

論文 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

多田 祐希*1・三浦 泰人*2・中村 光*3

要旨：本研究は、コンクリートの比誘電率と異なる物体をコンクリート中に埋設して電磁波レーダによって電磁波伝搬特性を評価した。その結果、コンクリートより大きい比誘電率を有する錆の存在位置を電磁波レーダによって検出可能であることを確認した。この実験結果を基に、鉄筋腐食により生じる内部ひび割れに錆が滲入することを踏まえて、電磁波レーダによって錆の存在を可視化することで、間接的に内部ひび割れの位置情報を取得可能な手法を提案した。さらに、電食試験により生じさせた内部ひび割れ分布と比較することで、本提案手法の妥当性を検証した。

キーワード：電磁波レーダ、比誘電率、差分抽出、含水状態、内部ひび割れ、鉄筋腐食

1. はじめに

近年、高度経済成長期に整備されたトンネルや橋梁などのコンクリート構造物において、鉄筋腐食に起因した内部ひび割れによるコンクリート片の落下事例が多数報告されている。鉄筋腐食によるひび割れは、かぶりや鉄筋間隔などの諸元によっては、内部ひび割れが進展しやすくなり、外観にあらわれる損傷以上に内部の損傷が著しい場合がある^{1), 2)}。コンクリート片の落下リスクを減らすためにも、コンクリート構造物内部に水平方向に生じるひび割れといった内部損傷を評価可能な手法が求められており、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^例例えば、3), 4)の開発が進められている。

本研究では、鉄筋腐食によって生じる内部ひび割れ中では錆が滲入することから、その錆の存在を検出することで間接的に内部ひび割れを検出することを考え、電磁波レーダ法^{3), 4), 5)}の可能性に着目した。すなわち、錆による電磁波伝搬特性を検出することで、間接的に内部ひび割れの位置情報の推定を試みた。これを実証するために次の実験的検討を行った。まず、コンクリート中に埋設した錆を含む比誘電率の異なる種々の物質の電磁波伝搬特性に及ぼす影響とコンクリートの含水状態が電磁波伝搬特性に及ぼす影響を評価した。これらの実験結果から錆の電磁波伝搬特性を把握した上で、電食試験を行い鉄筋腐食前後の電磁波伝搬特性を

取得した。その腐食前後の波形データの差分を取ることで、錆の影響を抽出する手法（以下、差分抽出）を提案し、その妥当性を検証した。

2. 比誘電率の異なる埋設物の電磁波伝搬特性の評価

2.1 実験概要

比誘電率の異なる埋設物に対する電磁波伝搬特性の特徴を確認する実験を行った。本実験で使用した電磁波レーダの仕様を表-1に示す。本実験で用いる供試体概要を図-1に示す。寸法は幅600mm×長さ600mm×高さ200mmで、上面中央部の深さ50mmの位置に3種類の埋設物を設置した。供試体は各1体ずつ作製し、図-1に示す所定の位置に針金を用いて埋設物を固定した。測定結果への針金の影響を小さくするため、針金は埋設物に対し下面側に設置し、プラスチック板と

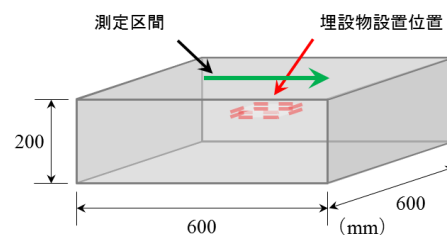


図-1 供試体概要

表-2 埋設物概要

埋設物	鉄筋	プラスチック板	錆
大きさ	D19 100mm	100×100×10mm	60×60×5mm
比誘電率	∞	2.2	
参考画像			

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
推定水平分解能力	かぶり：ピッチ=1：0.14以上

*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 助教 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 教授 博士(工) (正会員)

錆は固定に使用した 2 本の針金の間隔を埋設物寸法の対し最大限広げ設置した。測定箇所は供試体内の埋設物直上を、鉄筋は鉄筋軸に対し直交方向、プラスチック板と錆は 2 本の針金の中央を並行方向に各測定箇所ですら 1 回測定を行い結果とした。

埋設物概要を表-2 に示す。比誘電率の異なる物質の電磁波伝搬特性を評価することを目的として鉄筋、プラスチック板、錆の 3 種類の埋設物を用意した。コンクリートの比誘電率 6~10 に対して、プラスチック板は 2.2 と小さく、鉄筋は∞と非常に大きいものである。錆の比誘電率は特定できなかったため、これらの物質の間にあるものと仮定して議論を進める。なお、錆は、鉄筋の電食試験を行って生じた錆を収集し乾燥させることで作製した。鉄筋は、長さ 100mm の D19 鉄筋を所定の位置に埋設した。プラスチック板は、100×100mm の正方形のポリプロピレン製の板を厚さ 10mm に成形し、打設中の型崩れの防止と針金への固定のため、プラスチック板の端部をビニルテープ（厚さ：0.2mm、比誘電率：3~5）で固定し埋設した。錆は、打設中の拡散を防止するため、ラップフィルム（厚さ：0.01mm、比誘電率：2~3）によって包装した後、厚さ 5mm で 60×60mm の正方形に成形して埋設した。プラスチック板に用いたビニルテープは比誘電率がプラスチック板と同様にコンクリートに比べ小さく、ビニルテープの占める割合は少ないため、測定結果への影響は小さいと考えられる。錆を包装したラップフィルムは比誘電率がコンクリートに比べ小さいものの、フィルム厚が極めて薄いことから測定結果への影響は小さいものと考えられる。

2.2 実験結果および考察

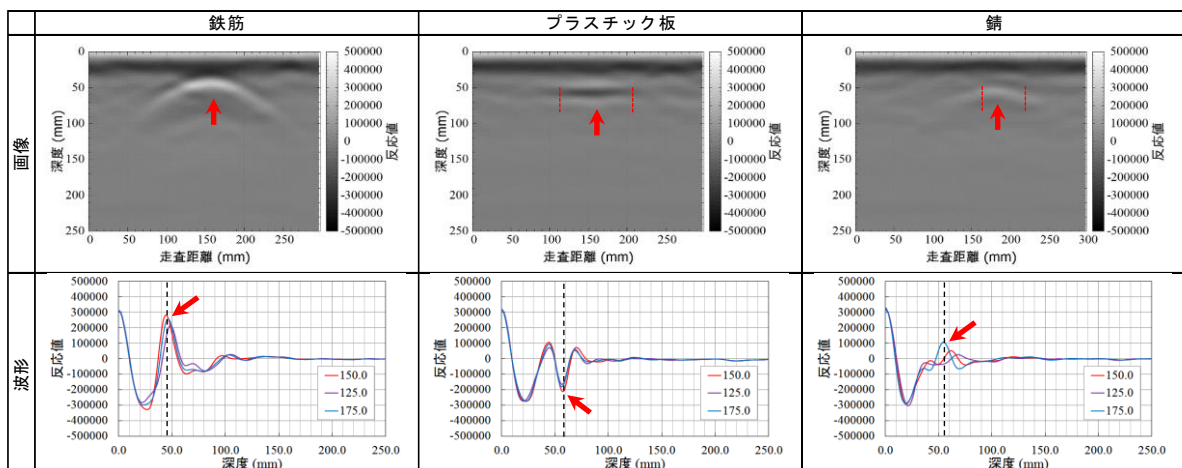
表-3 に電磁波レーダにより測定したコンクリート中のそれぞれの埋設物の電磁波波形の変化を示す。いずれの画像、波形も電磁波レーダのコンクリートの比誘電率の設定値を 6 とした場合の結果である。可視画像

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おり、電磁波波形は縦軸に反応値、横軸に深度を示している。また、電磁波波形の極大値と極小値（表-3 中赤矢印位置）は、コンクリートと埋設物との境界を表しており、その時の深度から物質の位置情報を評価する。なお、波形は埋設物の設置位置の中心である走査距離 150mm 地点と中心から前後 25mm の計 3 点について示している。

いずれの電磁波波形も電磁波のコンクリート表面からの反射の影響⁹⁾を受けて表層から深度 25mm 付近まで反応値が大きく増減しており、可視画像においても表層から白黒の層が同じ範囲で確認することができる。

鉄筋の電磁波波形をみると、深度 44mm の位置に正の最大反応値があることがわかる。一方、プラスチック板の電磁波波形をみると、深度 57mm の位置に負の最大反応値があることがわかる。コンクリートの設定比誘電率を基準にして、比誘電率が大きい鉄筋は正の値、比誘電率が小さいプラスチック板は負の値を示すことが確認できる。可視画像では電磁波波形の凹凸の示す範囲で鉄筋は白色、プラスチック板は黒色で可視化され、鉄筋は特有の山なりの形状⁴⁾が、またプラスチック板は概ね 100mm の長さの黒色の変化が確認できる。錆の可視画像では、走査距離 160~220mm、深度 50mm 付近に白色の反応を確認することができる。電磁波波形では、走査距離 175mm 地点では深度 55mm で明確な正の最大反応値を示している。なお、錆の埋設位置が中心から移動していることは打設による影響と考えられる。このことから、可視画像と電磁波波形の結果により、埋設した錆の比誘電率は、コンクリートより大きく鉄筋より小さい範囲にあると考えられ、電磁波レーダによって検出することができることを確認した。

表-3 コンクリート中で比誘電率が異なる埋設物に対する電磁波波形の変化



2.3 含水量が電磁波伝搬特性に与える影響の検証

かぶり付近のコンクリートの含水状態は環境条件で変化し、コンクリートの比誘電率に影響すると考えられるため、含水状態が電磁波伝搬特性に与える影響に関する検討を行った。検討は、前節で示したプラスチック板を埋設した供試体(図-1)と後述する鉄筋(D19)がかぶり 30mm の深さに埋設された供試体(図-5)を使用した。供試体の含水状態は、次のような手法によって変化させた。まず、供試体を5日間水中に完全に水没させ、この状態を飽水状態とする。その後に気中に最大21日間静置して自然乾燥をさせた。気中に静置した時点を0日として、1, 2, 3, 5, 7, 10, 14, 21日経過後に電磁波レーダによる測定を行った。なお、養生期間は28日としているため、この間のコンクリート内部の主な変化は表層部の含水量のみであると考えられる。測定箇所は供試体内の埋設物(鉄筋、プラスチック板)直上を通過する同一走査線上を測定し、各測定箇所で10回測定を行いその平均値を結果とした。電磁波レーダの設定値については前述の通りである。

図-2 にそれぞれの自然乾燥による反応値の推移を示す。プラスチック板の場合、自然乾燥期間が3日までで反応値は大きく低下し、それ以降14日までほぼ一定値をとり、14日から21日の間でさらに若干低下した。一方で、鉄筋の場合は、自然乾燥期間1日で反応値が大きく増加し、それ以降は概ね同じ割合で増加した。なお、0日と21日後の反応値の差は、プラスチック板では約34000、鉄筋では約80000であった。ここ

で、図-3 に鉄筋の0, 5, 21日経過の電磁波波形を示す。自然乾燥期間が増加すると、乾燥前と比較して、電磁波波形全体の深度が浅い方向にシフトすることが確認できる。これはコンクリート中の含水量の差異によって電磁波の伝搬速度が変化し深度情報に違いが現れたものと考えられる。以上のことから、含水状態の差異は、電磁波波形全体の反応値と深度に影響を与えることが確認された。

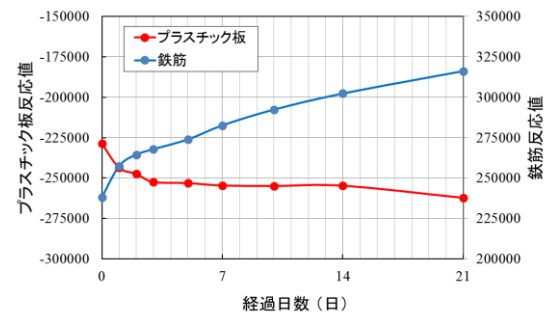


図-2 自然乾燥による反応値の推移

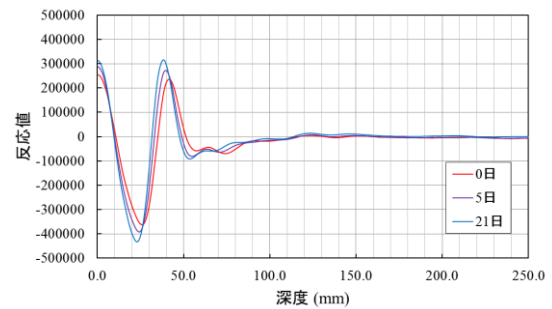
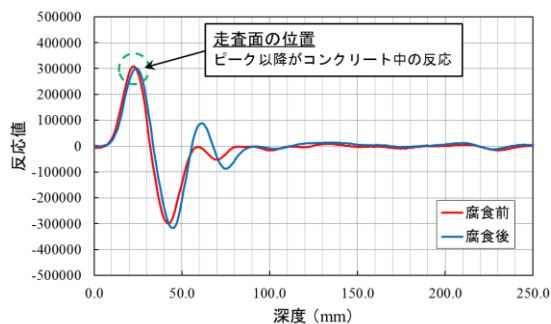
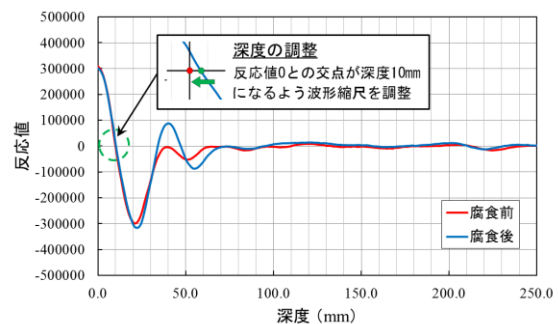


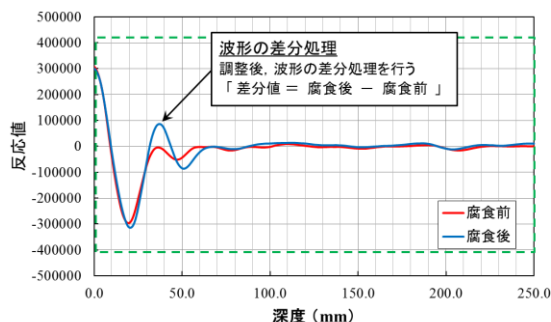
図-3 鉄筋の反応波形の推移



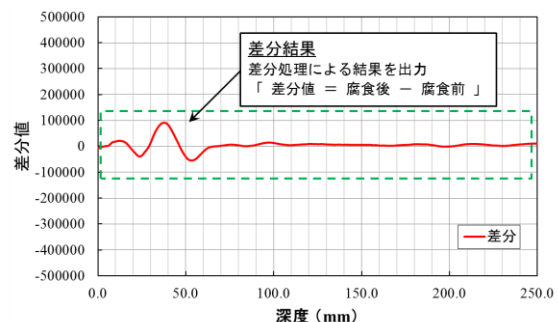
(a) 走査面位置の調整



(b) 深度の調整



(c) 波形の差分処理



(d) 差分結果

図-4 電磁波レーダによる差分抽出の概要

3. 電磁波伝搬特性の変化を応用した内部ひび割れ抽出方法の検証

本章では前章までの検討と実験的事実に基づいて、鉄筋腐食に伴って水平方向に生じる内部ひび割れの可視化手法として差分抽出による方法を提案し、その妥当性を検証する。

3.1 電磁波レーダによる差分抽出の概要

電磁波レーダにより測定されたデータは、各測定点で深度ごとに数値化される。差分抽出は、ある物質の同測定点において異なる状態の電磁波波形データを比較し、その差分を取ることで、その数値の差を状態変化として抽出するものである。以下に提案手法の詳細を示す。

図-4 に電磁波レーダによる差分抽出の処理の流れを示す。はじめに、図-4(a)で示す測定によって得られた波形データから、コンクリート表面の電磁波の反射を表す反応値（図-4(a)中の○）に着目し、この位置を波形データの始点（深度0mm）として扱う。次に、含水状態などの環境条件による深度のずれを調整するため、始点付近の反応値0の位置（図-4(b)中の○）に着目する。図-3 で示した通り、含水状態の影響は電磁波波形全体の深度に影響するため、その深度縮尺の調整を行う必要があることから、状態変化前後のそれぞれの反応値0が深度10mmとなるように調整を行った。これらの調整を行った後、状態変化前後の電磁波波形の差分を取る（図-4(c)）ことで、図-4(d)に示す波形データが得られる。

3.2 電食実験概要および電磁波レーダ測定概要

鉄筋コンクリート供試体を段階的に腐食させて電磁波レーダによる電磁波伝搬特性の測定を行い、腐食前後の同じ測定箇所のコンクリート断面内における電磁波波形の差分を内部ひび割れ中の錆の分布とみなして、その影響を評価した。本論では、これを差分抽出と称する。電磁波レーダの設定値については前述の通りである。

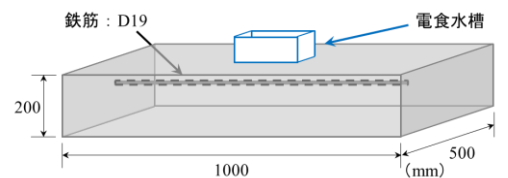
供試体概要および電食実験の概要を図-5 に示す。本実験で用いる供試体の寸法は幅500mm×長さ1000mm×高さ200mmで、その中心位置にD19鉄筋をかぶり厚さ30mmで一本配置した。なお、錆汁が鉄筋を伝って供試体外部に流出することを防ぐために、鉄筋全体がコンクリート中に埋設されるようにした。また、埋設した鉄筋を一律に腐食させるのではなく部分腐食⁷⁾させるために、鉄筋中央部の直上に長さ200mm、幅80mmの水槽を設置した。今回の供試体の幅を採用した理由は、既往の研究から側方の距離が短いと内部のひび割れ進展は側方境界の影響を受けるため、その影響を受けないようにするためである⁸⁾。また、部分

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⁷⁾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。

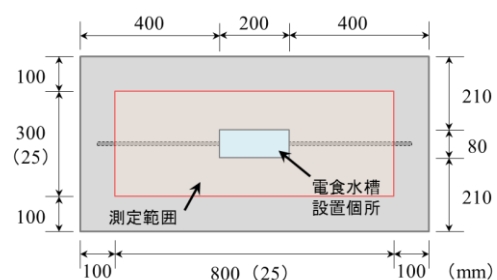
電食試験は、水槽内に3%NaCl水溶液と銅板を入れ、銅板および鉄筋が直流電源装置を介して直列回路となるように接続した。電流密度は電食水槽設置区間の鉄筋表面積から838μA/cmとし、腐食による鉄筋の質量減少量を式(1)⁹⁾で示すファラデーの法則より想定した。ここで、 Δm ：鉄筋の質量減少量(g)、 I ：電流(A)、 t ：通電時間(s)、 M ：鉄の原子量、 n ：鉄の価数、 F ：ファラデー定数、 η ：気中とコンクリート中の腐食進展の相違を表す係数（本論文では0.4とした）である。

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

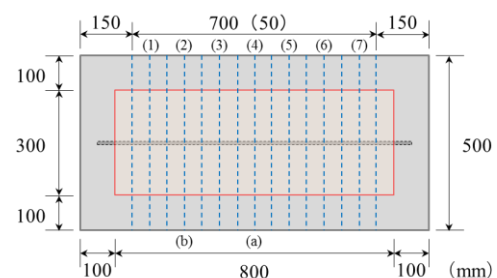
想定される鉄筋の質量減少率が10%となるまで通電を行い、想定した質量減少率を想定腐食率とした。電磁波レーダによる測定は、各想定腐食率に対応する通



(a) 供試体概要図



(b) 実験概要図



(c) 供試体切断概要図

図-5 供試体・実験概要図

電後に、図-5(b)に示す測定範囲を鉄筋軸方向と軸直交方向にそれぞれ25mmの間隔で走査して行った。測定は環境条件を近づけるため、想定腐食率に到達して水槽を撤去した直後、24時間経過後に測定した。なお、電食実験前の初期値については、水槽を設置して3%NaCl水溶液を入れただけの状態で想定腐食率1%に相当する時間を経過させ、水槽を撤去24時間後に電磁波レーダによる測定を行った。全ての電食試験および電磁波レーダによる測定が終了した後に、図-5(c)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スケールで測定した。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をし、これを実腐食率とした。

3.3 腐食実験および差分抽出による結果と考察

実験終了後に測定した実腐食率分布を図-6に示す。実腐食率は、最大で18.5%であり、水槽直下で約15%以上の腐食率となった。水槽から離れるにつれ腐食量は急激に小さくなり、100~150mm程度離ればほぼ0となった。想定腐食率が実腐食率より小さくなった理由は今後明確にする必要がある。

図-7に供試体上面からの内部ひび割れ幅分布図を示す。内部ひび割れ幅は、図-5(c)中破線で供試体の切断を行い、クラックゲージで測定を行った。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。ひび割れ範囲は、鉄筋直角方向では約250mm、鉄筋軸方向では約300mmであり、その範囲は概ね水槽設置位置を中心に広がっている。内

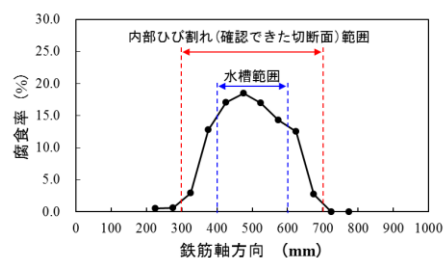


図-6 実腐食率分布

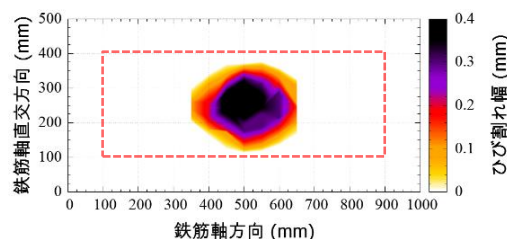


図-7 供試体上面からの内部ひび割れ幅分布図

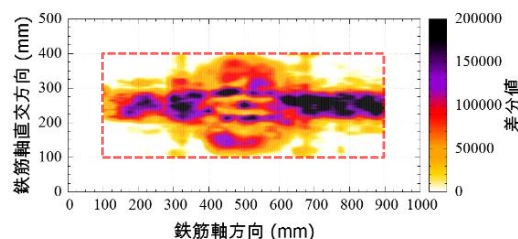


図-8 供試体上面からの差分抽出の分布図

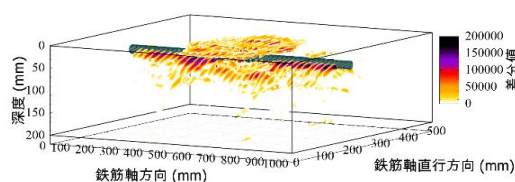


図-9 差分抽出の3次元分布図

表-4 差分抽出による差分値の分布とひび割れ分布の比較

	切断面(1)	切断面(2)	切断面(3)	切断面(4)
差分抽出				
ひび割れ				
	切断面(5)	切断面(6)	切断面(7)	
差分抽出				
ひび割れ				

部のひび割れ形状としては、表-4 に示すように部分腐食したときの特徴であるお椀形状⁷⁾であったことが確認できた。図-8 に供試体上面からの腐食前と腐食率 18.5%の差分抽出の分布図を示す。図-7 のひび割れ幅分布と比較すると、ひび割れが存在しない領域の鉄筋位置において、腐食後の差分値が大きく可視化されていることがわかる。一方で、ひび割れ領域ではそれに対応して明確に差分値が検出されていることがわかる。図-9 に差分抽出の3次元分布図を示す。図-7 のひび割れ領域では、鉄筋位置より上（供試体上面）側の範囲にお椀形状のような差分値の分布が現れていることを確認できる。また、それ以外の差分値の多くは、鉄筋位置から鉄筋特有の山なりの形状のような分布が現れていることがわかる。

表-4 に腐食率 18.5%の時の供試体断面内の差分値が示す錆の分布と図-5(c)中に示す(1)~(7)の断面の水平ひび割れの分布を示す。なお、表-4 の写真中の枠線は差分値の抽出を行った範囲を示している。これをみると、いずれの断面においても鉄筋特有の山なりの形状が可視化されていることがみてとれる。これは、図-9 の結果からも、図-8 においてひび割れが存在しない領域において検出された差分値は、この鉄筋特有の反応であると考えられる。実験の経過に伴って鉄筋周辺の含水状態が変化したものと考えられるが、今後この影響の補正を検討する必要がある。次に、この鉄筋の影響を除いた差分値について考察する。ひび割れは鉄筋から表面に向かって斜め方向に進展していることに対して、差分値が示す錆の分布は部分的に途切れて重なる箇所もあり、深度方向に関しては厳密に一致しているとはいえないものの、内部ひび割れ発生領域に対応して明らかに差分値が検出されていることが確認できる。このことから、提案手法によって錆の存在を検出し、間接的に内部ひび割れ領域を可視化できる可能性を示した。検出結果とひび割れ幅を比較したところ 0.05mm（使用したクラックスケールの最小スケールが 0.05mm）程度の錆が滲入したひび割れに対して検出が確認された。今後、ひび割れ中および鉄筋周辺の含水量などに関する補正方法や、錆の位置情報の検出精度に影響する要因を検討して、提案手法の精度向上と適用範囲の拡大を図る必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると以下になる。

- (1) 比誘電率の異なる複数の埋設物によって電磁波伝搬特性の評価を行った結果、錆はコンクリートより高い比誘電率を有しており、電磁波レーダによ

り検出可能な物質であることを確認した。

- (2) 含水状態による影響を検証した結果、コンクリート中の含水量によって電磁波波形全体の反応値と深度に影響を与えることを確認した。
- (3) 電磁波レーダにより得られる状態変化前後の電磁波波形データの差分を取ることで、錆の存在を検出することで、間接的に内部ひび割れを検出する手法を提案した。その結果、実験でみられた内部ひび割れ領域に対応する形で差分値が可視化されたことから、本手法により間接的に内部ひび割れの存在を評価できる可能性を示した。
- (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は、0.05mm 程度の錆が滲入したひび割れを検出可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.159-166, 1996.2
- 2) K. K. Tran, H. Nakamura, M. Kunieda and N. Ueda : Analysis of crack propagation behavior in concrete due to multi-rebar corrosion, Journal of Structural Engineering, Vol.58A, pp.844-853, 2012.3
- 3) 日本コンクリート工学協会: コンクリート診断技術⁷⁾ 13[基礎編], 2013.2
- 4) 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
- 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) 若林正樹, 田中正吾: 電磁波レーダを用いた鉄筋の深度及び径の計測に関する一考察, 非破壊検査, 第 56 号, 7 号, pp.364-370, 2007.7
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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