

# 論文 塩害により劣化した RC 床版内部の腐食ひび割れ性状が打撃応答特性に及ぼす影響

木沢 敬太\*1・村上 祐貴\*2・井山 徹郎\*3・外山 茂浩\*4

**要旨:** 本研究では、モールドゲージを埋設し、電食により鉄筋を促進腐食させた RC 床版試験体を対象として、床版内部の腐食ひび割れ性状が打撃応答特性に及ぼす影響について検証した。その結果、鉄筋腐食に伴い、加振特性を考慮した周波数応答関数は、広範囲の周波数域で振幅が増大する傾向にあった。この周波数応答関数の変化に着目し、各打撃点において 100Hz 毎に算出した周波数応答関数グラフの面積について、健全時に対する比をとった時系列データを自己組織化マップ (SOM) に適用することで、試験体内部の腐食ひび割れ性状 (浮き, 剥離) を概ね推定可能であった。

**キーワード:** 非破壊検査, 打音法, 鉄筋腐食, RC 床版, 自己組織化マップ

## 1. はじめに

現在、積雪寒冷地域的高速道路において、凍結防止剤の散布により塩害劣化した道路橋 RC 床版が、舗装面におけるポットホール等の損傷を誘発し、道路管理上の問題の一つとなっている。

数ある RC 床版の非破壊検査手法の中で、打音法は点検の容易さ、費用、精度の面から現在最も用いられている検査手法である。これまで、この打音法に着目し、打撃により生じる音や表面振動を数値データとして解析することで、構造物内部の変状を定量評価しようとする試みが数多くなされている。既往の研究において、鎌田らは人工欠陥を埋設した RC 床版試験体に対してアスファルト舗装面から衝撃弾性波法を実施し、一般的な水平ひび割れ発生深さに位置する欠陥を周波数スペクトルのピークから検出可能であることを示すととも<sup>1)</sup>、深部の欠陥に対しては周波数スペクトルのパターン認識を援用した評価手法を提案している<sup>2)</sup>。また、川端ら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 (Self-Organizing Maps, 以下 SOM) を適用し、音圧の大きさや減衰性、周波数特性を総合的に考慮した診断手法を提案している<sup>3)</sup>。

一方、既往の打音点検における精度上の問題として、舗装面からの打音法では劣化が軽微な段階の浮きや、深さ 50mm 以上に位置し、かつ開口幅の小さな水平ひび割れは検出できない可能性が示唆されている<sup>4)</sup>。そこで著者らは、腐食劣化の進行に伴う打音特性の時間的な変化から床版の劣化程度を判定できるのではないかと考え、RC 床版試験体を対象とした促進腐食試験を行い、同一箇所における打撃応答の変化を捉えることで、鉄筋の腐

食劣化が打撃応答特性に及ぼす影響について検討した<sup>5)</sup>。

実験により、鉄筋腐食に伴い、打撃によって生じる振動加速度の時間軸波形振幅は増大し、また、周波数特性において 3kHz 以上の帯域の周波数振幅が顕著に増大する結果が得られたが、試験体内部の腐食ひび割れ性状との関連付け等が課題であった。

そこで本研究では、モールドゲージを埋設した RC 床版試験体を対象としてより長期の電食試験を行い、内部ひび割れ幅の測定を試みるとともに、同一箇所における打撃応答特性の詳細な変化を時系列に追うことで、床版内部の腐食ひび割れ性状が打撃応答特性に及ぼす影響について検証した。さらに、実験により得られた時系列の打音情報を入力データとした、SOM による欠陥判定手法について、検討を行った。

## 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 S0 は、長さおよび幅が 900mm、厚さ 180mm の小型 RC 床版試験体であり、主鉄筋、配力筋ともに D16 (SD295A) を用いた。また、試験体内部の腐食ひび割れ幅を測定するため、S0 試験体と同一寸法である、モールドゲージ (検長 50mm) を埋設した S1 試験体も別途作製した。図-2 に S1 試験体内部のモールドゲージ埋設位置を示す。モールドゲージは図-2 (b) に示すように、ゲージ中心が腐食対象とした上側主鉄筋の中心軸と一致する高さに埋設した。

なお両試験体とも、鉄筋露出部および試験体端部からコンクリート内部方向に 20mm の領域では、局所的な腐食を防止するため、ビニールテープを巻くことで防食し

\*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)

\*4 長岡工業高等専門学校 電子制御工学科准教授 博 (工)

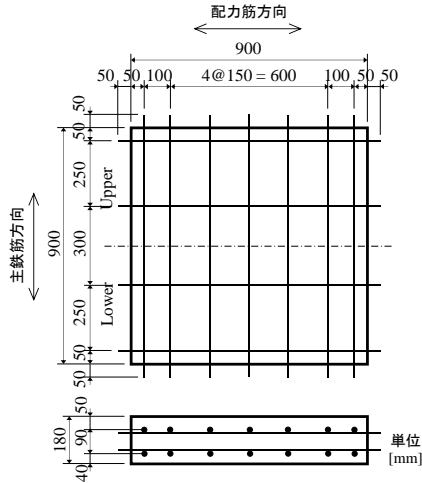


図-1 試験体概要 (S0, S1 共通)

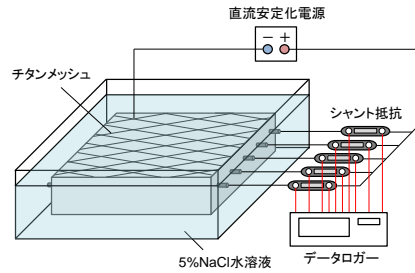


図-3 電食試験概要

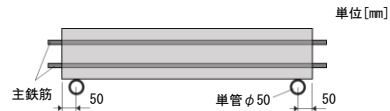
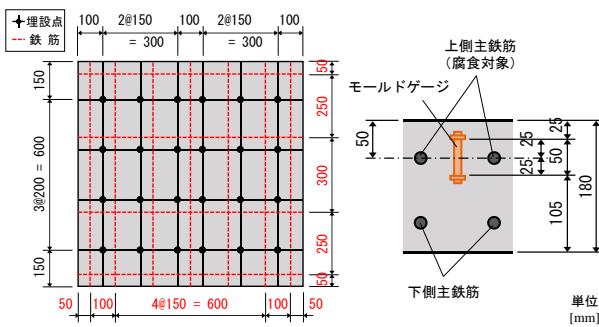


図-4 試験体の支持方法



(a) ゲージ埋設点 (b) ゲージ埋設深さ  
図-2 S1 試験体内部のモールドゲージ埋設位置

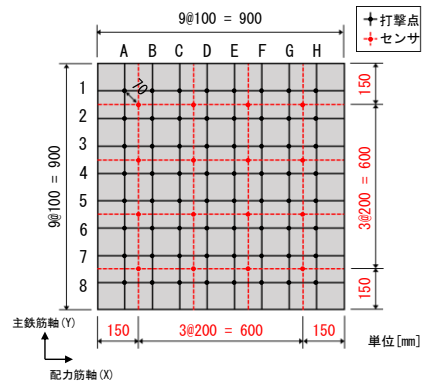


図-5 打撃点およびセンサ位置

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 <sup>3</sup> )				
				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

た。また、本実験では上側主鉄筋のみを腐食対象としており、配力筋には主鉄筋との接触部にビニールテープを巻き、絶縁処理を行った。

コンクリートの示方配合を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、打設後7日間湿布養生を行い、その後は気中養生とした。電食開始時における材齢および圧縮強度は、S0試験体が材齢56日で35.6N/mm<sup>2</sup>、S1試験体が材齢65日で37.3N/mm<sup>2</sup>であり、各試験体で圧縮強度に大きな差異は無かった。

## 2.2 電食試験方法

塩害による劣化過程を短期間に再現するため、鉄筋の腐食手法には、通電する直流電流密度で腐食を制御可能である電食試験法を採用した。電食試験は図-3に示すように、5%NaCl水溶液に浸漬した試験体に対して、上側主鉄筋を陽極、チタンメッシュを陰極として通電を行った。この際、腐食対象である上側主鉄筋の露出部には熱収縮チューブを装着することで防食した。

本研究では、打撃試験と以下に示す一定条件の通電を

繰返し行うことで、同一箇所における打撃応答特性の経時変化について検討することとした。1サイクル当たりの通電時間は42時間とし、直流電流を鉄筋1本当たり2.5mA/cm<sup>2</sup>の平均電流密度で通電する電食サイクルを、計11サイクル行った。各鉄筋に通電される電流量は、図-3にも示すようにシャント抵抗を介して計測を行っている。なお、各鉄筋の通電量に偏りが生じたため、S0試験体においては、11サイクル時における各鉄筋の積算電流量が約500hr・Aの一定となるよう調整を行った。さらにS1試験体においては、各サイクル終了時における通電量の偏りについても改善をするため、サイクル毎に所定の積算電流量になるよう通電する鉄筋を適宜変更し、調整を行った。

電食試験終了後、試験体から腐食対象鉄筋をはつり出し、10%濃度クエン酸ニアンモニウム溶液に24時間浸漬後、試験体端部から100mm区間毎に切断し、質量を計測した。この腐食後の鉄筋質量と事前に計測した単位長さあたりの鉄筋質量から、切断した区間毎の質量減少率(腐食率)を算出した。

## 2.3 打撃試験方法

打撃試験はインパルスハンマ(周波数範囲:0~8kHz, 測定範囲:2200N)を用いて試験体を加振し、生じた振動応答を加速度センサ(周波数範囲:2Hz~10kHz, 最大

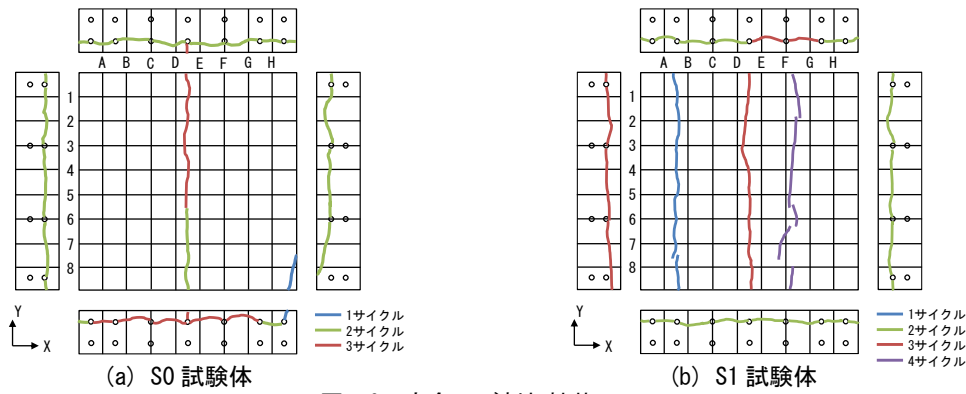


図-6 腐食ひび割れ性状

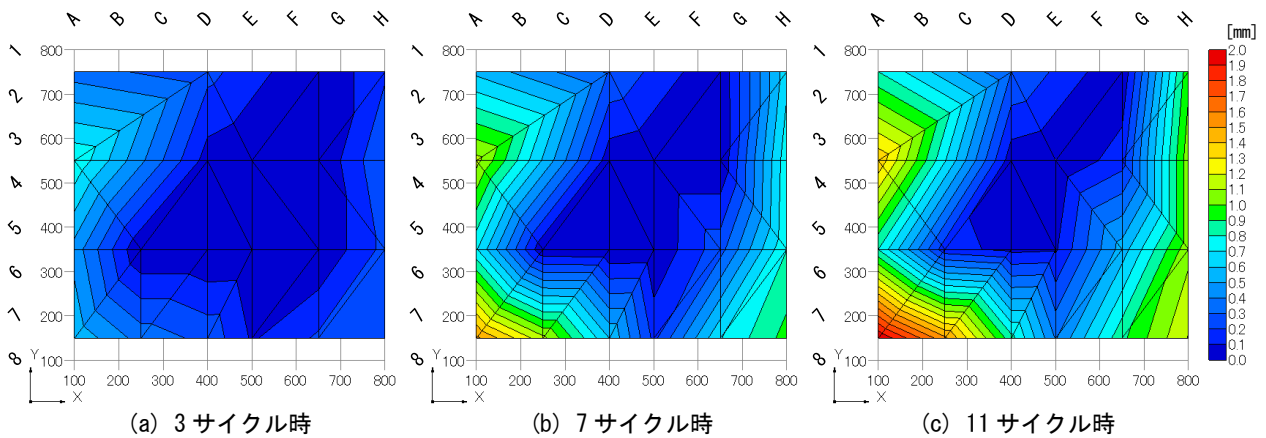


図-7 S1 試験体における内部ひび割れ幅の分布

使用加速度：700m/s<sup>2</sup>）により受信した。計測におけるサンプリング周波数は 25.6kHz，データ数は 2048 とし，5 回の打撃による平均を実験データとして採用した。

試験体は両端部から 50mm の位置で，配力筋軸方向に配置した直径 50mm，長さ 1000mm の単管パイプ上で鉛直支持した（図-4）。測定は，打撃 1 点に対し加速度センサの計測点を 1 点として行った。打撃入力位置は，図-5 に実線で示す 100mm 間隔メッシュの交点とし，センサ位置は破線で示す 200mm 間隔メッシュの交点かつ，打撃点との距離が 70mm となる位置に設置した。例えば打撃点 A1，A2，B1，B2 の 4 点に対するセンサ位置は同一である。これには，打撃点に対するセンサ位置が測定サイクル毎に変化しないよう固定する目的がある。

なお加速度センサは，厚さ 0.4mm の両面粘着テープを用いて試験体表面に密着させた状態で測定を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 腐食ひび割れ性状

図-6 に各試験体の腐食ひび割れ性状を示す。凡例はひび割れ発生時のサイクルを表している。S0 試験体においては 3 サイクル，S1 試験体においては 4 サイクル以降，既存のひび割れ幅が拡大するのみであり，新たなひび割れの発生は確認されなかった。11 サイクルの時点で，クラックスケールにより計測した試験体上面のひび割れ幅

は両試験体とも 0.1mm 程度であったが，側面の水平ひび割れは 2.0mm 程度まで拡大した。

図-7 に，S1 試験体に埋設したモールドゲージのひずみ値より算出した内部ひび割れ幅のコンター図を示す。ここで内部ひび割れ幅は，計測したひずみの値にゲージの検長（50mm）を乗ずることで求めている。図-7 より，ひび割れ幅はサイクル数の増加に従い，試験体端部において顕著に拡大していることが分かる。一方，試験体中央部のひび割れ幅はほぼ拡大していないことから，最終サイクルの時点で，水平ひび割れは試験体中央部まで進展していないことが推測される。

#### 3.2 鉄筋腐食率の分布

電食試験終了後，打撃点メッシュの 100mm 区間毎に算出した，各試験体における腐食対象鉄筋の質量減少率（腐食率）を表-2 に示す。これより，両試験体とも試験体端部に位置する鉄筋区間では，試験体中央部に比べ腐食率が高い傾向にあることが確認できる。これは S1 試験体について，図-7(c) の 11 サイクル時における内部ひび割れ幅が試験体端部において顕著に拡大している傾向とも一致する。しかしながら，図-7(c) の内部ひび割れ分布と表-2(b) の腐食率とを座標ごとに比較した場合，各々の分布は完全には一致しておらず，鉄筋の腐食傾向と試験体内部の腐食ひび割れ性状との間に，強固な対応関係は認められなかった。

表-2 腐食対象鉄筋の質量減少率(単位:%)

		鉄筋位置 X (mm)							
		50	150	300	450	600	750	850	
鉄筋区間 Y (mm)	800~900	44.8	44.5	34.4	36.3	30.2	23.7	21.3	40.0以上
	700~800	38.0	32.3	30.4	21.1	16.8	10.8	33.3	
	600~700	31.6	20.0	22.6	21.1	14.9	11.5	32.2	30.0-39.9
	500~600	29.1	12.8	16.2	20.4	10.6	8.4	26.3	
	400~500	28.5	12.5	16.0	27.5	14.4	11.5	25.3	20.0-29.9
	300~400	27.2	9.3	11.3	19.3	15.4	10.6	25.1	
	200~300	28.0	13.7	14.1	16.7	16.6	10.4	24.6	10.0-19.9
	100~200	26.0	15.1	17.7	22.1	21.4	13.9	31.3	
	0~100	27.4	24.2	31.9	34.1	35.2	29.0	43.8	10.0未満

3.3 周波数応答特性の経時変化

本研究では、周波数特性の経時変化に着目し、その評価を試みる。同一箇所における周波数特性の経時変化を見るためには、その測定時点において加振特性に依らない定常的な周波数応答特性を得る必要がある。そこで、本研究では周波数領域の評価に、振動加速度の出力スペクトルをインパルスハンマの加振スペクトルで正規化した、周波数応答関数を用いた。

一例として図-8に、両試験体の打撃点 A1 における健全時および最終サイクル時の周波数応答関数を示す。これより各試験体で変化に差異はあるものの、両試験体とも共通の傾向として、11 サイクル時の周波数応答関数は、健全時に比べ広い周波数域で振幅が増大していることが分かる。一方、S0 試験体においては S1 試験体と比較して、より低周波側まで周波数振幅の顕著な増大が認められるが、これは各試験体における腐食ひび割れ性状の違いが影響しているものと考えられる。

このような周波数振幅の増大傾向は他の打撃点においても確認されたため、各サイクルの同一打撃点において、0~8kHz の周波数応答関数で囲まれた領域の面積(以下、周波数応答面積)を算出し、健全時の周波数応答面積で正規化した周波数応答面積比を用いることで、周波数特性の経時的な変化度合を評価した。図-9に各試験体について、11 サイクル時における周波数応答面積比の打撃点毎の分布を示す。これより、両試験体とも試験体端部において周波数応答面積が著しく増大していることが確認できる。S1 試験体について、図-7(c)の11 サイクル時における内部ひび割れ幅の分布と比較した場合、コンター図左上側の領域については一部傾向が異なるものの、概ね良好な対応が認められた。また、S0 試験体においては、S1 試験体に比べ面積比が全体的に高めの値となっており、比較的内部まで水平ひび割れが進展していたことが予想される。表-2の質量減少率から、S0 試験体は、試験体中央部の腐食率が S1 試験体に比べて高い傾向にあることが分かる。

次に、各測定サイクルでの周波数応答関数の変化に着目し、S1 試験体の各打撃点における周波数応答面積比の推移を図-10に示す。これより、各打撃点で差異はある

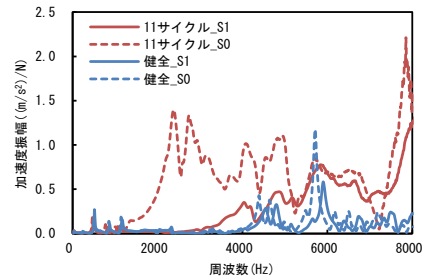


図-8 周波数応答関数の変化(打撃点 A1)

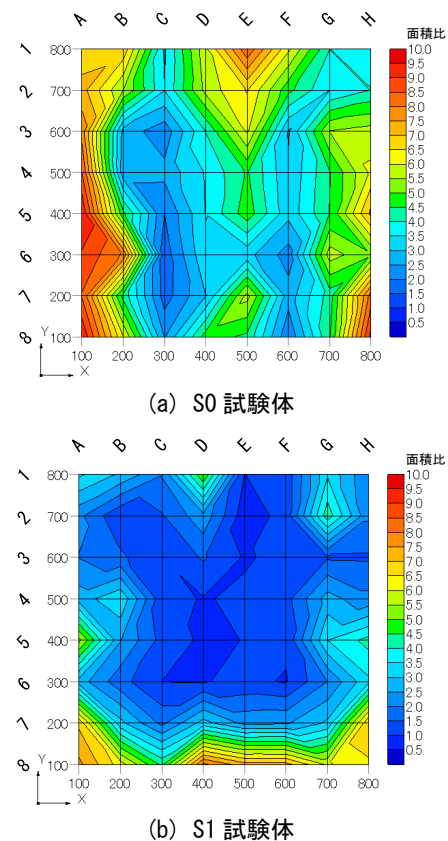


図-9 最終サイクル時の周波数応答面積比分布

ものの、全体としてサイクルを追うごとに面積比は増大していく傾向が認められた。しかし、A,B 列や C,D 列等においては比較的早期のサイクル時に急激に増大した面積比が、次のサイクルには減少していることが確認できる。これについては、図-7(a)の3 サイクル時における内部ひび割れ幅の分布より、A,B 列側にひび割れが発生

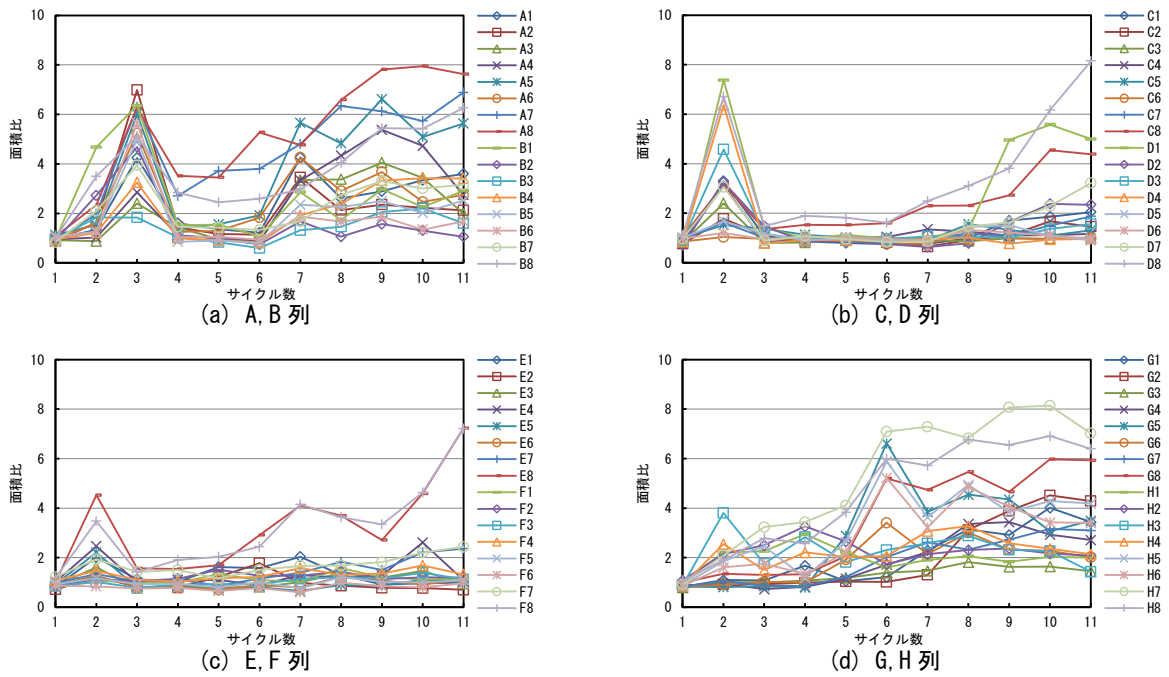


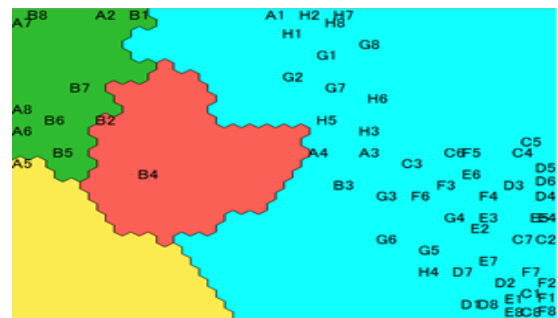
図-10 S1 試験体の各打撃点における周波数応答面積比の推移

していると予想されることから、早期に発生した微小ひび割れを検出できている可能性がある。次のサイクルで面積が減少している点については、発生した微小ひび割れ部へ堆積した腐食生成物により弾性振動が抑制されたことなどが考えられるが、確固たる理由は明らかとなっておらず、今後の課題である。

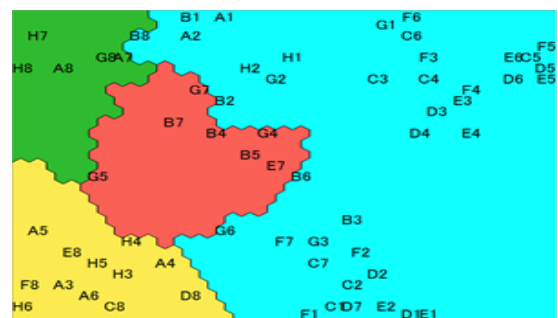
#### 4. 自己組織化マップを用いた欠陥判定手法の検討

前章において、周波数応答面積比の分布と内部の腐食ひび割れ性状との関連性は認められたが、完全な対応が認められるわけではなかった。その一因として、周波数応答関数の面積を用いた評価では、どの周波数域の変化が顕著であるかといった卓越周波数に関する情報が失われるため、欠陥判定に資する重要な特徴を見逃している可能性がある。そこで、各サイクルの各打撃点で得られた周波数応答関数を各周波数について網羅的に比較するため、本章では自己組織化マップを用いて、経時的に変化する周波数応答関数の波形パターンの分類を試みる。

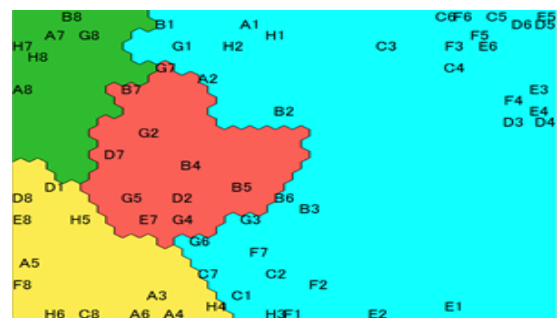
自己組織化マップ (SOM) とは、Kohonen によって提案された教師なし学習を行う階層型ニューラルネットワークの一種で<sup>6)</sup>、多次元データ間の類似性を 2 次元的に可視化することが可能である。この SOM を打音法による劣化診断に適用した例として、文献 3) において川端らは、打音検査により得られた音圧スペクトルに実効値比を乗じた入力データを用い、作成されたマップに劣化レベルが適切に反映されることを確認している。本研究では、実験により各打撃点で得られた時系列の周波数応答関数を入力データとすることで、発生する内部ひび割れ性状 (浮き, 剥離) を検出可能であるか検討を行った。



(a) 3 サイクル時の打撃点ラベル



(b) 7 サイクル時の打撃点ラベル



(c) 11 サイクル時の打撃点ラベル

図-11 S1 試験体の 3-7-11 サイクルを入力データとした SOM のクラスターマップ

入力データは、打撃試験で得られた周波数特性のばらつきを考慮するため、0~8kHzの周波数応答関数について100Hz毎に周波数応答面積を算出した80次元ベクトルのデータとし、さらに打撃位置による境界条件の違いが周波数特性に及ぼす影響も考慮し、各打撃点に対応する健全時の周波数応答面積で正規化した。SOMの作成には、Viscovery SOMine 7.0を使用し、ノード数は1000、テンション（近傍半径）は0.5とした。クラスタ手法は凝集性のあるクラスタを算出するSOM-Wardを用いた。

結果の一例として図-11に、S1試験体における3サイクルおよび7サイクル、11サイクル時のデータを一纏めに入力して作成されたSOMのクラスタマップを示す。マップにおいて、各打撃点データは六角型のノードに配置されており、類似した特性を有するノードの大まかなまとまりが、クラスタとして色分けされている。なお同図の(a)(b)(c)においては、作成されたクラスタマップ上に、各々のサイクルの打撃点ラベルのみを表示している。

図-11(a)の3サイクル時においては、大多数の打撃点が青のクラスタに配置され、いくつかの打撃点が緑のクラスタに配置されている。図-7(a)の内部ひび割れ幅の分布と比較した場合、ひび割れが発生しているA,B列側端部の打撃点が、この緑クラスタに集まっていた。図-11(b)の7サイクルにおいては、黄色クラスタ、赤クラスタにも打撃点が配置されている。これらの打撃点についても比較的試験体端部の領域が配置されており、図-7(b)の内部ひび割れの進展状況とも良好な対応が認められた。図-11(c)の11サイクルにおいても継続してこの傾向は確認されるが、青のクラスタに着目すると、各打撃点の配置がマップ右上側の領域と他のクラスタ近傍領域とに分断されていることが分かる。このマップ右上の領域には、図-7(c)において内部ひび割れが進展していない試験体中央部の打撃点が集中していた。その他の青クラスタ上の打撃点については、図-7(c)でひび割れ幅が拡大しており、それに伴いマップ上において欠陥部を有する他のクラスタの特性に近づいたことが分かる。

図-12に、各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、入力データとした各周波数帯における周波数応答面積の変化率について、分割した周波数帯ごとにマップ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。同図に示すように、青クラスタは全ての周波数帯でプロファイル値が低くなっており、周波数特性の変化の小さな健全クラスタであると推察される。その他のクラスタは特定の周波数帯で高いプロファイル値を示し、欠陥クラスタであると考えられるが、クラスタ毎に変化が顕著となる周波数帯は異なり、この差異が何に起因するのか、今後詳細な検討が必要である。しかしながら、周波数応答関数の経時変化に着目した時

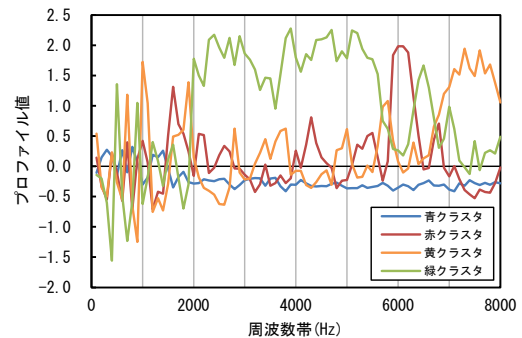


図-12 各クラスタのプロファイル

系列入力データを用いることで、自己組織化マップにより欠陥部と健全部とを大別することは可能であった。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 加振特性を考慮した周波数応答関数において、鉄筋腐食に伴い、広範囲の周波数域で振幅が増大する傾向が見られた。
- (2) 周波数応答関数の経時変化に着目した評価指標である周波数応答面積比と試験体内部の腐食ひび割れ性状との間には良好な対応が認められた。
- (3) 微小区間毎の周波数応答面積比の時系列データを網羅的に比較した自己組織化マップにより、試験体内部の欠陥と健全部とを判別することが可能であった。

## 参考文献

- 1) 中山和也, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 大西弘志: 衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの評価手法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2113-2118, 2009
- 2) 前裕史, 鎌田敏郎ほか: 周波数スペクトルのパターン認識を援用した衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの検出方法の改善, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2119-2124, 2009
- 3) 川端健太, 別府万寿博, 園田佳巨, 福井雄気: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1763-1768, 2011
- 4) 本荘清司, 藤原規雄, 葛目和宏, 牧博則: 凍結防止剤による塩害で劣化した鋼橋 RC 床版の詳細調査, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第11巻, pp.529-536, 2011.10
- 5) 木沢敬太, 井山徹郎ほか: 鉄筋腐食の進行による RC 床版の打撃応答特性の経時変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1867-1872, 2015
- 6) 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