

論文 自己組織化マップを用いた電磁波伝搬特性での内部ひび割れの検出に関する研究

多田 祐希*1・中村 光*2・三浦 泰人*3

要旨: 電食実験により 0.1~0.4mm 程度の内部ひび割れが入った供試体に対し、電磁波レーダによる電磁波伝搬特性の可視画像を評価し、内部ひび割れを可視画像から定量的に判断することが困難であることを確認した。次に、電磁波伝搬特性を自己組織化マップに適用するとともに入力データの検討を行い、埋設物がない健全なコンクリートの電磁波伝搬特性との関係性を共分散、積率相関係数で算出したデータを用いる手法を提案し有用性を検証した。その結果、提案した手法を用いれば、内部ひび割れの存在をクラスタ分割された分布で定量的に評価できることを確認した。また、鉄筋の腐食の有無についても確認できる可能性を示した。

キーワード: 非破壊検査, 電磁波レーダ, 自己組織化マップ, 内部ひび割れ, 鉄筋腐食

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の内部損傷評価を目的とした様々な非破壊検査手法^{例えば, 1), 2)}の開発が進められており、その一つとして電磁波レーダでの空洞(空隙)探査が挙げられる。電磁波レーダでの探査は対象範囲の直上を走査することで、コンクリート内部の状況を深さごとに物性の境界から得た電磁波の反射、反射強度を示した電磁波伝搬特性である電磁波反射波形から容易に得ることができる。しかしながら、損傷は人が画像から判断しており、損傷の視認性と確認を行う人に依存するため、評価が定量的ではない。より微細な損傷の検知をするとともに定量的な評価が課題となっており、他の検査手法^{2), 3), 4)}の定量評価で見られるような様々な評価指標、評価手法と組み合わせる必要がある。評価指標、評価手法については、打音波形における振幅値、縦波共振周波数など様々な物理量が利用されてきたが、近年は機械学習により欠陥の判定を評価することが検討され始めている。例えば、園田ら³⁾は打音検査において音圧の周波数スペクトルを入力データとし、自己組織化マップを用いることで欠陥と健全の判別可能な診断が行えることを、鈴木ら⁴⁾は園田らと同様の手法を用いて空洞を検出するだけでなく空洞情報もある程度把握することが可能であることを示している。

本研究では、空洞探査に用いられる電磁波レーダ法の可能性に着目し^{1), 2), 5)}、測定によって得られた電磁波反射波形を自己組織化マップに適用させ、0.1~0.4mm 程度の内部ひび割れの検出を試みた。検討はかぶり 60mm と比較的鉄筋位置が深い供試体での電食実験を行い、内部ひび割れを導入させた後、内部ひび割れを含む電磁波反射波形を取得し、一般的な確認に用いられる走査断面の

可視画像からの内部ひび割れの可視状態について確認した。次に、電磁波反射波形を入力データとして自己組織化マップへ適用することで、内部ひび割れを検出する可能性の検討を行った。さらに、入力データの検討として、埋設物がなく健全なコンクリートの電磁波反射波形との関係性を共分散、積率相関係数を指標として、自己組織化マップに用いることでの有用性を検証した。

2. 電食実験による腐食ひび割れと電磁波レーダの適用性

2.1 電食実験概要

供試体概要を図-1、実験概要を図-2に示す。本実験で用いる供試体の寸法は幅 500mm×長さ 1000mm×高さ 200mm で、その中心位置に D19 鉄筋をかぶり厚さ 60mm で一本配置した。なお、錆汁が鉄筋を伝って供試体外部に流出することを防ぐために、鉄筋全体がコンクリート

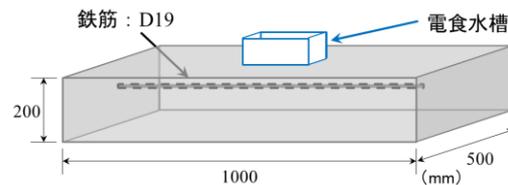


図-1 供試体概要図

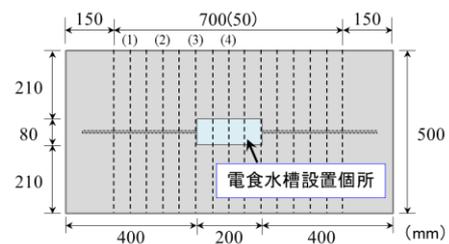


図-2 実験概要図

*1 技建開発株式会社 計測技術課 (正会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博士(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 助教 博士(工) (正会員)

中に埋設されるようにした。また、埋設した鉄筋を一樣に腐食させるのではなく部分腐食⁶⁾させるために、鉄筋中央部の直上に長さ 200mm、幅 80mm の水槽を設置した。今回の供試体の幅と腐食方法を採用した理由は、既往の研究から側方の距離が短いと内部のひび割れ進展は側方境界の影響を受けるため、その影響を少なくするためである⁷⁾。また、部分腐食試験を行った理由は、部分腐食をすると腐食量が多い中央部は鉛直ひび割れと水平ひび割れとなるが、腐食量が少なくなるにつれ内部ひび割れは供試体表面方向に傾いていくという報告⁶⁾から、内部ひび割れの長さや角度などの形状変化についても提案方法で評価できるかを確認するためである。

電食試験は、水槽内に 3%NaCl 水溶液と銅板を入れ、銅板および鉄筋が直流電源装置を介して直列回路となるように接続した。電流密度は電食水槽設置区間の鉄筋表面積から 838 μ A/cm² とし、腐食による鉄筋の質量減少量を式(1)⁸⁾で示すファラデーの法則より想定した。

$$\Delta m = \eta \frac{ItM}{nF} \quad (1)$$

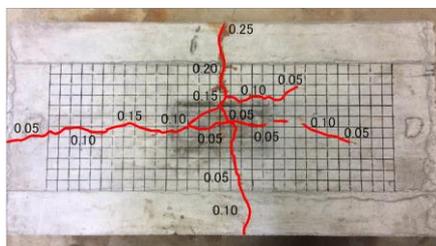
ここで、 Δm : 鉄筋の質量減少量(g), I : 電流(A), t : 通電時間(s), M : 鉄の原子量, n : 鉄の価数, F : ファラデー定数, η : 気中とコンクリート中の腐食進展の相違を表す係数(本論文では 0.4 とした)である。

想定される鉄筋の質量減少率が 10% となるまで通電を行った。電磁波レーダによる測定が終了した後に、図-2 の 50mm 間隔の鉄筋軸直交方向の破線位置部で供試体を湿式コンクリートカッターにより切断し、内部のひび割れ性状を確認した。その際、ひび割れ幅をクラックゲージで測定した。また、鉄筋をはつり出し 10%クエン酸アンモニウム水溶液に浸漬させて腐食生成物を除去した後、質量の測定を行い質量減少率の算出し、これを実腐食率とした。

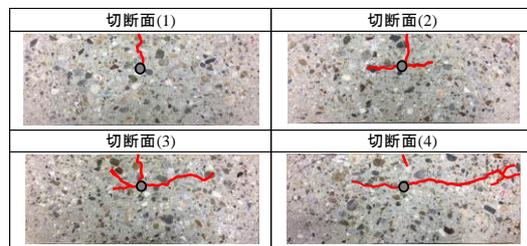
2.2 電食実験結果

図-3(a)に表面ひび割れ分布を示す。ひび割れ幅はクラックゲージで測定を行い、ひび割れ幅は最大で 0.25mm であった。鉄筋軸方向のひび割れ幅は、埋設した鉄筋の直上に広い範囲で見られ、水槽設置箇所から離れるにつれ小さくなっている。鉄筋軸直交方向のひび割れ幅は、供試体中央に縦断するように見られ、水槽から離れるにつれ大きくなっている状態であった。

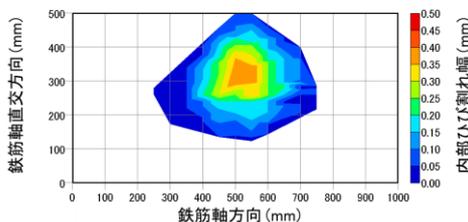
図-3(b)に内部ひび割れ性状を示す。図中に示す切断面は、図-2 中破線で供試体を切断した(1)~(4)である。切断面(1)は鉄筋軸方向に水槽端から 200mm の離れた位置で、鉄筋と表面が繋がる縦のひび割れを確認した。しかしながら、横方向または表面に向かっての斜め方向のひび割れについては確認できなかった。切断面(2)は鉄筋軸方向に水槽端から 100mm の離れた位置で、鉄筋と表



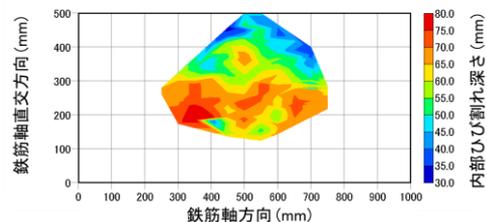
(a) 表面ひび割れ分布



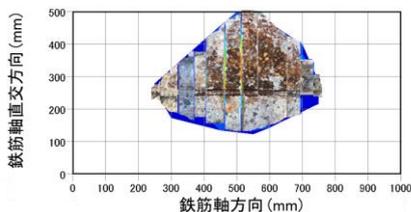
(b) 内部ひび割れ性状



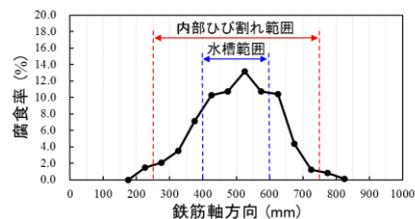
(c) 内部ひび割れ幅平面分布



(d) 内部ひび割れ深さ平面分布



(e) 内部ひび割れ面の状態



(f) 実腐食率分布

図-3 電食実験結果

面が繋がる縦のひび割れを確認するとともに、鉄筋から左右横に伸びるひび割れを確認した。切断面(3)は鉄筋軸方向で水槽端の位置である。切断面(1), (2)と同様に鉄筋と表面が繋がる縦のひび割れを確認した。また、鉄筋から横、斜めに伸びるひび割れを確認した。さらに、鉄筋右のひび割れは鉄筋から少し離れた位置から徐々に表面に向かうよう傾斜がついたひび割れであった。切断面(4)は鉄筋軸方向で供試体中央の位置である。図-3(a)でも表面ひび割れは確認しているが、縦のひび割れは表層付近のみであった。横に伸びるひび割れは、切断面(3)より離れた位置まで比較的横方向へ伸びた後、表面に向かい傾斜をつけたひび割れであった。なお、ひび割れは表面に到達する前に供試体側面に到達していることが切断面(4)から分かる。

図-3(c)に内部ひび割れ幅の平面分布を示す。図は、図-2中の破線で示す供試体の各切断面で、内部ひび割れ幅をクラックゲージで測定し平面状にコンター図としたものである。ひび割れ幅は最大で0.4mmであり、水槽直下の鉄筋から離れるにつれ小さくなる。ひび割れ分布の範囲は、鉄筋軸直交方向では約380mmの広さ、鉄筋軸方向では約500mmの広さであり、概ね水槽設置位置を中心に広がっている。

図-3(d)に内部ひび割れ深さの平面分布を示す。図は、図-2中の破線で示す供試体の各切断面で、表面から内部ひび割れまでの幅を定規で測定し平面状にコンター図としたものである。最も深い場所では約80mmで、鉄筋かぶりより深い方への進展が見られた。最も浅い場所では約30mmであった。内部ひび割れが見られた深さの範囲は、鉄筋かぶりから上下に20~30mmの範囲に広がっていることが確認できた。また、鉄筋軸直交方向250~500mmの範囲については内部ひび割れがお椀のような深さ分布であることも確認できた。

図-3(e)に内部ひび割れ面の状態を示す。図は、図-2中の破線間で示す各切断した供試体で、内部ひび割れ

の供試体裏面側のひび割れ面を撮影し結合したものである。ひび割れに滲入した錆を見ると、図-3(c)中でひび割れ幅が0.2mm以上の範囲に多く堆積していることが確認でき、ひび割れ幅0.2mm未満であっても錆の堆積が見られた。なお、図-3(e)鉄筋軸方向500~550mmの区間については、ひび割れが供試体側面に到達し内部から錆の流出を確認した。しかしながら、図-3(e)鉄筋軸方向250~350mm, 700~750mmの範囲については、錆の滲入は見られなかった。また、鉄筋軸直交方向120~240mmの範囲についても錆の堆積は見られなかった。錆の滲入が一方に集中した要因は、今後明確にしていなければならない。

図-3(f)に実腐食率の分布を示す。腐食率は、最大で13.1%、水槽直下で11.1%の腐食率となり、想定に近い腐食状態を再現した。水槽から離れるにつれ腐食量は急激に小さくなり、水槽端から200mm程度離ればほぼ腐食していない状態であった。

2.3 電磁波レーダでの測定および結果

測定で使用した電磁波レーダの仕様を表-1に示す。電磁波レーダでの測定は電食実験前後の未腐食の状態と10%の腐食劣化した状態について行い、図-4に示す幅300mm×長さ800mmの測定範囲を鉄筋軸直交方向に25mmの間隔で走査して行った。なお、測定時の供試体内の水分影響を小さくするため、電食前は供試体の養生終了後から、電食後は10%の電食終了後から、屋内で3週間の自然乾燥を行った後で測定を行った。

図-5に電食実験後の状態を切断面(1)、切断面(4)を用いて確認を行った結果を示す。図中の電磁波レーダでの測定によって得られた可視画像は、電磁波レーダのコンクリートの比誘電率の設定値を6とした場合である。画像は縦軸に深度、横軸に走査距離として、白黒の濃淡によって電磁波レーダ出力の反応強度を反応値として可視化している。画像中では鉄筋、錆はコンクリートより比誘電率が高く正の反応値、白色で表現され、空洞、ひ

表-1 電磁波レーダ仕様

測定深度	2~300mm
アンテナ中心の周波数	2.6GHz (2600MHz)
並行方向輻射間隔	ノーマル測定 2.5mm/高密度測定 1.25mm
推奨水平分解能力	かぶり：ピッチ=1：0.14以上

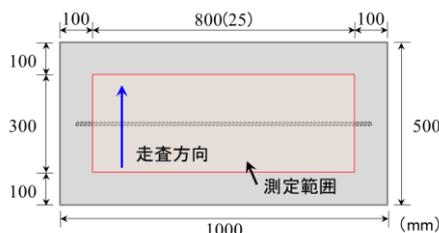


図-4 測定概要図

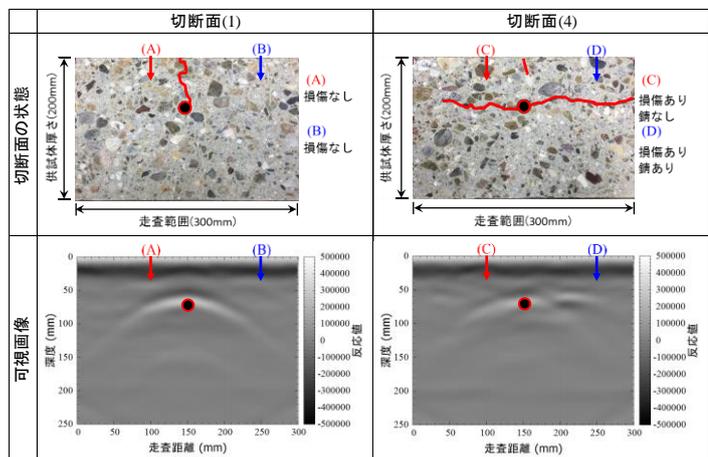


図-5 電磁波レーダでの測定結果

び割れはコンクリートより比誘電率が低く負の反応値、黒色として表現している。

切断面(1)は、腐食によって縦方向のひび割れは確認したが、鉄筋から(A)、(B)地点を含む横方向へのひび割れは確認できない。可視画像では鉄筋による反応を示す白い層が確認できるが、縦ひび割れを示す特異な黒い層は確認できなかった。これは、電磁波が比誘電率の異なる物性との境界面で反射し受信することで違いを表現しているため、縦ひび割れを表現するに至らなかったと考えられる。

切断面(4)は表層に縦方向のひび割れが見られるが、切断面(1)と同様に可視画像では確認できなかった。次に、鉄筋から横方向へ伸びるひび割れについて確認すると、(C)側については幅 0.2mm 以下、錆の堆積が見られない状態のひび割れであるが、可視画像ではひび割れを示す特異な黒い層は確認できなかった。

また、(D)側については、可視画像の鉄筋から(D)地点までの 0.4~0.3mm のひび割れには錆の堆積があり、可視画像を確認すると特異な白い層が確認できる。これは、ひび割れ内に堆積した錆の量が多くその反応を捉えたことが言え⁹⁾、ひび割れ検出によるものではない。さらに可視画像の(D)地点から右の範囲には 0.3~0.2mm のひび割れ幅に少量の錆が堆積している状態であるが、鉄筋、錆、空洞、ひび割れを示すような特異な反応は確認できなかった。

これらの結果から、ひび割れ内部に錆が多く堆積しているような状態であれば可視画像からの確認は限定的に可能ではあるが、0.3mm 未満のひび割れを可視画像から目視で認識し、内部ひび割れが疑われる範囲を特定することは困難であることを確認した。また、経験者が可視画像の判断を行い、評価や検討を行えば上記のような考察が可能な場合もある。しかしながら、多くの場合は

可視画像での変化が微小で定量的に同一の判断をすることが困難と言える。

3. 自己組織化マップ (SOM)

3.1 アルゴリズム

自己組織化マップ (Self-Organizing Maps, 以下 SOM) 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¹⁰⁾。SOM は階層型ニューラルネットワークの一つであり、多次元データの類似性を 2 次元データに可視化する手法である。

本研究では、Viscovery SOMine 7.0 を用いて SOM を作成した。鈴木ら⁴⁾のパラメータ設定を参考に、ノード数 1000、テンション (近傍半径) 0.5、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。トレーニングスケジュールはクラスタリングの精度を重視し Accurate に設定した。また、SOM マップ生成時の縦横比についても、入力データが最適にクラスタリングされた二次元データに処理されることを優先するため自動に設定した。

3.2 電磁波反射波形の入力

SOM の適用により、電磁波反射波形を用いた評価の可能性について確認を行った。確認には電食実験前の腐食率 0%の状態と電食実験後の腐食率 11.1%の状態の測定データを入力データとして用意した。また、入力データに適用する電磁波反射波形のデータ範囲は、それぞれ表面 0mm から鉄筋かぶりと鉄筋を含む深度 80mm までを対象とした 1mm ピッチの 81 次元と、供試体厚さである 200mm までを対象とした 1mm ピッチ 201 次元の 2 種類を用いた。

3.3 電磁波反射波形の入力による SOM 評価

クラスタリングは入力データの類似性に基づいて行われる。類似性の高いデータがより近い距離に配置され

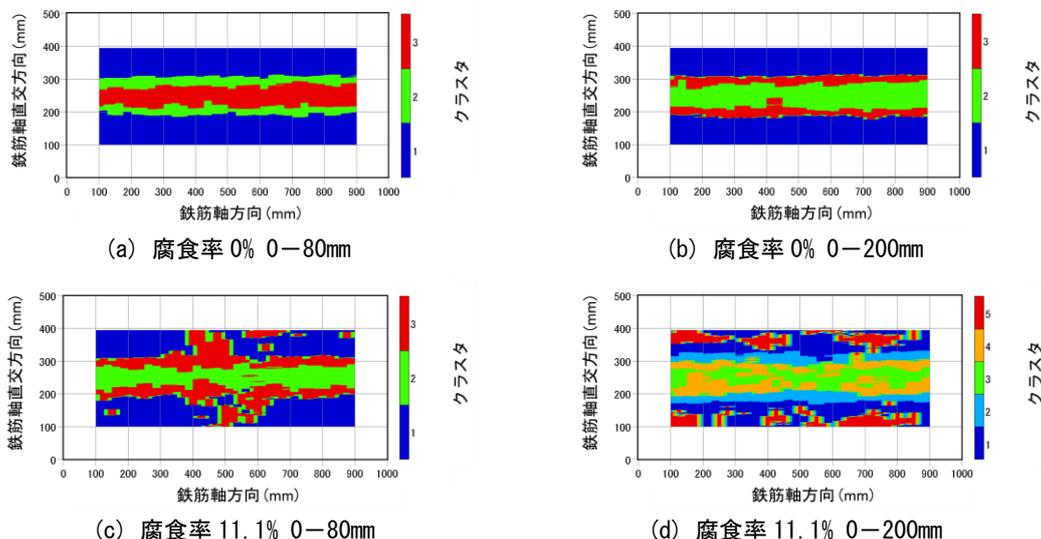


図-6 電磁波反射波形の入力による SOM 評価

ることデータ群が形成され、クラスタ分割が行われている。なお、結果については SOM によって得られたクラスタごとの番号を測定平面の位置ごとに反映させたものである。また、クラスタの分割数の違い、色の振分けの違いは、SOM が自動的に決定したクラスタ番号に従い、評価は各クラスタの分布の様子を対象としている。

図-6 に電磁波反射波形の入力による SOM 評価結果を示す。図-6(a)、図-6(b)は腐食前の状態を入力データとした結果である。深度の範囲に関わらず鉄筋軸に沿うように同じクラスタの分布が確認でき、コンクリートのみ範囲についても同じクラスタで分類されていることから、類似性を持つ位置とクラスタ分類が一致していることが分かる。

図-6(c)、図-6(d)は腐食後の状態を入力データとした結果である。図-6(c)では、鉄筋軸方向 350~650mm の鉄筋位置から離れた範囲にひび割れを検出したような分布が確認できる。しかしながら、鉄筋近傍と同じクラスタとして判断され、内部ひび割れの範囲を認識するに十分とは言えない。図-6(d)では、鉄筋位置を認識できるようなクラスタの分類は確認することができるが、内部ひび割れを示すようなクラスタは確認することができなかった。

これらの結果から、測定対象に合わせ深度範囲に限定することによって内部ひび割れを検出する傾向は得られたが、入力データの深度範囲を広げることで類似する要素も増え、分割されにくくなったと考えられる。実構造物では鉄筋かぶりは様々であるため、実用的側面を考えれば、可能な限り深度範囲を限定することなく内部の損傷を含む範囲をクラスタ分割することが望まれるため、入力データの検討を提案する。

4. 入力データ検討による内部ひび割れ検出の検証

4.1 電磁波反射波形を用いた入力データの検討

SOM への入力データの検討として、埋設物の有無、損傷の有無などによるコンクリート中の状態の違いに着目し、これらがコンクリートを基準に加算された情報であり電磁波反射波形に影響を与えていると考えた。そこで、埋設物がない健全なコンクリートの電磁波反射波形データと測定地点の電磁波反射波形データといった二

つのデータの関係性を数値化したものを SOM への入力データに適用させることを提案し、内部ひび割れ検出と内部ひび割れの範囲を視覚的に捉えられるようなクラスタ分割を試みた。二つのデータの関係性を評価する指標として共分散と積率相関係数を採用し、共分散は(2)式、積率相関係数は(3)式にて算出した。

$$S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2)$$

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

ここで、 S_{xy} : 共分散、 r_{xy} : 積率相関係数、 n : データ総数、 (x_i, y_i) : i 番目のデータ、 (\bar{x}, \bar{y}) : データの平均である。

図-7 に提案する入力データの概要を示す。電磁波レーダでの測定によって得られた埋設物がない健全なコンクリートの電磁波反射波形データ、測定地点の電磁波反射波形のデータをそれぞれフーリエ変換したパワースペクトルデータを作成する。電磁波反射波形データ、パワースペクトルデータそれぞれで共分散と積率相関係数を算出する。得られた四つのデータを4次元の入力データとして作成した。埋設物なし健全なコンクリートのデータについては、電食実験に用いた供試体と同じ配合の幅 600mm×長さ 600mm×高さ 200mm の供試体を作成し、その中央で取得した電磁波反射波形を用いた。電磁波レーダでの測定についても同条件にて行った。対象とするデータの範囲は深度 0~200mm とした。

4.2 提案した入力データによる SOM 評価

図-8 に前節で提案した入力データによる SOM 評価

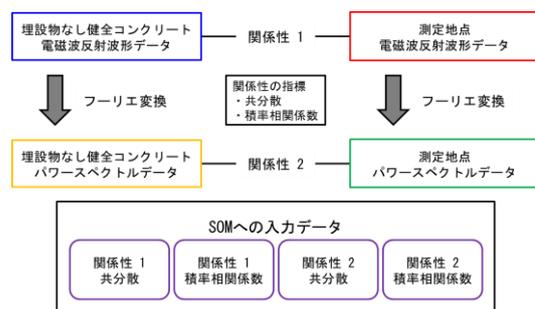
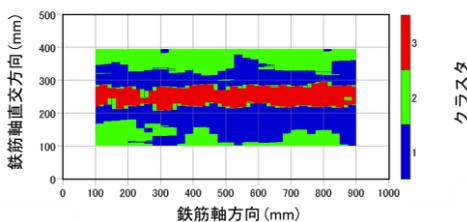
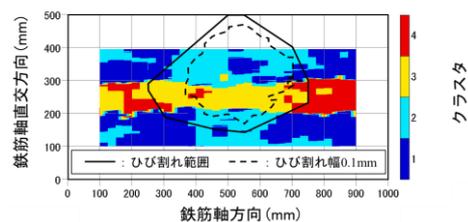


図-7 提案する入力データの概要



(a) 腐食率 0% 0-200mm



(b) 腐食率 11.1% 0-200mm

図-8 提案した入力データによる SOM 評価

を示す。図-8(a)は腐食前の状態を測定対象のデータとして入力データを作成し SOM 評価した結果である。クラスタ3の分布が鉄筋位置を示すように現れていることが確認できる。コンクリートの範囲については二つのクラスタで分類されているが、鉄筋周辺にクラスタ1、その外側にクラスタ2が分布されている。図-6(b)と分類範囲は異なるが、入力データによって分類の違いが現れることが確認でき、鉄筋のようにコンクリート中の特異な情報は明確に分類されていることが確認できた。

図-8(b)は腐食後の状態を入力データとした結果である。まず、鉄筋位置を示すようにクラスタ3、4の分布が確認できた。クラスタ3に着目すると、図中の範囲は図-3(f)の鉄筋が腐食した範囲に集中していることから、鉄筋に対し何らかの変化があった範囲として関係が考えられ、鉄筋の腐食の有無を判断できる可能性があることを確認できた。ただし、鉄筋軸方向100mmの位置近傍にある同クラスタの分布については、鉄筋は腐食しておらず、腐食以外の要素による影響も示唆される。今後、鉄筋近傍や周囲の状況による影響などを検討し、入力データの改良など分類精度の向上を図る必要がある。

鉄筋位置から離れた範囲にはクラスタ1、2の分布が確認できる。また、クラスタ2と3は繋がるように分布の広がりが見られる。図-8(b)に図-3(c)で確認したひび割れ範囲を実線、ひび割れ幅0.1mmの範囲を点線で示しているが、図-3(c)で確認されたひび割れ平面分布と比較すると、概ねひび割れ幅0.1mm以上の範囲を検出していることが確認できる。ひび割れ範囲以外にもクラスタ2は分布しているが、その位置ではひび割れ以外に入力値に類似性を与える要因が考えられ、今後要因の検討をしていく必要がある。

これらの結果から、入力データを検討し SOM を適用することによって、0.1~0.4mm程度の微細な内部ひび割れが電磁波レーダの可視画像の個別の判断ではなく、定量的な判断に基づいて検出可能であることを確認した。

5. まとめ

本研究で得られた結果の要約を以下に示す。

- (1) 今回対象とした供試体に対して、電磁波レーダの測定によって得られた可視画像から0.3mm程度のひび割れを定量的に認識し、損傷範囲を特定することは困難であることを確認した。
- (2) 電磁波レーダにより得られる電磁波反射波形に SOM を適用させることで、内部ひび割れの損傷を検出する可能性を確認した。
- (3) SOM への入力データの検討を行い、埋設物がない健全なコンクリートの電磁波反射波形を基準として、

測定対象から得た電磁波反射波形との関係性を算出し、得られた結果を用いて内部ひび割れの検出することを提案した。その結果、内部ひび割れを検出し、範囲を視認できるような分布が得られることを確認した。また、鉄筋の腐食の有無を判断できる可能性も示された。

- (4) 本手法による結果から、今回対象とした供試体に対して、0.1~0.4mm程度のひび割れを検出可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'13[基礎編], 2013.2
- 2) 鎌田敏郎, 内田慎哉：コンクリート構造物の診断における非破壊検査の適用の現状と今後の展望, 物理探査, 第60巻, 第3号, pp.253-263, 2007.6
- 3) 園田佳巨, 川端健太, 別府万寿博, 福井雄気：打音データを用いたコンクリート内部欠陥の評価に関する基礎的考察, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.802-811, 2011.3
- 4) 鈴木理絵, 中村光, 三浦泰人, 多田祐希：自己組織化マップによる打音データの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
- 5) 榊田佳寛, 森濱和正, 濱崎仁：電磁波レーダ及び電磁誘導による鉄筋探査の日本非破壊検査協会規格の制定, コンクリート工学, Vol.49, No.4, pp.15-21, 2011.4
- 6) D. Qiao, H. Nakamura, Y. Yamamoto, T. Miura: Crack patterns of concrete with a single rebar subjected to non-uniform and localized corrosion, Construction and Building Materials, Vol. 116, pp. 366-377, 2016.7
- 7) D. Qiao, H. Nakamura, Y. Yamamoto, T. Miura: Geometric parameters relating corrosion penetration to surface crack width, Proceedings of JCI Annual Convention, Vol.38, No.1, pp.1143-1148, 2016.7
- 8) D. Qiao, H. Nakamura, Y. Yamamoto, T. Miura: Modeling the electric corrosion of rebar in concrete considering electro-mechanical coupling, CONCREEP10, pp.358-367, 2015.9
- 9) 多田祐希, 三浦泰人, 中村光：電磁波レーダを用いた鉄筋腐食に伴う内部ひび割れの検出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.1771-1776, 2017.7
- 10) T. Kohonen：自己組織化マップ, シュプリンガー・ジャパン, 2005