電磁パルスにより励振された鉄筋の加振レーダによる振動変位計測 論文

清水 崇至*1・三輪 空司*2・服部 晋一*3・鎌田 敏郎*4

要旨: 励磁コイルにより正弦加振された鉄筋の振動変位を定量的に計測する加振レーダ法は鉄筋腐食の評価 に有効であるものの、既往のシステムは単一周波数加振のため、衝撃弾性波法等において従来から議論され てきた劣化による機械的な応答変化の知見を援用することは困難であった。本論文では電磁パルスにより加 振された鉄筋の広帯域な振動特性を計測可能なレーダシステムを開発し、電食試験中における鉄筋劣化時の 振動特性をモニタリングした結果について述べる。実験の結果 1kHz までの鉄筋振動の周波数依存性を容易に 計測可能であり、従来法で見られた鉄筋腐食に伴う振動変位増加に加え、ピーク周波数の低下が見られた。

キーワード:電磁パルス,電磁波レーダ法,鉄筋振動変位,周波数依存性

1. はじめに

非破壊的な RC 構造物の劣化評価法として衝撃弾性波 法や超音波法が知られており、その伝搬速度からコンク リート強度の推定, 受信波形の広帯域な周波数スペクト ル情報から, ひび割れによる多重反射の発生や, 内部ひ び割れによる高周波減衰などの内部欠陥の評価 1)に実用 的に利用されてきた。また、鉄筋腐食等の劣化評価2)へ の適用も検討されているものの、鉄筋の劣化情報をコン クリート表面の弾性波センサにより捉えるため, 伝搬路 のコンクリートの劣化やセンサの接触状態, 入力波源の 再現性の影響を受けやすい。また, 励磁コイルにパルス 電流を印可し、鉄筋のみを加振させる電磁パルス法 3)で は優れた波源再現性や、伝搬路による影響が片道のみに なる利点も有しているものの定量的な鉄筋の劣化評価に は至っていない。

一方, 我々は伝搬路の劣化の影響を受けにくい電磁波 に着目し、図-1 のように励磁コイルによりコンクリー ト中の鉄筋を単一周波数で正弦振動させながら、ドップ ラレーダ法によりその鉄筋の原位置での振動変位を定量 的に計測する加振レーダ法を提案してきた4。これまで、 振動周波数 100 Hz での鉄筋振動変位を計測し, 電食試験 における積算電流の増加とともに、振動変位が5倍程度 まで増加することを示した。さらに、振動周波数を 100 ~900 Hz の間で逐次的に変化させながら、鉄筋腐食によ る振動変位の周波数依存性を評価し,500 Hz 付近におい て振動変位が増加することを示した 5)。しかし、加振レ

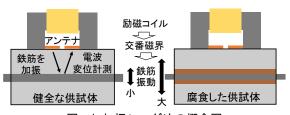


図-1 加振レーダ法の概念図

ーダ法では励磁コイルとコンデンサを用いた直列共振を 利用した正弦加振システムであるため, マッチングコン デンサを利用周波数の数だけ用意し, 切り替える必要が あった。また、既往のシステムでは計測時間が長く、高 周波では誘導加熱により鉄筋の温度上昇が顕著になる問 題もあり、広帯域かつ詳細に鉄筋振動変位の周波数依存 性を評価することは困難であった。

もし、加振レーダ法においてもパルス加振した振動変 位を計測できれば、図-2 のように衝撃弾性波法等のコ ンクリート表面で計測される広帯域な振動情報とは独立 な鉄筋のピュアな振動変位の広帯域な情報が容易に得ら れる可能性があり、これまで議論されてきた多くの衝撃 弾性波法における知見の援用や, 電磁パルス法との同時 計測によるより詳細な評価が可能となるため、今後の劣 化評価に有用であると考えられる。一方で加振を正弦波 からパルス波に変更するには電磁パルス源に加え、計測 システムのダイナミックレンジの向上が必要となる。

そこで、本論文では新たに SN 比を向上させたパルス ドップラレーダシステムを試作し、電磁パルス加振によ る鉄筋振動の広帯域な周波数特性が測定可能であること を示す。また、本システムを用い電食試験中の RC 供試 体に対して電磁パルス加振を行い、鉄筋腐食にともなう 振動変位の周波数依存性の変化をモニタリングした結果 について述べる。

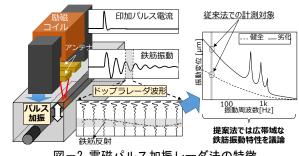


図-2 電磁パルス加振レーダ法の特徴

- *1 群馬大学 大学院理工学府 理工学専攻電子情報・数理教育プログラム 修士課程 (学生会員)
- *2 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)
- *3 大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 特任研究員 博士 (工学) (正会員)
- *4 大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

2. 直交検波パルスレーダにおける振動変位計測の原理

本計測における計測原理は連続波レーダの位相変化に基づく変位計測を基礎とする。距離分解能を得るためには式(1)で表されるパルス幅 τ_w を有する任意の単峰性パルス波 e(t) を考える。尚,e(0) = 1である。

$$\tau_w = \frac{2D_w}{v} \tag{1}$$

ここで、 D_w は空間分解能、vは電磁波伝搬速度である。 レーダ送信パルス波形は e(t)と搬送正弦波の積であり、 搬送周波数を f_c とすると送信パルス波 $p_0(t)$ は複素 振幅を有する式(2)のように表される。

$$\dot{p}_0(t) = e^{j2\pi f_c t} e(t) \tag{2}$$

今,送信点から距離 L 離れた反射体に向けパルス波を照射し,反射体からの反射波を同一地点で受信する。 このとき,受信レーダ波形 $\dot{h}(t)$ は反射係数を R とし,アンテナ特性を無視すれば式(3)のように表される。

$$\dot{h}(t) = R\dot{p}\left(t - \frac{2L}{v}\right) \tag{3}$$

さらに、反射体を任意の振動変位波形 $\delta(T)$ で電磁波の伝搬方向に振動させると、振動により反射波の伝搬距離が変化するため、距離の時間変動を L(T) とすると式(4)のように表される。

$$L(T) = L - \delta(T) \tag{4}$$

電磁パルス加振における $\delta(T)$ の変化は数 kHz 以下であり、L(T) の変化速度はレーダ波形の GHz オーダーの変動に対し極めて遅い。この変動に対しレーダ波形は瞬時に得られるため、レーダ波形の遅延時間 t と振動波形の遅延時間 T は独立とみなせる。ここで、レーダ波形をパルス繰り返し毎に並べ変えた 2 次元の複素レーダプロファイル $\dot{h}(t,T)$ は式(5)のように表される。

$$\dot{h}(t,T) = Re^{j2\pi f_c(t - 2\frac{L - \delta(T)}{v})} e(t - 2\frac{L - \delta(T)}{v})$$
 (5)

ここで、反射体の反射波遅延時間は $\tau = 2L/v$ であるため、 $\dot{h}(\tau,T)$ は式(6)のように表される。

$$\dot{h}(\tau,T) = Re^{\frac{j4\pi f_c \delta(T)}{v}} e^{\frac{2\delta(T)}{v}}$$
(6)

このとき、加振レーダ計測ではレーダ空間分解能 D_w は数 10 mm オーダーであるのに対し、振動変位 $\delta(T)$ は数 10\mu m オーダーであり、 $\delta(T) \ll D_w$ より、パルス波 e(t) の波形の特徴から式(7)の関係が得られる。

$$e\left(\frac{2\delta(T)}{v}\right) = e\left(\tau_w \frac{\delta(T)}{D_w}\right) \cong 1$$
 (7)

よって、鉄筋かぶりを L とすれば、鉄筋振動による鉄筋部位の複素振幅応答 $\dot{g}(T)$ は式(8)のように近似できる。

$$\dot{g}(T) = \dot{h}(\tau, T) \cong Re^{\frac{j4\pi f_c \delta(T)}{v}} \tag{8}$$

 $\dot{g}(T)$ の位相変化は反射体の振動 $\delta(T)$ に比例するため, 位相成分 $\varphi(T) = \angle \dot{g}(T)$ を用いると $\delta(T)$ は式(9)のように表される。

$$\delta(T) = \frac{v}{4\pi f_*} \varphi(T) \tag{9}$$

既往のパルスレーダシステムでは式(5)の実部のみを計測し、ヒルベルト変換により虚部のレーダ波形を合成することで複素レーダ波形を得ていた。これは計測対象が正弦振動する際には問題ないが、任意の波形で変化する場合は変動を正しく得られない。このため、ハードウエア的に直交検波を行い、複素レーダ波形を得る必要がある。図-3 に振動変位計測のながれを示す。直交検波により取得した同相成分と直交成分から複素レーダ波形を生成し、レーダ波形の繰り返し毎に並べ変えることで複素レーダプロファイル h(t,T) を得る。さらに、鉄筋部位に対応する遅延時間 τ_0 での位相成分 $\varphi(T)$ を抽出することで反射体の振動波形を算出する。

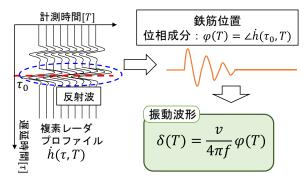


図-3 振動変位計測のながれ

3. 電磁パルス加振直交検波パルスレーダシステム

3.1 直交検波パルスレーダシステムの概要

一般に GHz 帯の高周波信号を直接サンプリングする 方式は高コストであり、一般的に等価時間サンプリング 方式が用いられる。本方式は周期信号に対しその周期よ りわずかに長い周期でサンプリングすることと等価で あり、1 レーダ波形に対し1点しかサンプリングに使用 されないため SN 比は低下するものの、高速な RF 信号 を引き伸ばして低周波域で計測できる。

図-4(a) に開発したパルスレーダシステムの概要を示す。パルス発生器はパルス幅 0.1 ns のベースバンドパルスを 5 ns 周期 (繰り返し周波数 200 MHz) で生成する。送信パルスを搬送波で変調後,送信アンテナから出力し,受信信号を直交検波したのち,繰り返し周波数 199.999 MHz のサンプリングパルスと波形の乗算を行い,低周波成分を取り出すことで 5 ns 周期のレーダ波形がクロックトリガ周波数差 1 kHz に対応した 1 ms 周期に引き伸ばされて AD 変換される。

図-4(b)に本システムにおいて、送受信間を40 dBの減衰器及びアンテナの周波数帯域を模擬したローパスフィルタを介して直結させたインパルス応答の結果を示す。取得した複素レーダ波形の実部成分と虚部成分から振幅成分を算出した。尚、横軸は1 msを5 nsに換算している。また、パルスの半値全幅は0.3 ns程度であり、帯域幅は0.5~3 GHz 程度と考えられる。

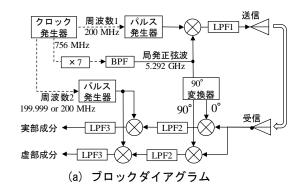
等価時間サンプリング方式のパルスレーダシステムでは送信パルスとサンプリングパルスを生成するクロックトリガ周波数にわずかな差を設けることで,可探距離内のレーダ波形をフルウェーブで計測可能である。しかし,加振レーダ法においては鉄筋反射波到達時刻のみの情報を用い,それ以外の時刻の波形情報は不要である。

そこで、両クロックトリガ周波数差を0とし、両者の位相差が鉄筋反射波の遅延時間に対応するよう調整することで、全計測を鉄筋部位の応答に固定して連続的に取得し、SN比を向上させた。具体例として、サンプリング周波数 250 kHz、計測時間1sの測定において、両クロックトリガの周波数差が1kHzの場合には特定深度の反射波は1k点で構成されるが、繰り返し周波数差を0とした場合は250k点で構成されるため、24dB程度のSN比向上となる。本論文では、繰り返し周波数差を0とし位相差を調整する方法で計測を行うものとする。

3.2 直交検波パルスレーダシステムの妥当性確認

まず、本システムの性能評価として、RC供試体中の鉄筋振動をレーザ変位計と同時に計測し、振動変位の妥当性を検証した。供試体寸法は高さ 100mm×幅 150 mm×長さ 300 mm であり、下面からかぶり 40 mm に直径 16 mm の丸鋼が埋設されている。この鉄筋の振動変位を計測するため、供試体下面にアンテナを設置した。また、写真一1 のように供試体上面は穿孔により鉄筋が一部露出しており、下面から加振レーダ計測、上面からレーザ変位計により鉄筋の表裏の振動変位を同時に測定した。また、RC 供試体から飛び出した鉄筋端部を金鎚で垂直に打撃することで振動波源とした。

図-5(a)に計測した鉄筋振動波形を示す。尚,振動変位の比較のためレーザ変位計の測定結果の正負を反転し、レーザ変位計の結果を 0.2 倍に調整している。この調整はレーザ変位計と供試体はアイソレートされているもののアンテナは供試体に固定されていることや、鉄筋の表裏のみの振動を見ている等の違いにより、厳密には両者で同一の振動を見ていないことに起因すると思われる。鉄筋振動波形を比較すると概形は類似しており、図ー5(b)の鉄筋振動の周波数スペクトルにおいても、特徴はよく一致している。以上の結果から、本システムによるコンクリート中の鉄筋振動計測は周波数依存性を議論する上では十分利用可能であると判断した。



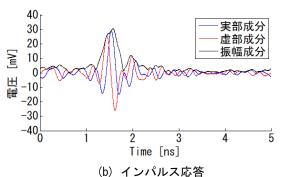


図-4 開発したレーダシステムの概要

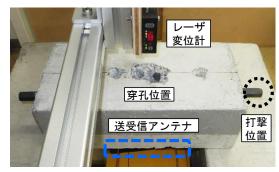
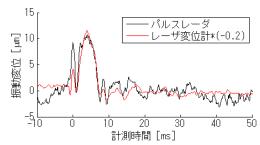
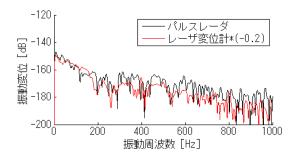


写真-1 レーザ変位計と加振レーダの同時計測の様子



(a) 鉄筋打撃による振動波形



(b) 振動の周波数スペクトル 図-5 レーザ変位計と加振レーダとの振動変位比較

3.3 電磁パルス加振による鉄筋振動計測

次に、本システムの電磁パルス加振における性能評価のため、RC 供試体中の鉄筋をパルス加振しながら振動波形の計測を行った。加振には断面積 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$, 幅 270 mm のコの字型の電磁鋼板コアに片脚 8 巻ずつのコイルを施した励磁コイルを使用した 3)。パルス加振装置は 600 V に充電されたコンデンサをコイルを通じて瞬時に放電しパルス電流を印可する。図-6(a) に流れる電流波形を示す。図より本システムはピーク値 1600 A,半値全幅 0.5 ms のパルス電流を印加可能である。また,図-6(b) に周波数スペクトルを示すが,加振振動は $0 \sim 1 \text{ k}$ Hz 程度の帯域幅の振動応答を測定できる。

RC 供試体寸法は高さ 100 mm×幅 100 mm×長さ 400 mm であり, かぶり 35 mm に D22 鉄筋が埋設されている。鉄筋直上の長手方向に励磁コイルを配置し, 両脚間に給電点間隔 60 mm で送受信アンテナを固定した。

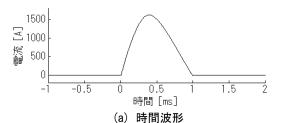
図-7(a)に本システムにおいて従来方式により得ら れる複素レーダ波形を示す。送受信アンテナと鉄筋配置 から 1 ns 付近のピークが鉄筋からの反射波であり、遅延 時間 τ を特定できた。さらに、電磁パルスにより加振を 行いながら、図-7(a)中の破線で示した鉄筋反射波ピー ク時間 τ に計測位置を固定した状態でレーダ応答の位 相変化を抽出し、振動波形に換算した結果を図-7(b)に 示す。尚, 計測波形の再現性を確認するため, 同一条件 にて3回計測した。どの振動波形においても計測時間0 ~30 ms付近に同様の鉄筋振動波形が確認できる。また、 0 s 付近には電磁パルスの振動に関連する 1 ms 以下の鋭 いパルスが現れており、その後加振により構造物の共振 等によって現れたゆっくりした振動が現れている。本シ ステムにより, コンクリート中のかぶり 35 mm 程度の鉄 筋振動を良好な SN 比で再現性よく計測できることがわ かった。

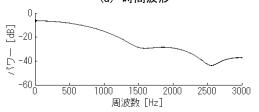
4. 電食中の電磁パルス加振振動モニタリング

4.1 電食試験の概要

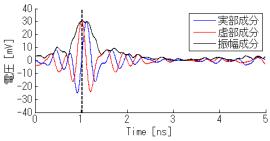
鉄筋腐食によるパルス加振応答の変化を議論するため、この RC 供試体に対し電食試験を行い、その最中の振動波形のモニタリングを行った。図-8 に実験の概略図を示す。鉄筋直上の長手方向に励磁コイルを配置し、コイル両脚間に送受信アンテナを固定し、上面から電磁パルス加振レーダ計測を行う。

電食試験は供試体底面の中央部 80 mm 幅にスポンジを用いて 10%食塩水を浸透させ、鉄筋に陽極、塩水中の銅板に陰極を接続し直流定電流 200 mA を印加した 5。電磁パルス加振による鉄筋変位波形計測は 2 回の同期平均をとり、積算電流 6 A・h までは 200 mA・h 毎、以降は 400 mA・h 毎に実施し、12 A・h まで 46 波形取得し

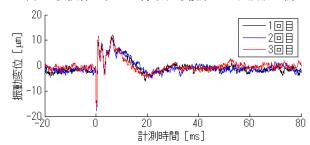




(b) 周波数スペクトル 図-6 パルス加振電流特性



(a) RC 供試体において得られる複素レーダ波形の例



(b) 電磁パルス加振による鉄筋振動波形 図-7 電磁パルス加振測定結果

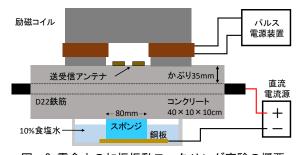


図-8 電食中の加振振動モニタリング実験の概要

た。電食実験終了時の供試体の様子を**写真**-2 に示す。 電食開始後 3.2 A・h で供試体両端部の鉄筋露出部から錆 汁の漏出, 7.2 A・h に端部の錆汁の増加が確認されたが, 12 A・h の電食終了まで供試体中央の鉄筋埋設部にひび 割れ等は確認できなかった。これは,電食初期に供試体 端部から錆汁が漏出したことにより,腐食生成物による 膨張圧が上昇しなかったことが原因であると考えられる。

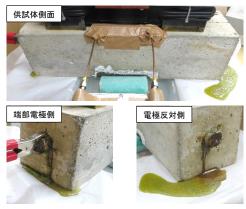


写真-2 電食試験終了時の様子

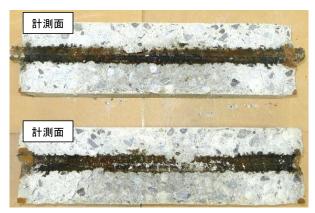
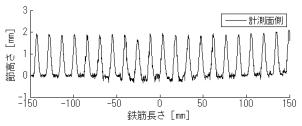


写真-3 電食後の供試体断面の様子

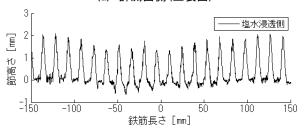
4.2 電食試験における鉄筋劣化の様子

電食終了後の供試体を垂直に分割し、鉄筋周辺部を調べた。写真-3 に供試体断面の様子を示す。塩水浸透領域以外の鉄筋表面にも錆汁が付着していることがわかる。また、写真-3 下の断面の計測面側中央付近にわずかに錆汁の溶出が見られるが、それ以外にコンクリート内への微小ひび割れ等への錆汁の進展は確認できなかった。よって、電食により発生した錆汁の多くは鉄筋に沿って供試体端部から漏出し、内部膨張圧上昇への寄与は限定的であったと考えられる。

次に、腐食による鉄筋の欠損を確認するため、鉄筋を取り出して除錆した後、鉄筋の腐食評価を行った。レーザ変位計とアクチュエータを用いて、鉄筋表面を1次元的に走査し、表面の凹凸を調べた。鉄筋の計測面側と塩水浸透側のそれぞれ1測線での節高さを図ー9(a)、(b)に示す。尚、横軸は鉄筋中央(レーダ計測箇所)を0とし、±150 mm を表示する。±40 mm の範囲に塩水を浸透させ電食を行ったため、範囲外の鉄筋長さ±150 mm 付近はほぼ健全状態であるとみなせる。計測面側の節高さにほとんど変化は見られないが、塩水浸透側では中央付近に腐食が見られ、節高さが0.7 mm 減少した。節高さの減少により鉄筋径が減少し、電食により供試体全体の剛性も低下していると考えられる。



(a) 計測面側(上表面)



(b) 塩水浸透側(下表面) 図-9 電食後の鉄筋の節高さ

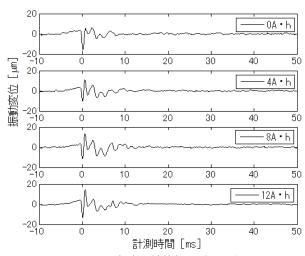


図-10 電食時の鉄筋振動波形の例

4.3 電食による鉄筋振動の周波数特性と振動変位の変化

図-10 に電食試験時の積算電流 0, 4, 8, 12 A・h での 鉄筋振動波形の例を示す。電食の進行により鉄筋振動波 形は振動変位の増加や振動持続時間の増加などの変化が 確認できる。この違いを詳細に議論するためにフーリエ 変換による振動特性の周波数スペクトルを評価した。

図-11 に鉄筋振動波形の周波数スペクトルの積算電流による変化を示す。尚、スペクトルは隣接5点の移動平均により平滑処理を施した。まず、電食開始直後の0A・h付近では240、600 Hz付近にピークが見られるが、4A・hまで進行すると240 Hzの成分は低下し、600 Hzのピークは徐々に低周波側にシフトする周波数依存性を示した。4A・h以降では100 Hz前後の成分が急上昇し、0A・h時に600 Hzであったピークは530 Hzまでシフトした後、その振動成分の大きさが増加していく。さらに、7A・h以降では640、930 Hzにもピークが現れ、その成分の大きさの上昇も確認された。このような振動特性のスペクトル変化は、今回の実験供試体及び励磁コイル全

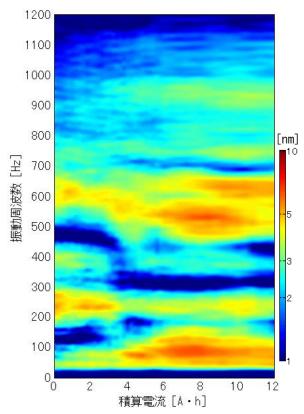


図-11 電食試験による鉄筋振動スペクトルの変化

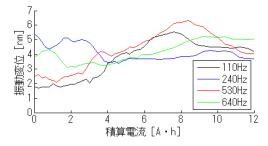


図-12 鉄筋振動変位の電食による積算電流依存性

体の構造系の振動の周波数分布を反映しており、周波数ピークの低周波側へのシフトは、鉄筋腐食にともなう剛性低下により、相対的に高周波の成分が減衰することや、腐食生成物による鉄筋拘束力の低下により振動変位が増加したことを表していると考えられる。

図-12 に図-11 における 110 Hz(従来法の振動周波数)及び 240,530,640 Hz の振動変位を抽出した積算電流依存性を示す。110 Hz の振動成分は 3 A・h から急上昇し、7.6 A・h で健全状態の 3.1 倍の振動変位となるなど、既往の正弦加振における鉄筋振動変位の変化と概ね一致している 4)。また、530 Hz の成分は 2.8 A・h から 8.4 A・h で健全時の 2.5 倍まで上昇し、その振動変位は最も大きかった。この周波数特性は既往の研究 5)とも対応している。また、240 Hz の成分は健全状態から振動変位が低下しており、既往の研究とは異なる変動を起こす周波数があることもわかった。さまざまな周波数での振動変位の変化や共振周波数の変化を評価することで、埋設鉄

筋の劣化状態をより詳細に推定できる可能性も示唆した。 現状では、電磁パルス源の特性から、鉄筋振動の周波数 帯域が 0~1 kHz 程度、可探深度が 6 cm 程度である。そ こで今後は、電磁パルス源の改良により、3 倍程度のパ ルス電流の増加、広帯域化を行い、より再現性の高いコ イル設置法を検討する予定である。

6. まとめ

本論文では、電磁パルス加振による広帯域な鉄筋振動 特性を計測するために、新たに直交検波パルスレーダシ ステム開発し、電食中の RC 供試体の鉄筋振動周波数依 存性を検討した。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 本システムとレーザ変位計において得られるコンクリート内鉄筋の振動特性は相対的に類似していた。
- (2) 本システムは 1600 A の印可電流による電磁パルスを 受けた鉄筋振動波形を明瞭に計測可能。
- (3) 電食による鉄筋腐食により、既報と同様に複数の振動周波数で振動変位が数倍上昇する。
- (4) 腐食の進行に伴って周波数により振動変位は複雑に変化し、ピーク周波数が低下する現象も確認した。 今後、より広帯域な鉄筋振動スペクトルから劣化による機械的な応答との関係を検討していく予定である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(基盤 B, 20H02395) により実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 極檀邦夫, 境友昭: 衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 1521-1526, 2002.
- 2) 内田慎哉,鎌田敏郎,稲熊唯史,長谷川昌明:鉄筋腐食に伴うコンクリート表層部の変状調査への非破壊試験の適用,コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp. 823-828, 2008.
- 3) 宗像晃太郎,鎌田敏郎,内田慎哉,森和也:電磁パルスにより加振したコンクリート内部鉄筋の振動特性に関する基礎研究,コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 2, pp. 781-786, 2007.
- 4) 三輪空司,本多秀聡,富田沙希,中川貴之: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,コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 1605-1610, 2018.
- 5) 三輪空司,松井隼平,中村和弘:加振パルスドップラレーダの開発と鉄筋振動変位の周波数依存性,コンクリート工学年次論文集,Vol. 42, No. 1, pp. 1582-1587, 2020.