

論文 加振パルスレーダによる材料劣化した RC 部材の鉄筋振動変位の空間分布計測

三輪 空司*1・ 中村 和弘*2・ 清水 崇至*2・ 小澤 満津雄*3

要旨：コンクリート中の鉄筋を励磁コイルにより正弦的に加振し、その振動変位を非破壊的に計測する加振レーダ法ではこれまで、計測速度の問題で鉄筋軸方向の定点計測のみが議論されてきた。本論文ではパルスレーダをベースとした加振レーダシステムにより鉄筋と並行にスキャンすることで材料劣化した RC 部材の鉄筋振動変位の空間分布及び評価を試みた。その結果、電食試験では振動変位が概ね全体的に徐々に増加し、腐食鉄筋の節高さの局所的な減少位置に対応して振動変位分布が数 cm の幅で局所的に急上昇することがわかった。また、屋外暴露試験においても腐食ひび割れ位置で振動変位の局所的な増加がみられた。

キーワード：非破壊検査, 電磁波レーダ法, 鉄筋腐食, 鉄筋振動変位, 空間分布

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や超音波法、電磁パルス法といった弾性波を用いた手法が知られており、その伝搬速度や振動振幅の周波数スペクトル情報から、コンクリート強度や内部欠陥、鉄筋腐食等の劣化評価にも適用されている。しかし、弾性波計測はコンクリート表面においてセンサを接触させて計測するため、センサの接触状況の影響を受けやすく、鉄筋等の反射波を利用する劣化評価手法では弾性波伝搬経路のひび割れ等の影響も受けやすい。一方、電磁波は一般的に微細ひび割れ等の伝搬経路の影響を受けにくく、コンクリート内の鉄筋からの反射電磁波はドップラ効果による振動情報を有している。そこで、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 50 Hz 程度で正弦加振させながら、ドップラレーダ法により鉄筋振動変位を計測する加振レーダ法を提案してきた²⁾。

本手法は従来のレーダ波形に加え、振動物体のみ定量的に感度を有する独立なレーダ波形も取得可能であり、両波形の反射波の振幅比から選択的に鉄筋単体の定量的な振動変位の情報を得られる。これまで、RC 供試体を用いた電食試験中の鉄筋振動変位のモニタリングにおいて、振動変位が表面ひび割れ顕在化前から増加し、最終的に 4 倍程度に達するなど、本手法が鉄筋付着特性に感度を有する可能性が示唆されている³⁾。

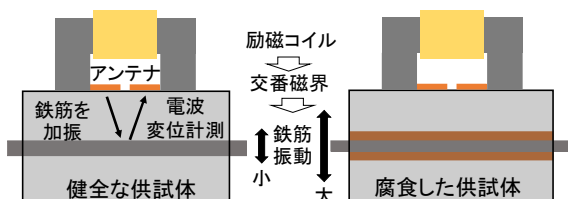


図-1 加振レーダ法のご概念図

また、鉄筋に直交する方向に移動しながら加振レーダ計測を行い合成開口処理によりイメージングすることで、空間分解能を向上させ、不要反射波の影響を低減し、鉄筋部位を高精度に特定するなど複雑な鉄筋コンクリート供試体においても振動変位推定が可能であることを示した³⁾。しかし、既往のネットワークアナライザをベースとした周波数領域での加振レーダ計測システムは外部で振動周波数分だけ変調させることでドップラ成分の計測を行っており、1 点の計測時間が 120 秒と極めて長かった。これは、30cm のスキャン幅の計測では 1 時間程度に対応し、実用性に大きな問題があった。そのため、加振レーダに特化したダイナミックレンジを有するパルスドップラレーダシステムを開発し、従来システムの 1/100 程度の 1 秒程度の計測時間で従来と同等の鉄筋振動変位が計測を実現⁴⁾した。これは、30 cm のスキャン幅の計測で 2 分程度に対応し、実用性が大きく向上した。

したがって、本システムを用い鉄筋と並行にスキャンし、イメージングすれば鉄筋振動変位の空間分布を実用的な時間で評価でき、鉄筋腐食と振動変位の関係を空間分布とともに評価可能になると考えられる。

そこで本論文では電食試験により鉄筋を腐食させながらイメージングベースの振動変位モニタリングを行い、劣化進行時の鉄筋振動変位の空間分布依存性について議論する。また、電食ではなく塩水浸漬と屋外暴露により腐食を促進させた供試体についてもその振動変位の空間分布を計測し、本手法の有効性について議論する。

2. イメージングベースの振動変位計測の原理

図-2 にパルスレーダにおける加振ドップラ変位計測の概念図を示す。パルスレーダにおけるパルス波形として、 $t=0$ でピーク値 1 を持つ任意の単峰性孤立波 $e(t)$

*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 理工学府理工学専攻電子情報・数理教育プログラム 修士課程

*3 群馬大学大学院 理工学府環境創生部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

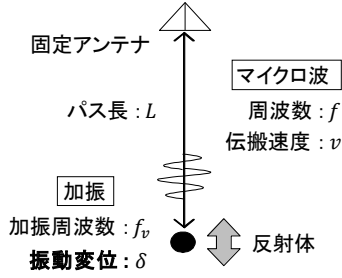


図-2 加振ドップラ変位計測の概念図

を中心周波数 f_c の複素正弦波で変調した複素変調パルス波 $\dot{p}(t)$ を考える。

$$\dot{p}(t) = e^{j2\pi f_c t} e(t) \quad (1)$$

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、複素受信レーダ波形 $\dot{h}(t)$ は反射係数を R 、電磁波の伝搬速度を v として式(2)のように表される。

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

このとき、 $\dot{h}(t)$ の実部は通常のレーダ波形、虚部は実部のヒルベルト変換に対応している。さらに、反射体を単一周波数 f_v 、振動振幅 δ 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、その時間変動を $L(t)$ とすると式(3)のように表される。

$$L(t) = L - \delta \cos(2\pi f_v t) \quad (3)$$

レーダ波形の変動は GHz オーダーであるのに対し、 f_v は数 100 Hz であり、 $L(t)$ の変化速度は極めて遅い。繰り返し時間 T 毎に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 とその取得時間 T は独立とみなせる。ここで、レーダ波形を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 $\dot{h}(t, T)$ を考えると、式(4)のように表される。

$$\dot{h}(t, T) = R\dot{p}\left(t - 2\frac{L - \delta \cos(2\pi f_v T)}{v}\right) \quad (4)$$

ここで、 $\dot{p}(t)$ 、 $\dot{h}(t)$ の時間 t に対するフーリエ変換をそれぞれ $\dot{P}(f)$ 、 $\dot{H}_0(f) = R\dot{P}(f)e^{-j4\pi fL/v}$ とすると、 $\dot{h}(t, T)$ のフーリエ変換 $\dot{H}(f, T)$ は式(5)のように表される。

$$\dot{H}(f, T) = \dot{H}_0(f)e^{j\frac{4\pi f}{v} \cos(2\pi f_v T)} \quad (5)$$

さらに、電磁波の波長 $\lambda = v/f$ は cm オーダーであるのに対し、振動変位 δ は μm オーダーと極めて小さいため $f\delta/v \ll 1$ より、式(5)を 1 次近似すると式(6)が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{H}(f, T) &\cong \dot{H}_0(f)\{1 + j4\pi f\delta \cos(2\pi f_v T)/v\} \\ &\cong \dot{H}_0(f)\left\{1 + j\frac{2\pi f\delta}{v}(e^{j2\pi f_v T} + e^{-j2\pi f_v T})\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\dot{H}(f, T)$ は時間変動のない項と振動周波数 f_v で正弦変化する項に分離している。式(6)を計測時間 T 方

向にフーリエ変換すれば振動周波数 $2f_v$ でのドップラ成分 $\dot{H}_D(f)$ が式(7)のように表される。

$$\dot{H}_D(f) = j2\pi f\dot{H}_0(f)\frac{\delta}{v} \quad (7)$$

ここで、無変調成分 $\dot{H}_0(f)$ は振動周波数 0 Hz でのドップラ成分であり、従来のレーダ信号と等価である。

さらに、 $\dot{H}_0(f)$ 、 $\dot{H}_D(f)$ を周波数 f に対して逆フーリエ変換すれば、無変調成分、ドップラ成分の複素レーダ波形 $\dot{h}_0(t)$ 、 $\dot{h}_D(t)$ がそれぞれ以下のように得られる。

$$\dot{h}_0(t) = R\dot{p}\left(t - \frac{2L}{v}\right) \quad (8)$$

$$\dot{h}_D(t) = \frac{\delta}{v} \frac{d}{dt} \dot{h}_0(t) \quad (9)$$

また、波源 (X, Z) から n 番目のアンテナ位置 $(x_n, 0)$ までの距離 r は式(10)で表される。

$$r(x_n, X, Z) = \sqrt{(x_n - X)^2 + Z^2} \quad (10)$$

光速を c 、比誘電率を ϵ_r とすれば、媒質の伝搬速度は $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$ であり、アンテナ位置 $(x_n, 0)$ で得られた受信波形を $h(x_n, t)$ と表記すると、ある仮想波源 (X, Z) から各アンテナ位置に到来した波の振幅は $h(x_n, 2r/v)$ と表せる。このとき、キルヒホッフマイグレーション法に基づく、無変調成分とドップラ成分に対応したイメージング画像 $\dot{u}_0(X, Z)$ 、 $\dot{u}_D(X, Z)$ は式(11)、(12)で表される。

$$\dot{u}_0(X, Z) = \sum_{n=1}^N \frac{d}{dt} \dot{h}_0(x_n, 2r(x_n, X, Z)/v) \quad (11)$$

$$\dot{u}_D(X, Z) = \sum_{n=1}^N \dot{h}_D(x_n, 2r(x_n, X, Z)/v) \quad (12)$$

式(9)の振動変位の関係より、かぶり深さ z_0 での鉄筋に対応する画像値を用いて、式(13)により鉄筋振動変位の空間分布 $\delta(X)$ が得られる。これが、イメージングベースの鉄筋振動変位推定アルゴリズムである。

$$\delta(X) = v|\dot{h}_D(X, z_0)/\dot{h}_0(X, z_0)| \quad (13)$$

3. 電食時の鉄筋振動変位分布モニタリング実験

3.1 加振パルスレーダシステム

本実験では既往の研究において開発した等価時間サンプリング方式によるパルスレーダシステムを用いた。レーダパルスのパルス幅は 100 ps であり、繰り返し周期を 5 ns とした。受信したレーダ波形はオーバーサンプリングにより 1 ms 周期の波形に引き伸ばされ、24 bit の AD 変換器により、125 kHz でサンプリングされる。したがって、1 s の計測では 1000 個のレーダ波形が得られ、そのドップラ周波数スペクトルにおいて、加振周波数 $f_v/2$ のとき周波数 f_v にピークが現れる。

使用したアンテナはボウタイスロットアンテナであり、アンテナ給電点間隔を 40 mm とし、コイル下部の足の間に配置した。また、コイルとアンテナの間には電磁波吸収体を設置した。

表-1 電食試験に用いたコンクリートの配合・力学特性

水セメント比 W/C [%]	単体量 [kg/m ³]						空気量 [%]	圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 [kN/mm ²]
	水 W	セメント C	細骨材 S		粗骨材 G	混和剤 Ad				
			S1	S2						
63	180	285	376	376	1155	2.85	4.5	28.2	4.45	31.2

励磁コイルは100層の積層電磁鋼板を使用し、断面積は38mm×60mm、横幅205mmの円弧状のコイルで、エナメル線を750巻きしている。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7Aであり、共振器の共振周波数から印加周波数は53Hzとした。

移動計測ではアンテナ位置の再現性を高めるためリニアアクチュエータを用いた移動機構を製作した。コイルとアンテナを固定する治具の4隅にはボールベアリングが設置されており、コンクリート表面を滑らかに移動できる。これを移動機構に固定しPC制御により5mm毎に鉄筋直上を1次元的に逐次移動させながら1s間の加振レーダ計測を行うことで、300mm区間を2分でスキャン計測する。

3.2 RC 供試体の概要

計測に用いたRC供試体は高さ100mm×幅100mm×長さ300mmであり、鉄筋かぶり30mmの位置にD13, D16, D19鉄筋各1本を配置した3体の供試体を使用した。尚、鉄筋端部は腐食保護していない。表-1にコンクリートの配合等を示す。塩化物イオンを容易に導入するためW/Cを63%とし、圧縮強度は28.2N/mm²であった。

3.3 電食試験の概要

図-3に電食試験の概要を示す。図のように、下面からの電食試験中に上面から加振レーダ計測を実施した。電食は10%食塩水中に浸漬した銅板を陰極、鉄筋に陽極を接続し、印可電流を0.2Aの定電流として通電した。コンクリートに塩化物イオンを局部的に導入するために、供試体の底面の中央部から長さ60mm区間にスポンジを用いて局部的に食塩水を浸透させた⁴⁾。

また、加振レーダによるスキャン測定は、積算電流0.5A・h毎に、10A・hまで21回繰り返した。D13鉄筋の供試体において電食開始後3A・hで計測面の中央部にひび割れ、錆び汁の漏出が確認された。一方、D16, D19鉄筋の供試体では供試体の鉄筋端部から微量の錆汁の漏出が見られた。このため、D13と比べ腐食生成物による膨張圧上昇にともなう内部ひび割れの発生は限定的である可能性がある。

3.4 実験結果

図-4にD13鉄筋供試体の中央において計測した健全状態における加振レーダ計測時の包絡線波形の例を示す。ドップラ成分は106Hzにおけるドップラ周波数成分でのレーダ波形の振幅を1000倍したものである。無変調

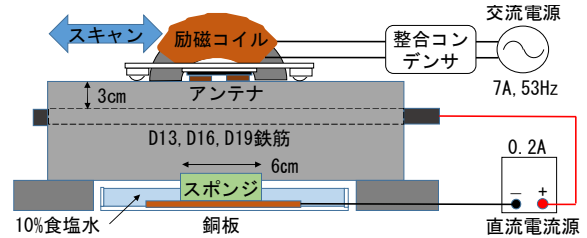


図-3 電食試験の概要

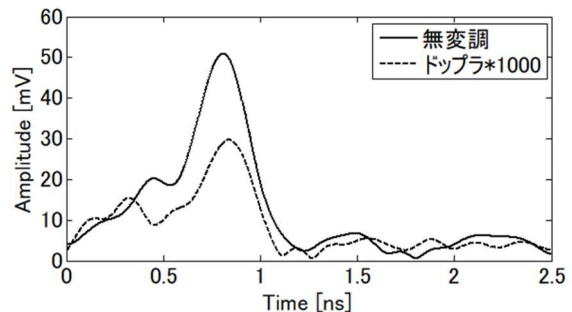


図-4 健全時の加振レーダ包絡線波形の例 (D13鉄筋供試体, 中央, 積算電流0A・h)

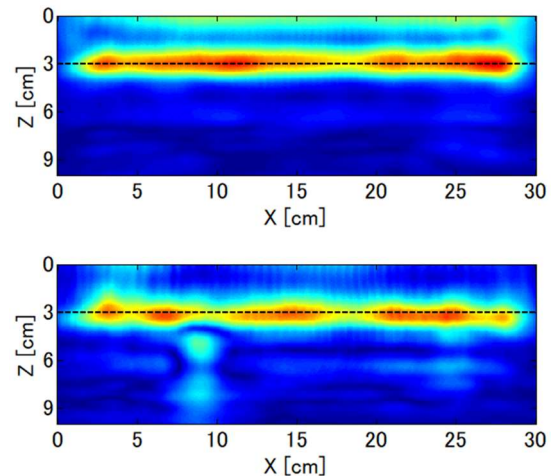


図-5 健全時の加振レーダスキャン計測におけるイメージング例 (D13鉄筋供試体, 積算電流0A・h)

上図：無変調成分, 下図：ドップラ成分

成分は50mV程度の振幅のピークが0.8ns付近に見られており、これがかぶり30mmの鉄筋からの反射波に相当する。また、ドップラ成分もほぼ同様な位置にピークを有しており、十分なSN比でレーダ波形が得られていることがわかる。

図-5にD13鉄筋供試体の健全時の加振レーダスキャン計測において得られた加振レーダ信号のイメージング結果を示す。尚、コンクリートの比誘電率を11としたとき、深さ30mmにおいて全てのスキャン方向で両成分と

もに鉄筋の反射応答が見られており、概ね良好なイメージング結果が得られていることがわかる。

図-6 にこのイメージング結果をもとに鉄筋の振動変位を求めた結果を示す。尚、積算電流 $5\text{ A}\cdot\text{h}$ 、 $10\text{ A}\cdot\text{h}$ での結果も同様に示す。積算電流 $0\text{ A}\cdot\text{h}$ では概ね $3\text{ }\mu\text{m}$ の振動変位であり、スキャン方向の変動は小さいことからスキャン計測においても再現性の高い振動変位が得られることがわかる。積算電流 $5\text{ A}\cdot\text{h}$ では 12 cm 付近の振動変位が $9\text{ }\mu\text{m}$ と3倍程度上昇しており、 $6\text{ A}\cdot\text{h}$ から供試体上面の 12 cm の位置に表面ひび割れ伸展にともなう錆び汁の漏出が見られた。また、全体的に振動変位の上昇が見られ、 $10\text{ A}\cdot\text{h}$ では 22 cm 付近が最も大きくなるといった空間分布の明瞭な変化が見られる。

図-7 に各供試体での鉄筋振動変位空間分布の積算電流依存性を示す。D13 供試体では 12 cm の局所的な振動変位は錆汁漏出前の $3\text{ A}\cdot\text{h}$ から増加し始めており、この位置の振動変位増加から内部ひび割れ伸展の予兆を捉えられる可能性がある。一方、 22 cm 付近は 5 cm 程度の幅に広がりながら局所的に振動変位が上昇している様子がわかる。また、D16 供試体では積算電流によって計測時のスキャン時の凹凸等の問題で積算電流毎の再現性が悪化しているものの、D13 と同様に空間的に局在した振動変位の上昇が見られる。D19 供試体では、全体的に徐々に振動変位が増加していき、 $7\text{ A}\cdot\text{h}$ 以降で 14 cm 付近に局所的な振動変位増加が見られた。また、振動変位は小さいものの 6 cm 付近で局所的な振動変位増加が見られている。

このように、同一条件の電食試験においても振動変位上昇の時間的、空間的変化が異なることがわかる。これは、腐食生成物による膨張圧の上昇と腐食生成物のコンクリート内部での伸展による膨張圧開放のタイミングが異なることを反映している可能性が考えられる。

この振動変位の局所増加と鉄筋腐食の影響を議論するため、鉄筋を供試体から取り出し、濃度 10% のクエン酸水素二アンモニウムに 24 時間漬けて除錆した後、レーザ変位計をアクチュエータで鉄筋と並行にスキャンすることにより鉄筋の節高さを評価した結果を図-8 に示す。図は腐食後の鉄筋の計測面(上部)、電食面側(下部)の2側線を計測した結果である。図より、節上部に比べ節下部は吸水位置を中心とした $X=10\sim 20\text{ cm}$ の位置で節高さの減少が見られる。図-7 において振動変位の局所的な増加が見られた D13 の $12, 22\text{ cm}$ 、D16 の $13, 18\text{ cm}$ 、D19 の 14 cm の位置の近傍である点線で囲まれた部位は比較的大きく減少する傾向が見られた。鉄筋の局所的な腐食位置と振動変位の局所的な増加位置は完全に一致はしないものの、このことより局所的な腐食が振動変位の局所増加に寄与している可能性がある。

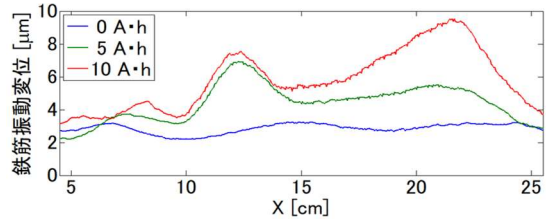
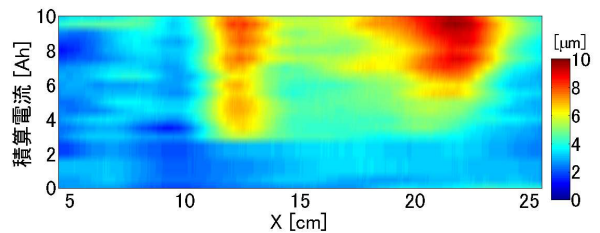
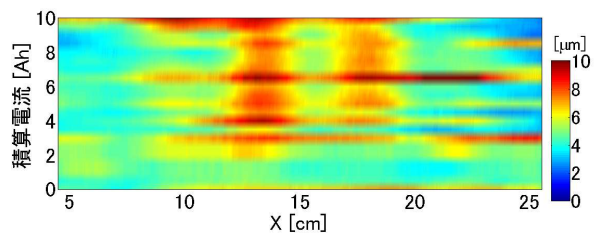


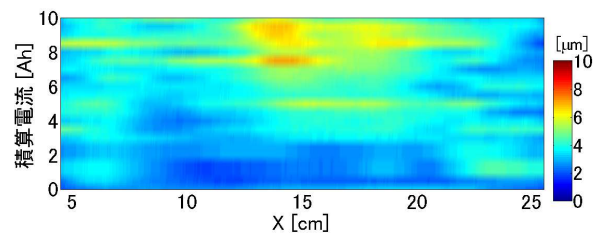
図-6 D13 鉄筋供試体の鉄筋振動変位の空間分布の例



(a) D13 鉄筋供試体



(b) D16 鉄筋供試体



(c) D19 鉄筋供試体

図-7 振動変位分布の電食時の積算電流依存性

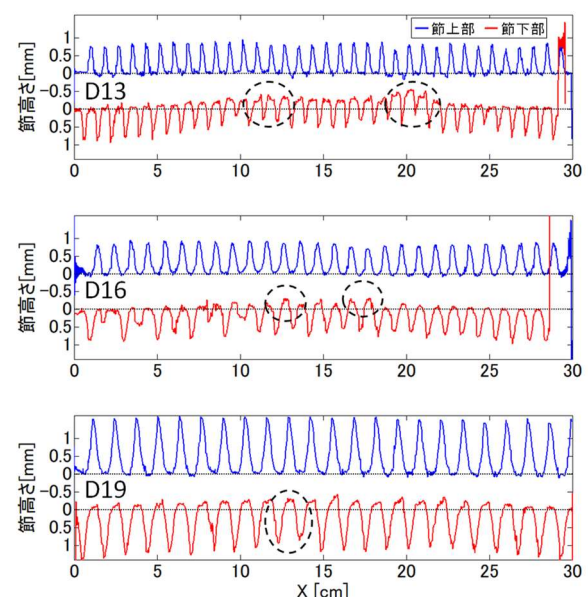


図-8 取り出した鉄筋のレーザ変位計による節高さ

表-2 コンクリートの配合・フレッシュ性状・力学特性

W/C [%]	s/a	単体量 [kg/m ³]						スランプ [cm]	空気量 [%]	含水率 [%]	圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 [kN/mm ²]
		W	C	S		G	Ad						
				S1	S2								
47	0.25	175	375	345	345	1151	3.75	7.0	6.5	3.7	51.6	4.45	39.6

4. 劣化した RC 供試体の鉄筋振動変位分布計測

4.1 RC 供試体の概要

加振レーダ法による鉄筋振動変位の空間分布計測において電食試験では振動変位の局在化が見られたが、一般に、強制的に電流を急速に印可する電食試験と実際の腐食状況では腐食生成物の生成過程が異なる。そこで、塩水浸漬と屋外暴露を繰り返すことで、より実際に近い部材劣化状態での実験を行った。RC 供試体に使用したコンクリートの配合、フレッシュ性状および強度特性を表-2 に示す。力学特性は材齢 5 ヶ月時で圧縮強度と弾性係数はそれぞれ、51.6 N/mm² と 39.6 kN/mm² であった。W/C は 47% とし、セメントは早強セメントを使用した。混和材は AE 減水剤を使用した。

作製した RC 供試体の概要を図-9 に示す。供試体寸法は高さ 150mm × 幅 100mm × 長さ 1500mm の RC はり供試体 4 体であり、引張鉄筋は主筋 D13 を 2 本配置した。供試体の脱型後は 3 ヶ月間水中養生を実施し、その後気中養生を 1 ヶ月行った。

屋外暴露による劣化を促進するため、迫井らの実験を参考にして供試体表面を加熱し⁹⁾、劣化因子の侵入抵抗性を低下させた。加熱には電気炉を使用し、加熱曲線として、約 16 °C/min で炉内温度を 800 °C まで上昇させた後、3 時間保持し、外気温まで自然冷却した。

供試体の種類は #1~#4 の 4 種類とする。#1 供試体は加熱を行わないコントロール供試体であり、#2 はかぶり面中央部、#3 はかぶり面と反対側の中央部、#4 は #2 供試体の加熱位置を 42 mm ずらした位置を加熱した。計測面はかぶり面側で実施し、加熱面に対応した水平位置の 300 mm 区間とした。

供試体は加熱後 10% 塩化ナトリウム水溶液に 1 か月間浸漬し、17 ヶ月の屋外曝露後、鉄筋振動変位の 1 回目の空間分布計測を行い、再度、同様の塩水浸漬、1 ヶ月の屋外暴露後、2 回目の再計測を実施した。

4.2 加振レーダ実験の概要と結果

加振レーダ計測の様子を図-10 に示す。供試体は幅 10 cm であり 2 本の鉄筋が中心から偏心しており、レーダ計測時に供試体側面の反射の影響を受けやすいため、できるだけ複数体の供試体で挟み込み、空隙の影響をなくした状態でスキャンを行った。尚、加振レーダ計測の実験条件は第三章と同じとした。供試体には 2 本の鉄筋があるためスキャン方向に向かって左側の鉄筋を L、右側の鉄筋を R として区別する。

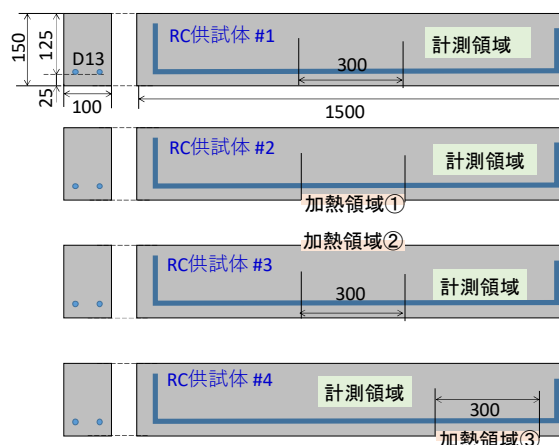


図-9 作製した RC はり供試体の概要

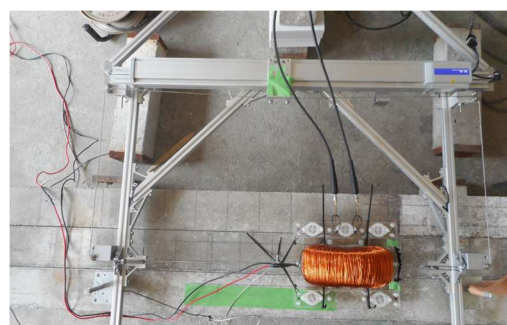


図-10 加振レーダ計測の様子

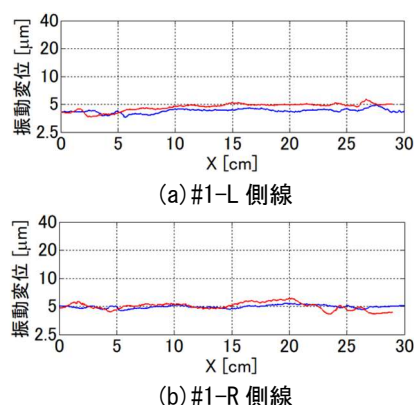


図-11 健全供試体の鉄筋振動変位分布

図-11 にコントロール供試体の二本の鉄筋直上の側線 L, R において得られる鉄筋振動変位の空間分布を示す。尚、縦軸は対数スケールとなっており、青線、赤線はそれぞれ 1, 2 回目の塩水浸漬及び屋外暴露後の計測に対応する。図より、コントロール供試体の鉄筋振動変位は空間的な変動は小さく、ほぼ 4~5 μm と既往の健全供試体の振動変位と同程度であった²⁾。尚、この供試体の鉄筋を取り出したところ鉄筋腐食は見られなかった。

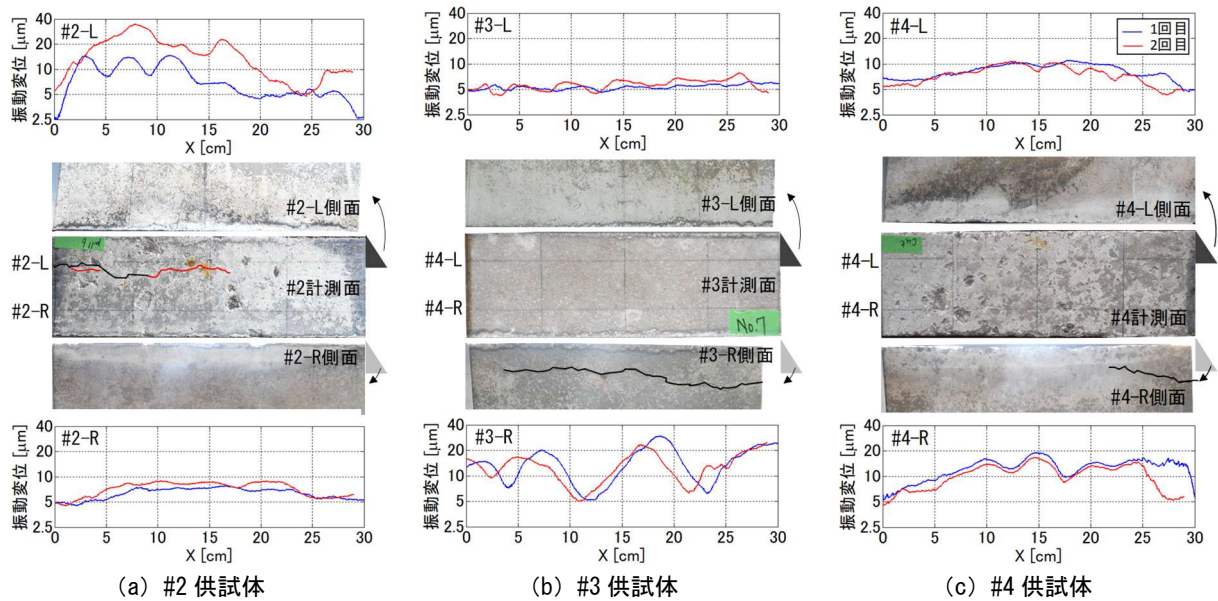


図-12 各供試体の計測後のひび割れの様子と加振レーダによる鉄筋振動変位の空間分布(1回目:青線, 2回目:赤線)

図-12 に各供試体での振動変位空間分布の結果と計測後の供試体の計測面、側面の写真を同一スケールに合わせた結果を示す。尚、1、2回目の計測時に確認された腐食ひび割れをそれぞれ黒線、赤線で示す。振動変位は腐食ひび割れの確認された側線#2-L、#3-R、#4-Rで数10 μm もの鉄筋動変位を示しており、鉄筋腐食と振動変位の増加が対応していることがわかる。また、振動変位の空間分布においても電食試験と同様に局所的な振動変位増加が確認できる。

また、再劣化の振動変位変化は概ね少ないものの、#2供試体では顕著に振動変位が上昇しており、上昇部とひび割れ進展の先端部が一致することが確認できた。これは、ひび割れが加熱面側に現れたため、塩水浸漬での塩化物イオンの浸透や屋外暴露での酸素供給が多くなり劣化がより進行したものと考えられる。

5. まとめ

本論文は加振パルスレーダを用いて鉄筋直上を鉄筋に沿ってスキャンし、鉄筋振動変位分布と鉄筋コンクリートの腐食状況との対応を検討した。これにより以下のことが明らかとなった。

- (1) 電食試験により、加振レーダにより鉄筋振動変位の数cmの幅での局所的な増加を捉えることができた。
- (2) 鉄筋振動変位の局所的増加とレーザ変位計により得られる鉄筋腐食の位置に対応が見られた。
- (3) 鉄筋腐食は電食による振動変位増加勾配が急な場合は局所的に、緩やかな場合は比較的幅広く増加する。
- (4) 塩水浸漬、屋外暴露による劣化試験においても腐食ひび割れの発生した鉄筋では健全時に比べ6倍程度の振動変位の増加が見られた。

- (5) 局所的な振動変位の増加も見られ、鉄筋振動変位から鉄筋の健全性を評価するためには、加振レーダをスキャンする計測が有効であることを示した。

今後、劣化した実構造物での振動変位と劣化程度との定量的な関係を検討していく予定である。

謝辞

本研究は総務省SCOPE(191503004)の委託を受けた。また、一部は科学研究費補助金20H02395により実施した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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, pp. 1605-1610, 2018.
- 3) 堀内亮太, 三輪空司: 加振レーダを用いたイメージングによる鉄筋部位の高精度振動変位推定, 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, Vol. 18, pp. 403-408, 2018.
- 4) 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, pp. 1588-1593, 2020.
- 5) 迫井裕樹, 小澤満津雄, 山本哲, 阿久津裕亮: 高温加熱を受けたRCはりの損傷評価および耐荷力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, pp. 1025-1030, 2019.