

論文 加振レーダ法を用いた電食中の鉄筋振動変位計測による早期鉄筋腐食検出の試み

三輪 空司*1・本多 秀聡*2・富田 沙希*3・中川 貴之*4

要旨：これまで、励磁コイルにより鉄筋を単一周波数で加振し、その鉄筋の振動変位を非破壊的に計測する加振レーダ法において、電食実験前後での鉄筋振動変位が 3~5 倍程度増加することを報告した。しかし、その電食過程において振動変位がどう変化するかは不明であった。本研究では、電食と同時に振動変位の連続計測を行った結果、振動変位が漸減した後、表面ひび割れ等が顕在化する前に振動変位が増加することがわかった、これより、D16, D22 鉄筋ではそれぞれ 2.2%, 1.3%程度の腐食減少量から腐食検出が可能であった。

キーワード：鉄筋腐食, 表面ひび割れ, 加振, 電磁波レーダ

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)構造物の鉄筋腐食量を定量的に評価することは、RC 構造物の維持管理において重要である。従来の RC 構造物の鉄筋腐食診断法には自然電位法が挙げられるが、コンクリートの乾湿に影響されるなど、十分な精度を有しているとはいえず、局所的な微破壊診断法として利用されている。一方、非破壊的に鉄筋腐食評価を行う手法では、腐食生成物と鉄筋の比熱の違いから、電磁誘導により鉄筋を加熱し、コンクリート表面の温度上昇の違いを評価する手法¹⁾が研究されており、腐食量の定量評価に有効であるとされている。

また、維持管理には、鉄筋腐食の定量評価だけではなく、腐食過程のより早期から腐食の検出を行うことも重要である。早期の鉄筋腐食評価の手法として、腐食に伴うコンクリートの内部ひび割れの発生による超音波伝搬速度等の変化を評価する手法が挙げられ²⁾、超音波パラメータが腐食に伴い徐々に増加し、内部ひび割れ進展に伴い減少に転じることが報告されている。これは、コンクリートの弾性係数の変化に着目した早期腐食評価手法といえる。しかし、現段階で評価パラメータとしている超音波伝搬速度の変化は数%であり、波形エネルギー、Q 値等の超音波パラメータもばらつきが大きい。ここで、異なる原理に基づく手法で非破壊的にコンクリートの弾性係数を評価可能となれば、両者を組み合わせることにより、腐食の早期評価法の更なる高精度化につながると考えられる。

これまで我々は、図-1 のように励磁コイルによりコンクリート中の鉄筋を数 10 Hz 程度で正弦振動させ、マイクロ波を用いて、鉄筋振動に伴う鉄筋からの反射波のドップラ応答を計測する加振レーダ法を開発し、鉄筋腐

食評価への適用を検討してきた。本手法では、通常の電磁波レーダ法のレーダ波形に相当する無変調成分波形と、振動物体のみに感度を有するレーダ波形に相当するドップラ変調成分波形の 2 種類のレーダ波形を取得可能な点に大きな特徴を有している³⁾。また、両者の反射波の振幅比から振動体の振動変位を導出する手法を提案し、かぶり 40 mm の D16 鉄筋を有する RC 供試体において、電食により鉄筋腐食減少率 10%程度まで腐食させたときの振動変位が健全な供試体に比べ 3~5 倍程度増加することを確認している⁴⁾。鉄筋の加振に伴う鉄筋振動変位は鉄筋-コンクリート表面間の弾性係数と関連があると考えられ、弾性係数が低下した場合、振動変位は増加すると考えられる。したがって、加振レーダ法を早期腐食評価に利用できる可能性がある。しかし、電食過程での振動変位の変化は不明であった。そこで、本論文では電食中の鉄筋振動変位の変化をモニタリングし、ひび割れ発生前の前兆を加振レーダにより評価可能かどうか検討する。また、振動変位以外のレーダ波形パラメータによる検出法について検討した結果についても述べる。

2. 加振レーダによる振動変位計測の原理

図-2 に加振レーダにおけるドップラ変位計測の概念図を示す。原点にあるアンテナから、計測対象に向け単一周波数 f の電波を照射し、距離 l 離れた反射体から

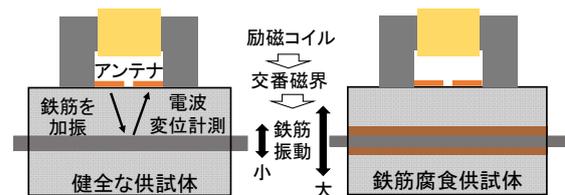


図-1 加振レーダの概念図

*1 群馬大学大学院 理工学府電子情報部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

*2 群馬大学大学院 理工学府電子情報・数理教育プログラム 博士前期課程 (工学)

*3 東京電力ホールディングス(株) 経営技術戦略研究所 土木・建築エンジニアリングセンター 修士(工学)

*4 東電設計(株) 土木本部 技術開発部 設備技術グループ 学士 (工学)

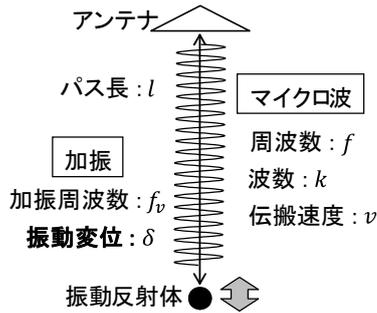


図-2 加振ドップラ変位計測の概念図

の反射波を受信する。この間、計測対象を単一周波数 f_v 、振動変位 δ で振動させると、受信波の位相項に依存するパス長 l が周期的に変化するため、位相変調により受信波は $f \pm n f_v$ ($n=0,1,2,\dots$) の周波数をもつ正弦波の和として表される。ここで、電磁波の波長に対して、振動変位が十分小さければ、受信波は周波数 f の無変調成分と周波数 $f \pm f_v$ の 1 次ドップラ変調成分 (以後ドップラ成分と呼ぶ) の 2 種類の波の和で近似できる。無変調信号、ドップラ信号をそれぞれの周波数成分で独立に直交検波して得られる複素振幅 $\dot{E}_0(f)$ 、 $\dot{E}_{\pm}(f)$ はそれぞれ近似的に式(1)、(2)のように表される。

$$\dot{E}_0(f) \cong \dot{R} e^{-\frac{j2\pi f 2l}{v}} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{\pm}(f) \cong \pm 2\pi f \delta \dot{E}_0(f) / v \quad (2)$$

ここで、 \dot{R} 、 v 、 l はそれぞれ、反射体の反射係数、電磁波の伝搬速度、物体までの距離であり、ドット記号は複素数を表す。一般に、上式は空間分解能を有していないが、電磁波の周波数 f を下限周波数 f_L から上限周波数 f_H まで掃引しながら、その伝達関数である式(1)、(2)を計測し、逆フーリエ変換すればインパルス応答であるレーダ波形 $\dot{g}_0(t)$ 、 $\dot{g}_{\pm}(t)$ がそれぞれ以下で与えられる。

$$\dot{g}_0(t) = \dot{R} \text{sinc} \left\{ \pi (f_H - f_L) \left(t - \frac{2l}{v} \right) \right\} \quad (3)$$

$$\dot{g}_{\pm}(t) = \frac{\delta}{jv} \frac{d}{dt} \dot{g}_0(t) \quad (4)$$

ここで、sinc関数は原点でピークを有する関数であり、無変調成分波形 $\dot{g}_0(t)$ は反射体までの往復時間 $t = 2l/v$ においてピークを有する通常のレーダ波形である。一方、正のドップラ成分波形は $\dot{g}_0(t)$ の微分波形と同一形状となり、その振幅は振動変位 δ に比例する。このように加振レーダ法では、通常のレーダ波形に加え、振動変位を振幅値に有するレーダ波形を得られる点が、通常の電磁

波レーダ法と大きく異なる特徴である。ここで、距離 l にある反射体の振動変位を $\delta(l)$ とすると、 $\delta(l)$ は式(4)に反射波到達時刻 $t = 2l/v$ を代入し、無変調成分の微分波形とドップラ成分波形の振幅比として式(5)で表される。

$$\delta(l) = v \left| \frac{\dot{g}_{+} \left(\frac{2l}{v} \right)}{\frac{d}{dt} \dot{g}_0 \left(\frac{2l}{v} \right)} \right| \quad (5)$$

したがって、両成分の反射波が明瞭に分離していれば、レーダによる高い空間分解能で任意の距離の振動変位を推定することが可能である。

3. 実験概要

3.1 RC 供試体の概要

本実験に用いたコンクリート供試体の配合を表-1 に示す。W/C は 55% とし、セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。供試体は図-3 に示すように、幅 400 mm、高さ 150 mm、奥行き 150 mm である。鉄筋はかぶり 30 mm、D16 (供試体 A)、かぶり 30 mm、D22 (供試体 B)、かぶり 50 mm、D16 (供試体 C) の 3 水準とし、供試体 A は $N=6$ 、供試体 B、C は $N=5$ として作製した。尚、電食において供試体側面の鉄筋端部からの錆び汁の漏出を防ぐために、コンクリート端部から 100 mm 区間の鉄筋をエポキシ樹脂によりシーリングしている。打設面は打設方向によるブリージングの影響を考慮し、150 mm \times 150 mm の面とした。供試体は 28 日の湿布養生を実施した、28 日圧縮強度は 41 N/mm² であった。

3.2 励磁コイル加振システム

励磁コイルは 100 層積層鋼板コアを使用し、断面積 50 mm \times 50 mm、全長 180 mm のコの字型とした。コイルには耐熱 200 $^{\circ}$ C、直径 1.2 mm のエナメル線を 500 巻している。コイルのインダクタンスは 111 mH であり、直流抵抗は約 1.9 Ω である。コイルへの交流電流印加は交流定電流源を用い、コイルに直列なコンデンサを介して直列共振させた。印加電流は実効値で 10 A であり、印加する交流の周波数は 57 Hz とした。尚、電流印加時のコア端部での磁束密度の最大値は 0.2 T 程度であり、コア両端部から 3 cm 離れた D16 鉄筋にかかる交番磁力は 10 N 程度であった。また、コア内部の温度は 60 $^{\circ}$ C 程度であった。



図-3 作製した RC 供試体の概要

表-1 コンクリート供試体の配合表

粗骨材最大寸法 [mm]	水 [kg/m ³]	セメント [kg/m ³]	水セメント比 [%]	細骨材 [kg/m ³]	粗骨材 [kg/m ³]	粗骨材率 [%]	AE 剤 [g]	AE 減水剤 [%]
20	168	305	55	864	947	47.7	73.2	1

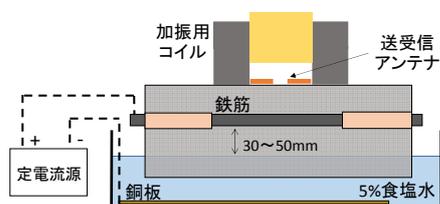
3.3 加振レーダ計測システム

レーダ計測には広帯域にわたり被計測物体の単一周波数における振幅と位相を正確に測定可能な伝達関数計測機器であるネットワークアナライザを用いる。一方、ネットワークアナライザは一般に周波数遷移した信号の伝達関数を測定できないため、ドップラ成分の計測においては、ネットワークアナライザの外部において送信周波数を振動周波数 f_0 だけあらかじめシフトしてアンテナに送信することにより、ドップラ効果によって復調されたドップラ成分を計測することができる³⁾。本計測では励磁コイルに 10 A、周波数 57 Hz の交流電流を印加し加振を行った。交流電流を流した際には励磁コイルには磁気吸引力のみが働くため、鉄筋は加振周波数の 2 倍の 114 Hz で振動することとなる。そのためドップラ成分計測時はネットワークアナライザの外部で電磁波を 114 Hz の周波数でダウンコンバートし、内部の 10 Hz のバンドパスフィルタによりドップラ成分を分離して計測する。

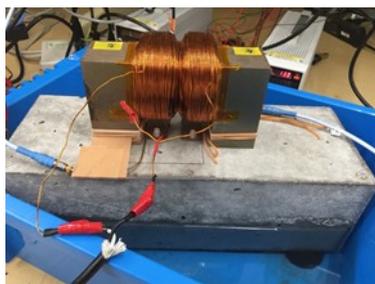
送受信アンテナにはボウタイスロットアンテナを用い、アンテナ間隔を 40 mm として加振用コイルの下部にコンクリートから 1 mm 程度浮かせて配置した。またコイルはコイル長手方向が鉄筋に平行になるよう鉄筋の直上に配置した。またネットワークアナライザの周波数掃引を 1~9 GHz とし、IF 帯域幅を振動周波数に比べ十分小さい 10 Hz とした。送信アンテナ直前には高周波のパワーアンプを用いて、送信パワーを 25 dBm とした。尚、一点の無変調成分及びドップラ成分の計測時間は約 3 分であった。本研究では、アンテナを同一箇所におき、電食による通電中の振動変位の変化を測定することが目的であるため計測箇所は鉄筋の中央の 1 点を計測点とする。

3.4 電食試験の概要

電食試験は、5%の NaCl 水溶液中に図-4 に示すよう



(a) 電食試験と加振レーダ測定の状態



(b) 実験の様子

図-4 電食実験中の加振レーダ測定の概要

に供試体を浸漬させ、鉄筋から約 30~50 mm 下方が水溶液面となるよう調整した。供試体底面には銅板を配置し、定電流源の陰極に、鉄筋を陽極に接続し、通電を行った。

一方、供試体上面には、加振用コイルとアンテナを配置し、電食試験中に一定時間おきに振動変位を計測するものとする。供試体下面を測定面とした場合、一般には測定面側のコンクリートの水分量が増加することにより、電磁波の減衰特性や誘電率特性に影響を与えることになる。鉄筋振動変位はレーダ波形の振幅比を評価するため水分の影響を受けにくいことがわかっているが、減衰による SN 比の悪化を避けるために下面から電食を行い、上面で測定を行うこととした。

4. 電食中の加振レーダによる振動変位計測

4.1 振動変位の連続測定

まず、電食時における振動変位の時間変化を詳細に調べるために、コイルやアンテナを固定したまま、10 分毎に振動変位を連続測定する実験を行った。アンテナは固定されているため、時間変化による変動は計測時のノイズやコンクリート内部の特性変化のみが現れるはずである。使用した供試体はかぶり 30 mm の D16 鉄筋 (供試体 A) の 1 体である。電食電流は 60 mA とし、後に 200 mA、400 mA に増加させた。尚、この際の電流密度はそれぞれ、6, 20, 40 A/m² である。

図-5 に電食中の加振レーダ計測による振動変位の時間変化を示す。振動変位は電食開始 1 日目までは 7 μm 程度であり、振動変位の標準偏差は 0.2 μm 程度であった。これより、測定ノイズによるばらつきは 0.2 μm 程度と考えられる。2 日目以降 12 日目までは振動変位は通電時間にほぼ比例するように 0.3 $\mu\text{m}/\text{day}$ 程度の勾配で減少し、初期値の 70%程度となる 4 μm 程度まで低下した。その後若干振動変位は上昇したものの、ほぼ一定値となったため、13 日目より、電食電流を 200 mA に増加させた。14 日目より振動変位は 4 $\mu\text{m}/\text{day}$ 程度の勾配で急上昇した。15 日目には、供試体表面に図中の写真のような表面ひび割れが確認された。16 日目には、電食電流をさらに 400 mA に増加させたところ、写真のように供試体側面の水溶液面付近からさび汁の漏出が確認され、再度 20 $\mu\text{m}/\text{day}$ 程度の勾配で振動変位が増加した。また、その最中、表面からのさび汁も見られた。表面の錆び汁は極わずかであったが、側面からは大量の錆び汁が漏出し、最終的に振動変位は 18 μm 程度まで上昇した。

渡辺らは超音波伝搬速度やその波形エネルギー、Q 値等の超音波パラメータの電食中における変化を測定しており、いずれも一旦上昇後、初期値よりも低下する傾向にあり、それらの上昇過程では腐食生成物の生成が、降下過程では内部ひび割れの増加が変化の要因であると述べ

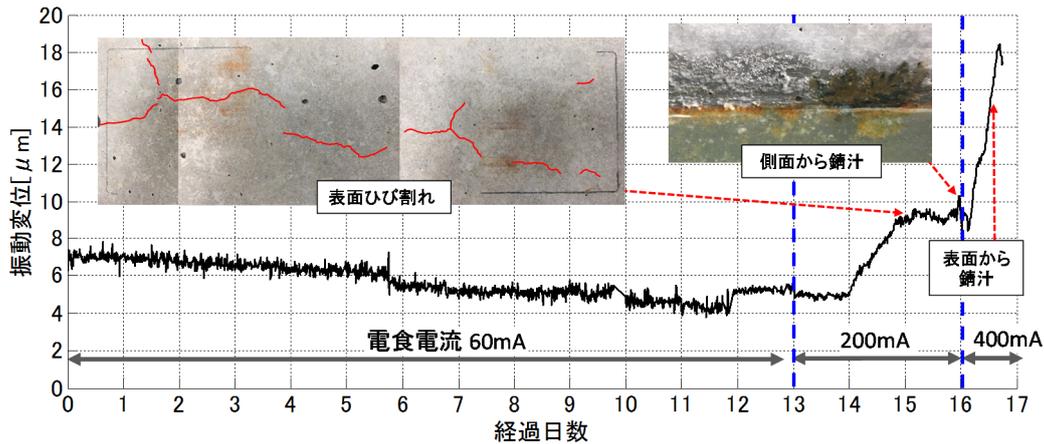


図-5 電食中の加振レーダ計測による鉄筋振動変位の時間変化(かぶり 30mm, D16 鉄筋)

ている²⁾。このことから、本研究においても振動変位の低下する過程は、電食により発生した鉄筋からの腐食生成物が膨張し、鉄筋周囲に充填され、膨張圧が増加することにより、鉄筋の振動が抑圧されたことが原因であると推察できる。また、膨張圧増加に伴い膨張圧がある閾値を超えると、コンクリート内部では内部ひび割れが発生、進展し、膨張圧が解放されるサイクルが繰り返されると考えられる。電食電流を増加させた13日目以降、膨張圧の増加に比べ、膨張圧解放が相対的に大きくなるような比較的大きな内部ひび割れが発生し、鉄筋周囲の膨張圧低下に伴い振動変位が急増したものと推察できる。側面からのさび汁漏出以降は、膨張圧が開放された状態になっており、鉄筋の断面積低下とともに、鉄筋が動きやすくなり振動変位がより急増したと考えられる。

4.2 一定電食電流による振動変位測定

次に、3種類のコンクリート供試体各5体について、一定の電食電流により通電を行い、ひび割れ発生と振動変位の変化の再現性の確認及び、供試体種別による違いを検討した。電食電流は、供試体A, Bについては60 mA, Cについてはひび割れ発生が遅くなることを考慮し、90 mAとし、15体同時に通電を行った。加振レーダ測定はアンテナ位置を正確に合わせながら1体につき毎日1回の計測を行った。また、電食中の鉄筋腐食量を評価するため、同種の供試体5体のうち1体を振動変位減少中の15日目に、もう1体を振動変位上昇後の22日目に取り出し、鉄筋腐食量の評価を行った。

表-2に通電途中で取り出した供試体から得られる腐食量、及び写真-1に供試体Aの電食後22日目に取り出した供試体の鉄筋の写真を示す。写真より、腐食生成物はやや下面が多いものの、ほぼ均等であり、鉄筋の腐食の様子には下面から電食を行った影響はほとんどないものと考えられる。

図-6(a)に無変調成分波形の反射の強さ $|j_0(t)|$ の経過日数による変化を示す。供試体種別の添字番号は同一

種類の供試体の識別番号を表し、同一種別で同じ色尺度で表示している。また、各波形は変化の傾向を見やすくするため、前後2日間の5波形の荷重移動平均を行っている。図より無変調成分においては、供試体A, Bでは0.8 ns付近に、Cでは1.1 ns付近に見られるピークが鉄筋からの反射波に対応する。無変調成分は若干の振幅低下はあるものの、経過時間によって大きな変化はみられず、毎回、安定して鉄筋の反射波を計測できていると考えられる。

図-6(b)にドップラ成分波形の経過日数による変化を示す。尚、供試体の外見的特徴として表面ひび割れ、側面のさび汁、表面へのさび汁漏出が確認された日を、それぞれ、黄色、緑色、赤色の矢印で示している。図よりドップラ成分においては、振動物体である鉄筋の反射波付近のみに明瞭なピークが見られる。しかし、その変化傾向は無変調成分と比べ大きく異なり、供試体Aではひび割れや錆び汁の漏出した20日以降に振幅が急激に増加していく傾向が見られる。無変調成分は若干の振幅低下を示しており、振動変位が増加していることを示している。

表-2 各供試体の鉄筋腐食量の例

	鉄筋径	かぶり [mm]	電食電流 [mA]	15日目 腐食量[%]	22日目 腐食量[%]
A	D16	30	60	2.1	2.7
B	D22	30	60	0.76	1.3
C	D16	50	90	2.2	4.7

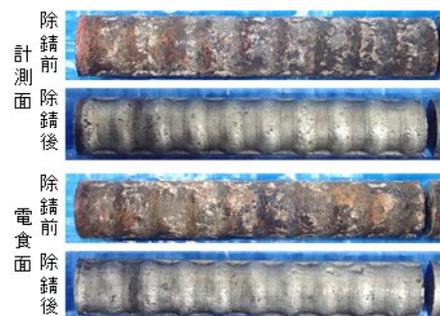


写真-1 取り出した鉄筋の様子(供試体A, 22日目)

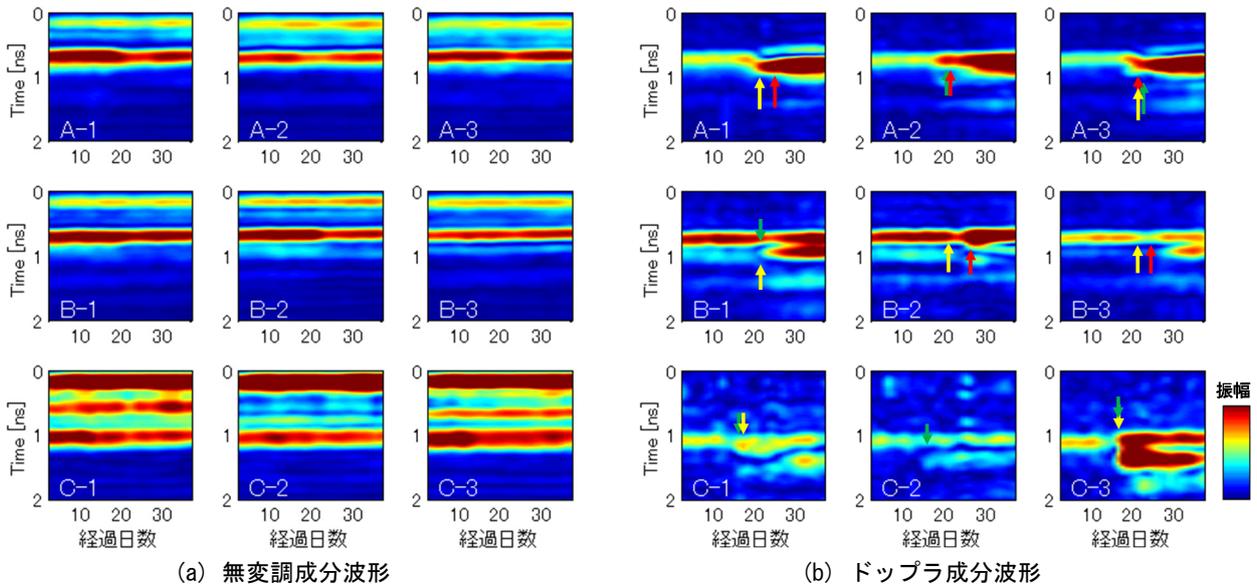


図-6 電食中における加振レーダ波形の反射の強さの経時変化

一方、供試体 B, C では A と同様な傾向となる B-2 以外は二つのピークが現れることが確認できる。また、二つ目のピークは錆び汁が側面や表面に漏出したタイミングで発生していることがわかる。二つ目のピークは無変調成分には全く見られないことから、ドップラ成分に特有の現象となっている。ドップラ成分は振動する物体に選択的に感度を有しており、電磁波の反射係数としては鉄筋よりも小さいものの、振動変位の極めて大きい振動物体からの反射の特徴を有しているといえる。今回の供試体では、下面から電食しており、特に供試体 B, C では、A に比べ下面への鉄筋かぶりが小さいことや、側面への錆び汁の流出が支配的であった。したがって、二つのピークが現れた理由として、鉄筋から側面に向けて伸びたき裂内部に含まれる腐食生成物中の主な磁性体であるマグネタイトが面的に広がり、錆び汁の漏出とともに膨張圧が開放され、それ以降極めて大きな振動変位となって表れた可能性が推測できるが、この仮説についての検証は今後の検討課題である。

図-7 に加振レーダ計測において得られる振動変位の時間変化を示す。尚、振動変位は無変調成分、ドップラ成分において鉄筋付近の反射波のピーク振幅を用いて算出した。振動変位は電食開始後、いずれの供試体でも経過日数とともに漸減、もしくは一定となる傾向を示している。また、供試体 A においては、ひび割れや、錆び汁の漏出前に振動変位の増加が見られ、図-5 の結果と調和的であることがわかる。これにより、振動変位の増加からひび割れ等が顕在化する前に鉄筋腐食の評価ができる可能性がある。一方、供試体 B, C においては 6 体中 4 体については明瞭な振動変位の増加は見られなかった。振動変位の増加が明瞭でない B-1, B-3, C-1, C-2 は図-6(b) においてドップラ成分の反射波が二つに分離してい

る場合に対応しており、振動変位によらずとも、波形の観察により腐食の検出は可能である。

次に、図-6(b) より供試体 A-1, A-3 においてはドップラ成分の増加に伴って、反射波の到達時刻が遅れる現象が見られることがわかる。図-8 に無変調成分とドップラ成分の反射波のピーク時間の到達時間差を求め、反射体までの距離差に換算した結果を示す。図より、ひび割れ前はいずれも数 mm の距離差となっているが、A-1, A-3, C-1 では 5 mm 程度増加していることがわかる。物理的には振動成分の反射点が静止成分に比べ 5 mm 程度奥から反射していることを示している。この理由については不明であり今後の検討課題とするが、この現象は振動変位に比べ、変化が急峻であり供試体レベルでのひび割れの前兆を高精度に評価できる可能性がある。

さらに、ひび割れの発生等により反射波が分離する等波形が複雑に変化する可能性を考慮し、反射波のピーク

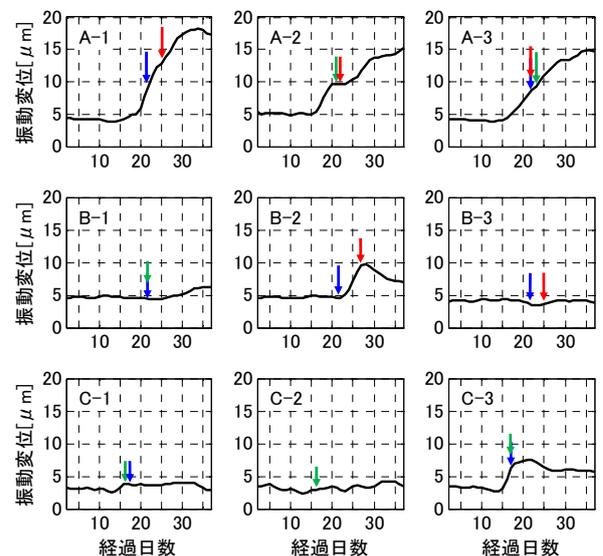


図-7 加振レーダによる振動変位の電食時の変化

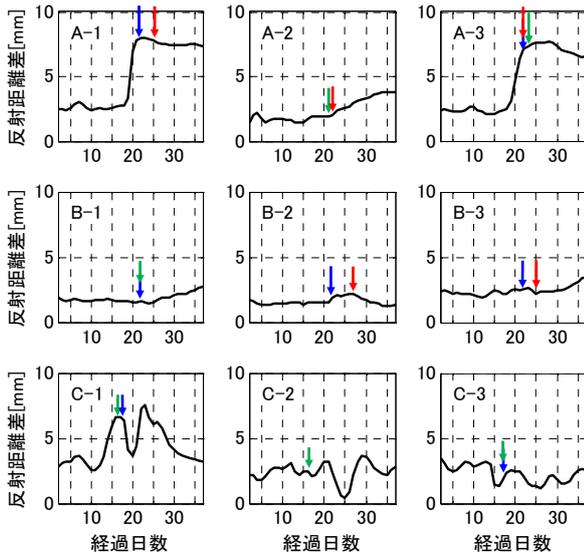


図-8 加振レーダによる反射距離差の電食時の変化

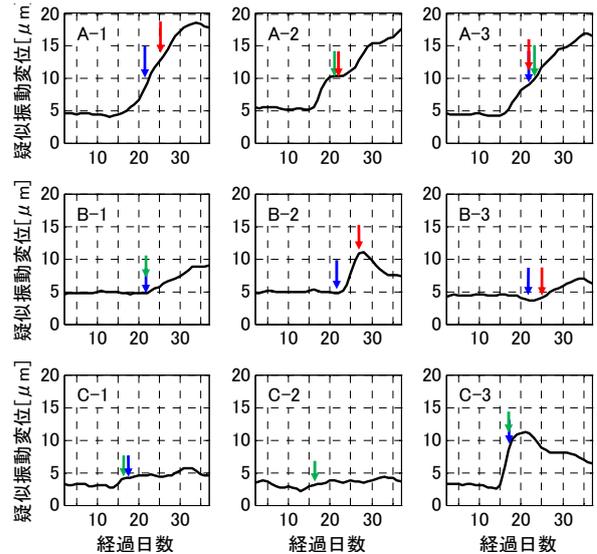


図-9 加振レーダによる疑似振動変位の電食時の変化

の比から振動変位を求めるのではなく、ある一定の時間幅 ρ の区間での波形の RMS 値を用い、疑似的な振動変位 σ の評価を行った。ここで、 σ は式(6)で表される。

$$\sigma(l) = v \sqrt{\frac{\int_l^{l+\rho} \left| \dot{g}_+ \left(\frac{2l'}{v} \right) \right|^2 dl'}{\int_l^{l+\rho} \left| \frac{d}{dt} \dot{g}_0 \left(\frac{2l'}{v} \right) \right|^2 dl'}} \quad (6)$$

図-9 に $\rho=37$ mm における疑似振動変位を求めた結果を示すが、振動変位の上昇が見られなかった供試体においても程度は異なるものの、ひび割れ前に疑似振動変位の上昇が見られることがわかった。図-9 より供試体 A, C では 15 日、供試体 B では 22 日目以降より疑似振動変位の増加が見られることから、表-2 より、D16 鉄筋では 2.2%、D22 鉄筋では 1.3% 程度の腐食量から腐食の検出が可能であると考えられる。

5. まとめ

本論文では、早期の鉄筋腐食評価のため加振レーダによる RC 供試体の電食中の鉄筋振動変位の時間変化の評価を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 振動変位は通電開始後、漸減を続け、すぐに上昇することはない。
- (2) 振動変位の増加は、ひび割れや錆び汁の漏出等が顕在化する前から始まる場合が多い。
- (3) 振動変位の増加が見られない場合は、ドップラ成分において鉄筋の反射付近に二つのピークが表れる傾向がある。
- (4) 無変調成分に比べドップラ成分における鉄筋反射のピーク時刻がひび割れ等の発生とともに急激に遅れる現象が見られた。

- (5) すべての供試体において、ひび割れ前またはほぼ同時に疑似振動変位の増加が見られ、D16 鉄筋では 2.2%、D22 鉄筋では 1.3% 程度の腐食量から腐食の検出が可能であった。

一方、ドップラ成分にピークが二つ発生する理由や、反射距離差が発生する理由は不明であり、今後の検討課題である。

謝辞

この研究は科学研究費補助金、基盤研究 B (17H02047) の助成により行われた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 大下英吉, 堀江宏明, 長坂慎吾, 谷口修, 吉川信二郎: 電磁誘導加熱によるコンクリート表面温度性状に基づいた RC 構造物の鉄筋腐食性状に関する非破壊検査手法, 土木学会論文集 E, Vol. 65, No. 1, pp. 76-92, 2009
- 2) 福富隼人, 渡辺健, 西山航平, 橋本親典: 超音波法および AE 法による鉄筋腐食の早期検出に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1795-1800, 2017.7
- 3) 三輪空司, 栗田伸幸, 碓氷淳: 励磁コイルを用いた加振ドップラレーダによるコンクリート内振動体の選択的イメージング, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No.1, pp.2073-2078, 2016.7
- 4) 三輪空司, 本多秀聡, 小澤満津雄, 栗田伸幸: 鉄筋腐食評価のための加振 RC レーダ法による鉄筋振動変位計測, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, pp. 1777-1782, 2017.7