥領域上に設置してある場合、当該欠陥領域上の周波数応答特性の変化が鋭敏に表れ、当該欠陥領域においてクラスタが細かく分類されてしまうためであると考えられる。そこで、クラスタ数を増やして再度 SOM によるクラスタリングマップを作成した。

図-10 (b) にクラスタ数を 9 に増やした場合のグレーディングマップを示す。クラスタ数を増やしたことで、センサ位置直下の欠陥以外の欠陥領域が現れ、直径 100 mm の欠陥を除いて欠陥領域を判別できている。図-11 に比較的特徴量の小さいクラスタ C1~C4 までのプロファイルを示す。グレーディングマップより、試験体の隅角部が黄色のクラスタ (C3) に分類されているが、プロファイルを確認すると、C3 は健全部を含む水色のクラスタ (C1) と周波数応答特性が概ね一致しており、健全部に極めて近い特徴を有しているクラスタであることが分かる。また、C3 は C1 とは異なり、500 Hz 以下の極低周波数帯域において、比較的大きな正の値を示していることから、試験体上における周波数応答特性の違いによりクラスタが分かれたと推測される。

以上より、加速度センサを欠陥領域上に設置した場合にも、SOM によりコンクリート内部の欠陥領域の判定が

可能であった。ただし、加速度センサを欠陥領域上に設置した場合には、センサ位置直下の欠陥の周波数応答特性が顕著に現れ、センサ位置以外の欠陥の検出感度が低下する。そのため、SOM による内部欠陥の領域判定においては、事前に加速度センサを設置する周辺部において打音検査を実施し、明らかに欠陥部である領域を避けて加速度センサを設置することが望ましい。

4.3 センサ位置がクラスタリングに及ぼす影響

センサ位置が SOM による欠陥領域判定に及ぼす影響について確認するため、加速度センサを図-1 に示した大型試験体 A (埋設深さ 30, 50 mm) の試験体隅角部の A1 と AG33、試験体中心部の Q17 と Q6 に設置した際の打撃試験結果を合わせて SOM のクラスタリングマップを作成した。なおノード数は、入力データ数を考慮して 5000 とした。図-12 (a)~(d) にセンサ位置ごとのグレーディングマップを示す。ここで、水色のクラスタ (C1) と赤色のクラスタ (C2) は、図-13 に示した 4 つのクラスタのプロファイルより、全周波数帯域で比較的 0 に近い負の値を示していることから、周波数応答特性の変化の小さい健全部を示すクラスタであることが分かる。グレーディングマップより、センサ位置が試験体隅角部の A1 と AG33 の場合と、試験体中心部の Q17 と Q6 の場合で、SOM によるクラスタリング結果が二分した。この要因として、センサ位置の違いが考えられる。

図-14 に各センサ位置を打撃点として、打撃点近傍に加速度センサを設置して測定した極低周波数帯域 (0~2000 Hz) の周波数応答関数を示す。各センサ位置の周波数応答関数を確認すると、クラスタリング結果が一致したセンサ位置 A1 と AG33 は、0~2000 Hz の周波数帯域において周波数応答関数が概ね一致している。また、センサ位置 Q17 と Q6 の周波数応答関数は比較的類似した傾向を示している。試験体の位置により周波数応答特性が異なることから、センサ位置が SOM のクラスタリングに影響を及ぼしていると考えられる。よって、試験体が異なる場合においても周波数応答特性が類似している場所に加速度センサを設置することで、同様のクラスタ

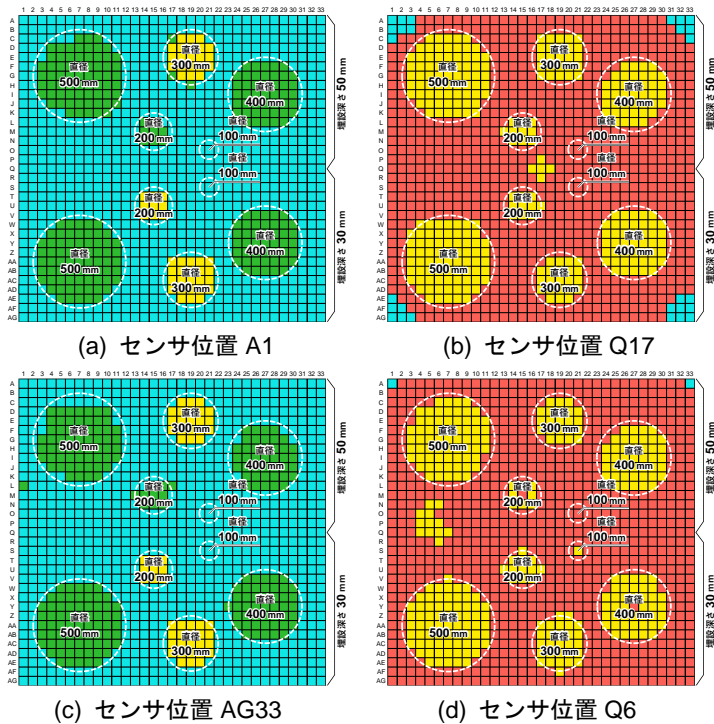


図-12 大型試験体 A のグレーディング結果

指標で内部欠陥の領域判定が可能であると推測される。なお、欠陥の有無を判定する場合には、図-12 に示したように、健全部と欠陥部ではクラスタが異なることから、欠陥領域の判定は可能である。

以上より、センサ位置を固定して、打撃点のみを移動させた打撃試験で取得した周波数応答関数を SOM に適用することで、本試験体の最も遠い格子点間距離である半径 2.2m の範囲内において、直径は最小で 200 mm、埋設深さは最大で 90 mm の欠陥まで、内部欠陥の領域判定が可能であった。

今後は、内部欠陥の領域判定だけでなく、欠陥の深さを含む内部欠陥の 3 次元評価に向け、特徴量との関連付けを行う予定である。

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) センサ位置を固定した打撃試験において得られる周波数応答関数は、打撃点の影響を強く受けることが明らかとなった。
- (2) センサ位置は周波数応答特性に影響を与えるが、打撃点の影響と比較してその影響は小さい。また、センサ位置によらず打撃点が欠陥部と健全部では周波数応答特性が異なり、打撃点が欠陥部の場合、打撃点が健全部の場合と比較して、周波数応答関数の正規化加速度は全周波数帯域において大きくなった。
- (3) 加速度センサを欠陥領域上に設置した場合には、センサ位置直下の欠陥の周波数応答特性が顕著に現れ、

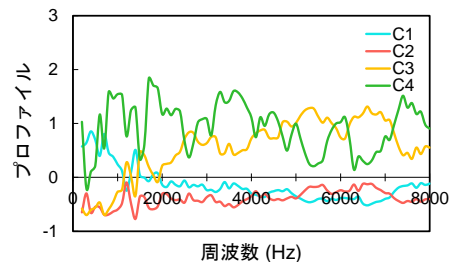


図-13 各クラスタのプロファイル
(大型試験体 A)

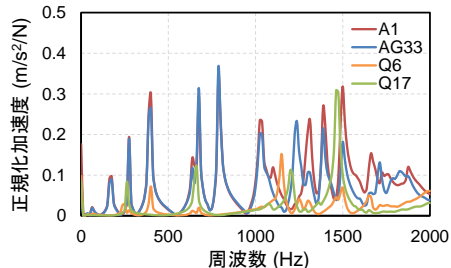


図-14 センサ位置の周波数応答関数
(大型試験体 A)

センサ位置以外の欠陥の検出感度が低下する。そのため、SOM による内部欠陥の領域判定においては、事前に加速度センサを設置する周辺部において打音検査を実施し、明らかに欠陥部である領域を避けて加速度センサを設置することが望ましい。

- (4) 本研究の範囲内においては、センサ位置を固定して、打撃点のみを移動させた打撃試験で取得した周波数応答関数を SOM に適用することで、打撃点と加速度センサ間の距離が半径 2.2 m 以内の範囲内において、直径は最小で 200 mm、埋設深さは最大で 90 mm の欠陥まで、内部欠陥の領域判定が可能であった。

謝辞 本研究は、(一財)新潟県建設技術センターの研究助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 野内彩可, 村上祐貴, 井山徹郎, 外山茂浩: 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の領域判定, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1879-1884, 2017.7
- 2) 野内彩可, 村上祐貴, 井山徹郎, 池田富士雄: 打撃による加振特性を考慮した周波数応答関数に基づくコンクリート内部の欠陥評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2133-2138, 2016.7
- 3) 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