

論文 2D加振レーダスキャン計測による健全RC供試体の鉄筋振動変位の分散評価と腐食閾値の検討

三輪 空司*1・中澤 有理*2・小澤 満津雄*3・津野 和宏*4

要旨: 近年, RC 構造物の定量的な非破壊的な劣化診断技術が求められている。これまで, 交流を印可した励磁コイルによる鉄筋振動をドップラレーダによりスキャンし, 鉄筋の振動変位の空間分布を評価可能な加振レーダ計測システムを開発し, 腐食程度との相関を検討してきた。本論文では様々な鉄筋かぶりと鉄筋径において健全 RC 供試体の鉄筋振動変位分布の分散を評価することで, 鉄筋腐食の判定が可能な振動変位の閾値を評価した。その評価値を用い, 150 日の塩水散布暴露試験後の RC 供試体に対し腐食判定を行った結果, 8 箇所の腐食位置のうち微小な腐食を含む 6 箇所において実際の腐食位置と合致する腐食判定結果となった。

キーワード: 電磁波レーダ法, 3D イメージング, 鉄筋加振, 振動変位, 鉄筋腐食

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)構造物の劣化要因の多くは最終的に鉄筋腐食を伴うため, その非破壊的な評価が重要である。現在, 自然電位法や分極抵抗法といった電気化学的手法が実用的に用いられているものの, 前者は腐食の可能性を, 後者は腐食速度を, それぞれ評価可能な微破壊的な検査手法であり, 現在の腐食程度を定量的に評価することは困難な場合がある。また, 非破壊的な検査手法のうち衝撃弾性波法¹⁾⁴⁾や超音波法⁵⁾等の弾性波を用いた手法は腐食による付着力の低下や微小き裂の発生を弾性波の伝搬速度や波形エネルギーの変化としてとらえる手法であり, 精力的に検討されているものの, 鉄筋と伝搬経路のひび割れ等の劣化の影響を受けやすく定量性に問題がある。

そこで, 我々はひび割れ等の影響を受けにくい電磁波に着目し, 励磁コイルによりコンクリート中の鉄筋を 60 Hz 程度で正弦加振させながら, ドップラレーダにより計測面方向の鉄筋の振動変位を計測する加振レーダ法⁶⁾を提案し, レーダを鉄筋に沿って一次元(1D)スキャンすることにより, 鉄筋軸方向の振動変位の空間分布(以降, 鉄筋振動変位分布)を計測可能なシステムを開発した。先行研究において, 電食試験⁷⁾や複合サイクル腐食試験⁸⁾により腐食させた RC 供試体の鉄筋腐食位置と本手法で得られる鉄筋振動変位分布の局所的な増加の位置とが対応していることを確認している。

鉄筋振動変位は鉄筋かぶりや鉄筋径に依存する電磁的な加振力に影響を受けるが, 一方で, 同じ鉄筋径と鉄筋かぶりであっても, 振動変位には非系統的なばらつきがあることが経験的にわかっており, 腐食評価をする上で健全な RC 供試体の鉄筋振動変位の基準値を定めることが困難であった。そのばらつきの要因として, 本手法でのイメージ

ングベースの鉄筋振動変位分布の評価では, かぶりコンクリートの粗骨材や水分による不均質な比誘電率, 導電率分布を一様に仮定していることやそれらの不要応答の干渉により現れるイメージング法固有のクラッタ雑音の影響等が考えられる。そこで, 鉄筋軸と直交方向に 2D スキャンできれば 3D イメージングの空間平均効果により, これらの影響を低減することが期待でき, さらに SN 比改善により加振電流を下げられれば, コイルの温度上昇に伴う加振力の変動によるばらつきを抑える効果も期待できる。

そこで, 本論文では開発した加振レーダの 2D スキャンシステムについて概説し, 鉄筋径, かぶりを変えた健全な RC 供試体 30 体において系統的にその鉄筋振動変位分布の平均値, ばらつきの程度や鉄筋径, 鉄筋かぶりに対する依存性を評価し, 振動変位の腐食閾値を検討した結果について述べる。さらに, 塩水散布により鉄筋を腐食させた RC 供試体について, その閾値の妥当性を検証した結果について報告する。

2. 加振レーダ法による鉄筋振動変位分布計測原理

加振レーダ法による振動変位分布の計測の流れを図-1 に示す。ここで, 距離 L にある反射係数 R の反射体が振動変位 δ , 振動周波数 f_v , 初期位相 θ で正弦的に振動しているものとし, この反射体にレーダパルスを繰り返し照射して得られる反射パルス列の時刻歴応答を考える。図-1 のように 1 周期分の時刻歴波形を抽出し, 繰り返し周期毎に並べ替えて得られる 2 次元複素レーダプロファイル $\hat{h}(t, T)$ は式(1)のように表される。

$$\hat{h}(t, T) = R\hat{p}\left(t - 2\frac{L - \delta\cos(2\pi f_v T + \theta)}{v}\right) \quad (1)$$

ここで, t はレーダの遅延時間, T はパルス照射開始後の経

*1 群馬大学大学院 理工学府電子情報部門教授 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 修士課程

*3 群馬大学大学院 理工学府環境創生部門教授 博士 (工学) (正会員)

*4 国土館大学 理工学部理工学科まちづくり学系教授 博士 (工学) (正会員)

過時間、 v は媒質の伝搬速度であり、光速を c 、比誘電率を ϵ_r としたとき $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$ で表される。また、 $p(t)$ は $t = 0$ で絶対値のピークを持つ単峰性複素パルス波を表す。

その後、 $\hat{h}(t, T)$ を T 方向にフーリエ変換し、直流及び振動による正負のドップラ周波数成分を取り出すことで、無変調成分 $\hat{h}_0(t)$ とドップラ成分 $\hat{h}_{\pm}(t)$ がそれぞれ式(2)、(3)のように独立に得られる。

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

$$\hat{h}_{\pm}(t) = e^{\mp j\theta} \frac{\delta}{v} \frac{d}{dt} \hat{h}_0(t) \quad (3)$$

振動の初期位相 θ は計測可能であり、各位相項を補正し、SN 比を向上させたドップラ成分 $\hat{h}_d(t)$ が式(4)で得られる。

$$\hat{h}_d(t) = \frac{\hat{h}_+(t)e^{j\theta} + \hat{h}_-(t)e^{-j\theta}}{2} = \frac{\delta}{v} \frac{d}{dt} \hat{h}_0(t) \quad (4)$$

ドップラ成分は無変調成分の時間微分と相似であるが、通常、得られた時間波形は指向性の広いアンテナにより広範囲の不要な反射体情報も含んでおり、アンテナを移動させて得られた多数のレーダ波形の合成開口イメージング⁷⁾により不要反射の低減を行う。 n 番目のアンテナ位置 $(x_n, y_n, 0)$ から反射源 (x, y, z) で反射し、再びアンテナに戻った際の遅延時間 τ_n は式(5)で表せる。

$$\tau_n = 2\sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + z^2}/v \quad (5)$$

n 番目のアンテナ位置で得られた受信波形を $\hat{h}(t, x_n, y_n)$ と表記すると、無変調成分とドップラ成分に対応した3Dイメージング画像 $\hat{u}_0(x, y, z)$ と $\hat{u}_d(x, y, z)$ はそれぞれ式(6)と式(7)で表される。

$$\hat{u}_0(x, y, z) = \sum_{n=1}^N \frac{d}{dt} \hat{h}_0(\tau_n, x_n, y_n) \quad (6)$$

$$\hat{u}_d(x, y, z) = \sum_{n=1}^N \hat{h}_d(\tau_n, x_n, y_n) \quad (7)$$

ここで、再構成領域はアンテナ位置とは独立であり、走査範囲に対しアンテナの感度領域分広く推定できる。したがって、座標 (y_r, z_r) にある x 軸に平行な鉄筋の振動変位分布 $\delta(x)$ は式(8)のように推定される。

$$\delta(x) = v \left| \frac{\hat{u}_d(x, y_r, z_r)}{\hat{u}_0(x, y_r, z_r)} \right| \quad (8)$$

3. 加振レーダの2D スキャンシステムの概要

本研究における実験システムを写真-1に示す。鉄筋の加振に使用した励磁コイルは外形205 mm、内径129 mm、厚み60 mmの半トロイダル状の積層電磁鋼板コア(100層)

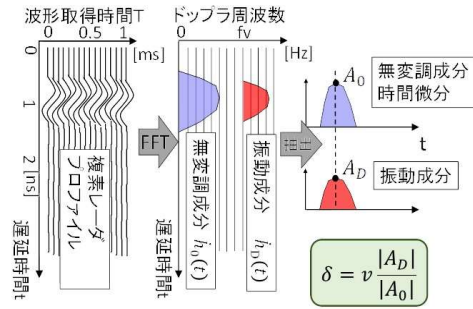


図-1 加振レーダ法による振動変位計測の流れ

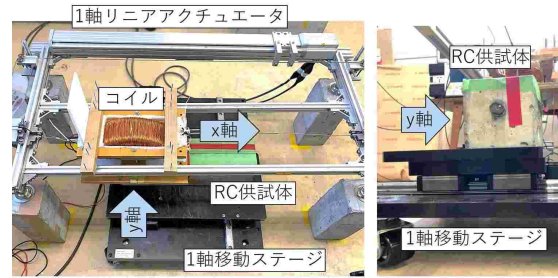


写真-1 加振レーダの2D スキャンシステム

にエナメル線を750巻きしている⁷⁾。このコイルにコンデンサを介して直列共振させることで実効値6 Arms、加振周波数 $f_0 = 68$ Hzの交流電流を印加した。使用したアンテナはボウタイスロットアンテナ⁸⁾であり、コイル磁極間の空間に送受信アンテナの給電点間隔が42 mmになるよう配置し、供試体内のインパルス応答を計測した。

本レーダシステムは繰り返し周期5 ns、パルス幅0.1 nsのパルス列を出力可能な等価時間サンプリング方式のインパルスレーダシステム⁷⁾であり、レーダ信号は繰り返し周波数 $f_r = 1.02$ kHz (=15 f_0)に引き伸ばされる。この信号を標準化周波数249.9 kHz (=245 f_r)でサンプリングした。

2D スキャンにおいて、コイルはボールベアリングで鉄筋(x軸方向)のフレーム上に保持され、既往の研究⁸⁾で用いたPC制御の1軸リニアアクチュエータによりフレーム上を滑らかに移動しながら、距離センサによりコイル位置を測距できる。また、新たに鉄筋軸と直交する(y)方向のスクリーンにはPC制御の1軸移動ステージ上にRC供試体を設置することで2D スキャンを可能とした。

4. 健全RC供試体計測実験

4.1 供試体概要

使用したRC供試体の配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は栃木県産の砕砂、粗骨材には群馬県みどり市産、栃木県佐野市産の砕石を使用

表-1 実験に使用したRC供試体の配合と力学特性(材齢5ヶ月)

最大粗骨材 寸法 [mm]	水セメント比 W/C [%]	細骨材率 s/a [%]	単位量[kg/m ³]							圧縮強度 [N/mm ²]	弾性係数 [kN/mm ²]
			W	C	S1	S2	G1	G2	Ad		
20	49.5	51.0	183	370	439	439	634	271	4.07	44.3	30.3

した。RC 供試体の寸法は図-2 に示すように L400×D100×H100 mm であり、鉄筋が供試体外に露出しないよう長さ 350 mm の SD345 異形鉄筋を用い、線膨張係数がコンクリートと同様なスペーサによって鉄筋を保持した。鉄筋かぶりは 30, 35, 40, 45, 50 mm の 5 種類、鉄筋径を D13, D16, D19 の 3 種類とし、それぞれ 2 体ずつ計 30 体を図-2 において計測面を下面として打設した。脱型後は 28 日間の湿布養生を行い、養生後室内にて気中放置した。材齢 5 ヶ月での供試体の力学特性を表-1 に示す。なお、実験時の材齢は 515 日であり、供試体にひび割れ等のコンクリートの変状は見られなかった。

4.2 計測概要

横幅 205 mm のコイルと内部の鉄筋の位置関係は図-3 のようであり、コイル磁極が鉄筋端部から大きく離れないよう供試体端部からコイル中心が 100 mm の位置を計測開始点、鉄筋長手方向 (x 方向) の走査範囲を 200 mm とし、50 mm/s で等速にスキャンした。奥行き方向 (y 方向) は供試体中心から前後±25 mm の区間を 2 mm 間隔の逐次移動とし、全 26 測線を 6 分程度で計測した。なお、供試体とアンテナ間の間隔が 1 mm 程度になるように供試体を設置し、加振電流は 6 Arms とした。

4.3 鉄筋振動変位分布計測結果

図-4 にかぶり 35 mm, D16 鉄筋の供試体に対して加振レーダの 2D スキャンによって得られたドップラ成分の 3D イメージを示す。なお、無変調成分での底面の反射波が 100 mm となるよう比誘電率を 9 に設定した。一般に、ドップラ成分は無変調成分に比べ 1/1000 程度の振幅であるが、不要反射応答は低減されており、高い SN 比で鉄筋の反射振幅を推定可能であることがわかる。鉄筋の反射ピークは概ね設定したかぶり厚さ+5 mm を中心に数 mm の範囲で変動しており、比誘電率の不均質により鉄筋イメージが乱れることが、振動変位推定に誤差を生む一因となる。

図-5 に yz 断面の鉄筋位置近傍でのピーク振幅から(8)式を用いて推定した $\delta(x)$ の例を示す。なお、縦軸は対数スケールである。図より、いずれの供試体も鉄筋位置によって 1.2 倍程度の範囲でばらつきがあり、伝搬速度や鉄筋の付着特性、鉄筋周囲の弾性係数の不均質性の影響が考えられる。また、 $\delta(x)$ の平均値はかぶり厚や鉄筋径の違いに対して系統的な変化が見られることがわかる。

電磁気理論では一般にかぶりが厚いほど、また鉄筋径が細かいほど加振力が減少すると考えられるが、 $\delta(x)$ の平均値やばらつきを系統的に評価するため、鉄筋径 3 種類、かぶり 5 種類、N=2 で得られる 30 体の $\delta(x)$ に対し、それぞれ 10 mm 毎に抽出した 600 点の $\delta(x)$ をかぶり厚に対してプロットした結果を図-6 に示す。図より、かぶり厚に対応して $\delta(x)$ は概ね減少するものの、鉄筋径については細いほど増加する傾向が見られた。これは、かぶりコンクリート

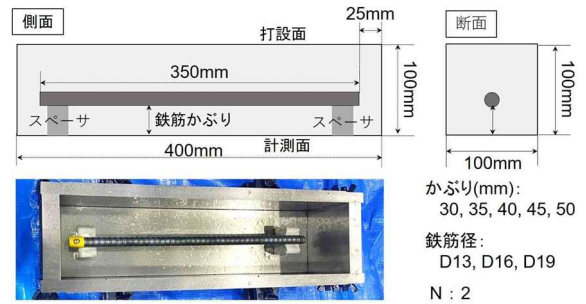


図-2 RC 供試体の概要

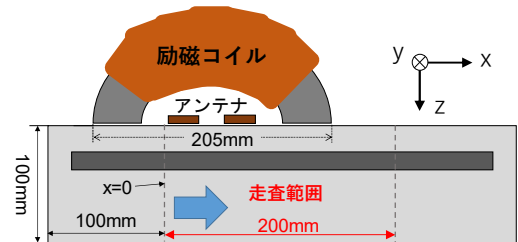


図-3 加振レーダ法での健全 RC 供試体の計測状況

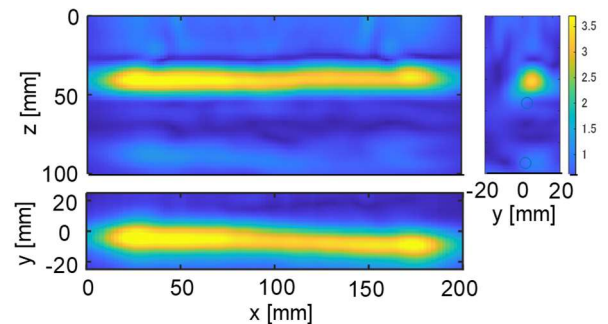


図-4 加振レーダの 2D スキャン計測によるドップラ成分の 3D イメージ例 (かぶり 35mm, D16, No. 1)

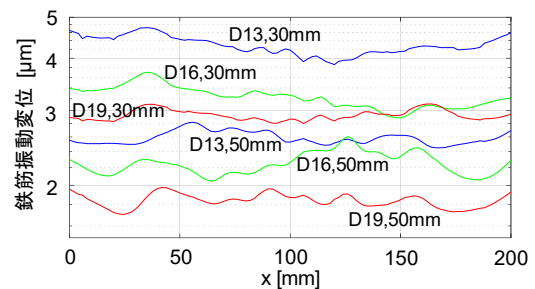


図-5 推定した鉄筋振動変位分布の例

に作用する鉄筋の有効断面積の減少に伴い、鉄筋がかぶりコンクリートに与える応力は増加するため、鉄筋径が細いほど $\delta(x)$ が増加したものと推察される。

4.4 鉄筋振動変位のばらつき評価

図-6 より対数表示した $\delta(x)$ とかぶり厚 z_r は概ね直線関係にあることがわかる。そこで、各鉄筋径でその傾き α は同じと仮定して式(9)のようにモデル化し、その常用対数に対して最小二乗フィッティングを行い、傾き α 、 $z_r=30$ mm での鉄筋径 ϕ [mm]での推定値 $\delta_{30}(\phi)$ を推定した。

$$\delta(\varphi, z_r) = \delta_{30}(\varphi)10^{\alpha(30-z_r)} \quad (9)$$

図-7にかぶり、径毎に同一パラメータの供試体2体の平均 $\delta(x)$ を○印、フィッティングより得られる推定直線を黒点線で示す。推定値 $\delta_{30}(13)$, $\delta_{30}(16)$, $\delta_{30}(19)$ はそれぞれ3.77, 3.34, 2.83 μm であり、傾きは0.8倍/10mmであった。また、このときの推定直線と計測値の差の標準偏差 σ は1.11倍に対応し、健全供試体全体の誘電率、鉄筋付着力、弾性率等の不均質性によるばらつきは $\delta(x)$ に σ 程度のばらつきを与えらる。また、同図の赤線に各鉄筋径での 3σ ラインを示す。これらは、各推定直線の1.38倍(=1.11の3乗)となるが、統計的には健全状態の供試体の $\delta(x)$ が局所的に 3σ ラインを超える確率は0.3%程度と極めて低い。一般に、鉄筋付着力低下等のメカニカルな影響が数十mmのオーダーで局所的に表れることは考えにくく、 $\delta(x)$ が 3σ ラインを超える要因は鉄筋に比べ動きやすく、かつ強磁性を有する黒錆(Fe_3O_4)が電磁石の磁界に反応して局所的に振動する電磁気的なメカニズム⁸⁾の寄与が大きいと推察している。

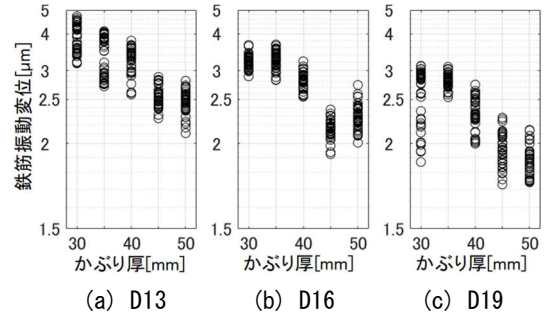


図-6 全供試体での10mm毎の $\delta(x)$ のばらつき

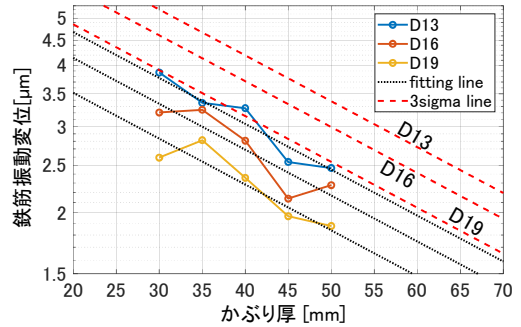


図-7 鉄筋振動変位のフィッティングと基準値推定

5. 塩水散布により腐食したRC供試体の腐食評価

5.1 RC供試体の概要

4章で得られた腐食基準値について、異なるコンクリート供試体においてその妥当性を検討した。実験に使用したRC供試体の配合を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は川砂利を使用した。寸法はL400×D100×H100mmであり、かぶり30mmに長さ700mmのD13鉄筋を貫通させるように埋設し、計12体を計測面を下面として打設した。3日間の型枠内湿潤養生の後、気中暴露し、コンクリートの28日圧縮強度は32.0 N/mm²であった。塩化物イオンが浸透するようW/Cを大きくしたもの、打設面の反対側が計測面であり、振動変位へのブリーディングの影響は少ないと考えられる。

その後、概ね20~28℃程度の実験室内において気中暴露しながら、週に2回程度計測面側からじょうろにより100cc程度の水、及び腐食促進のため塩分濃度26%の塩水をそれぞれ6体ずつ散布した。150日の暴露試験後のRC供試体の様子を写真-2に示す。暴露後、表面き裂は確認できなかった。塩水供試体は表面に塩が析出しており、塩化物イオンの浸透深さは不明であるが、割裂後鉄筋に明らかな腐食が確認できた。また、鉄筋露出部からの塩分による腐食も見られた。一方、水散布供試体は割裂後、鉄筋腐食は確認できなかったため、健全供試体として取り扱う。



(a) 水散布供試体



(b) 26%塩水散布供試体

写真-2 150日間屋外暴露したRC供試体の外観

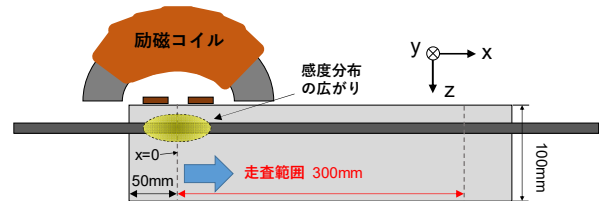


図-8 暴露試験後のRC供試体の計測状況

5.2 加振レーダ計測実験の概要

暴露試験後、図-8に示すようコイル中心が供試体端部から50mmの位置を計測開始点、x方向の走査範囲を300mmとし、他のスキャン条件は4章と同様として $\delta(x)$ を計測した。振動変位はx方向において約100mm程度の幅に

表-2 暴露試験に使用したRC供試体の配合と力学特性

最大粗骨材 寸法 [mm]	水セメント比 W/C [%]	細骨材率 s/a [%]	単位量[kg/m ³]				圧縮強度 [N/mm ²]
			W	C	S	G	
20	62.0	48.1	184	296	850	933	32.0

感度があると考えられ、計測開始点においても供試体端部の影響を受けることになる。供試体表面はスクレーパーで塩を削り取り平らにしてから、供試体表面とアンテナ間の間隔が 1 mm 程度になるように供試体を設置した。

5.3 水散布供試体の鉄筋振動変位分布

図-9 に水散布した供試体 6 体について加振レーダの 2D スキャン計測により $\delta(x)$ を推定した結果を示す。図より $\delta(x)$ はいずれも変動はあるものの、かぶり 30 mm の D13 鉄筋の基準値である $\delta_{30}(13)$ の 1.38 倍 (3σ) の腐食基準値 5.2 mm よりも小さくなっている。一方、緑線の 2σ ラインでは No. 1, 2, 3, 5 で部分的に 2σ をわずかに上回っているため、RC 供試体の鉄筋健全性の判定基準値としては 2σ より大きくすることが妥当であると考えられる。

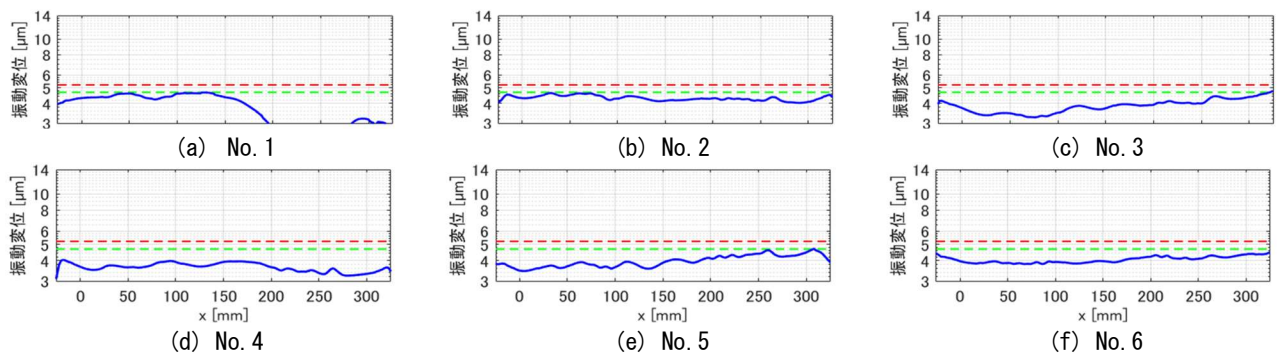


図-9 水散布した供試体の鉄筋振動変位分布 $\delta(x)$ の計測結果 (緑: 2σ ライン, 赤: 3σ ライン)

5.4 塩水散布供試体の振動変位による腐食判定

図-10 に塩水散布した供試体の $\delta(x)$ の計測結果と実験後に供試体を割裂した際の供試体の断面写真を示す。断面写真は鉄筋に沿って鉛直方向に割裂し、二分割した供試体を底面どうしが合わさるように開いて撮影しており、写真の上辺, 下辺が計測面 (かぶりコンクリート側) になっている。各供試体においてみられる明瞭なき裂は、割裂時に鉄筋を取り外す際に破断したものであり、これらのき裂の存在は $\delta(x)$ に直接影響を与えていない。

また、赤丸により鉄筋腐食による腐食生成物の付着位置を示すが、どの供試体にも腐食が見られた。なお、No. 1~3 の鉄筋中央の黒い部分は別試験目的で設置したひずみゲージの防水テープであり、その内部に発錆は見られなか

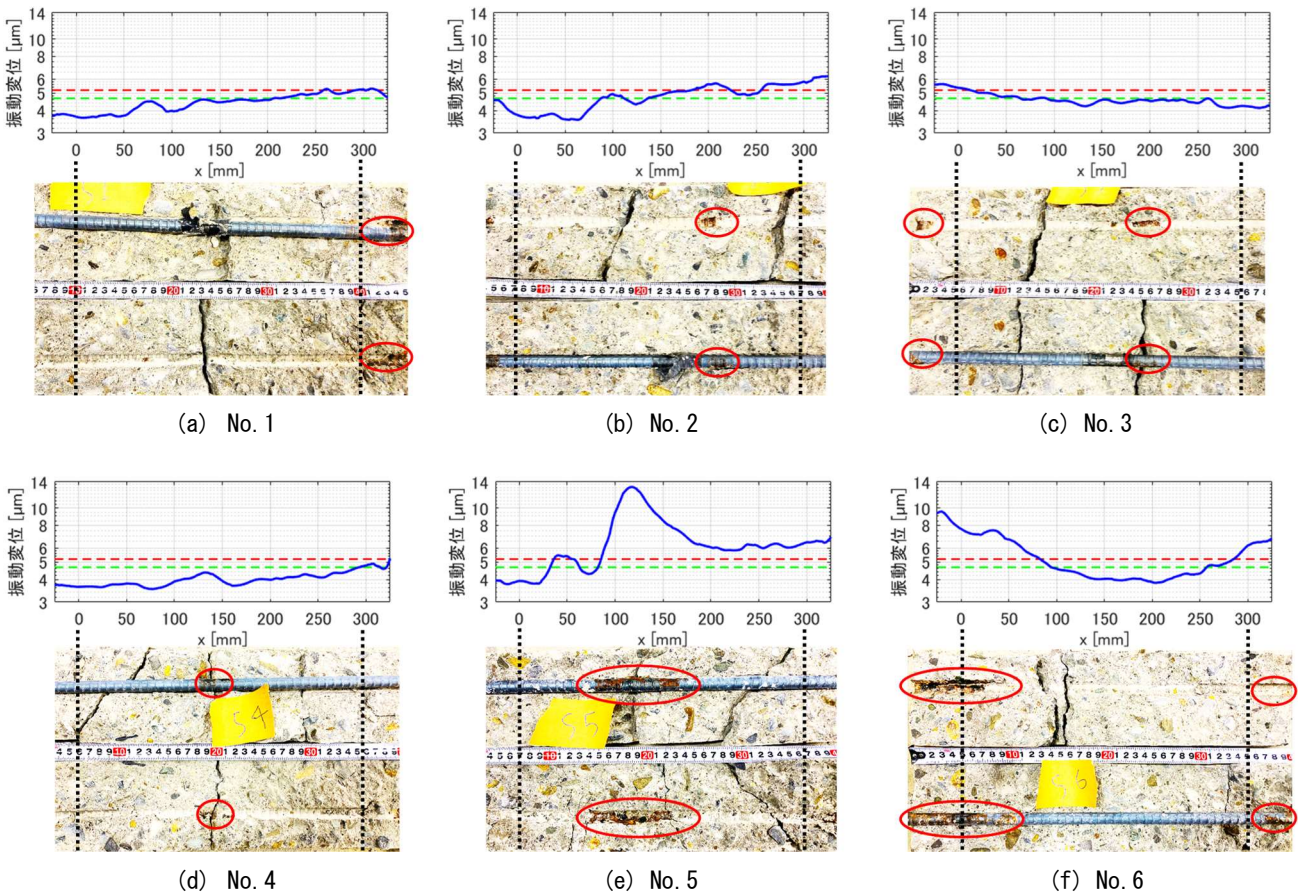


図-10 26%塩水を散布した供試体の鉄筋振動変位分布 $\delta(x)$ の計測結果と割裂後の断面の様子 (赤丸は腐食位置)

表-3 塩水散布暴露供試体の割裂後の鉄筋腐食位置と鉄筋振動変位分布の 3σ 腐食基準値による判定結果

供試体	No.1	No.2	No.3		No.4	No.5	No.6	
腐食位置[mm]	300~350	210	-40	200	140	70~170	-50~50	330
腐食判定	○	○	○	×	×	○	○	○

った。まず、No. 1, 3, 6 の供試体端部に鉄筋露出部から内部に進展した腐食が見られ、No. 2, 3, 4, 5 の中央部にはコンクリートへの塩分浸透による孤立した腐食が見られる。

腐食程度の比較的大きい No. 5 ではピーク位置付近の 100 mm 程度の幅で赤錆が、ピーク位置には黒錆も付着しており、対応する位置での $\delta(x)$ が 14 μm 程度まで上昇していることがわかる。また、No. 6 では中央部には腐食はないものの、鉄筋左端に激しい腐食が見られ、多くの黒錆の付着が確認できるが、 $\delta(x)$ についてもこの付近で 8 μm 程度まで増加している。また、右端の鉄筋腐食位置付近において $\delta(x)$ も 3σ を超えていることが確認できる。

腐食程度の低い No. 1-4 では、No. 1 右端、No.2 の 200 mm 付近、No. 3 の左端で腐食生成物が微量に付着しており、対応する $\delta(x)$ も 3σ を超えていることが確認できる。一方、No. 4 の 140 mm 付近では腐食生成物の付着位置に $\delta(x)$ の局所的な増加が現れているが、 3σ ラインは超えていない。また、No. 3 の 200 mm 付近の腐食生成物の付着位置では $\delta(x)$ の増加は見られないことから、腐食生成物が鉄筋周方向に回り込んでいないような場合は振動変位の増加に寄与しない可能性がある。

全体として、割裂後の供試体や鉄筋の写真から判断できる腐食程度と振動変位の大きさは定性的ではあるが概ね対応がみられており、腐食位置と腐食判定結果は表-3 にまとめるように、健全供試体の平均鉄筋振動変位分布に対し、 3σ を腐食基準値とする閾値により 8 箇所のうち微小腐食を含む 6 箇所、実際の腐食位置と合致する腐食判定結果となった。

6. まとめ

本論文では加振レーダによる鉄筋腐食判定の閾値評価のため、加振レーダの 2D スキャン計測による 3D イメージングをベースとした鉄筋振動変位の空間分布計測により鉄筋径、鉄筋かぶりを変えた 30 体の健全 RC 供試体の鉄筋振動変位分布のばらつきを評価し、腐食供試体に対してその閾値の妥当性を検証した。得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 健全供試体の鉄筋振動変位分布は鉄筋径が細く、かぶりが浅いほど大きくなり、その標準偏差に対応するばらつきは平均値の 11%程度の範囲であった。
- (2) 健全供試体全体で得られたばらつきから、 3σ に対応する平均値の 1.38 倍を鉄筋振動変位における鉄筋の腐食閾値とした。

- (3) 塩水散布により局所的に腐食した RC 供試体の 8 箇所のうち 6 箇所が腐食閾値によりその位置とともに腐食判定可能であり、軽微な腐食箇所においては鉄筋振動変位の増加が見られなかった。

今後は振動変位と腐食程度の定量化を検討し、実フィールドへ適用していく予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20H02395, 23K17334 及びセコム科学技術財団一般研究助成により実施した。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 極壇邦夫, 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, 2002.7
- 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, 2008.7
- 3) 高鍋雅則, 橋本光男: 鉄筋コンクリート診断のためのパルス電磁力音響法の提案, 非破壊検査, Vol. 52, No. 11, pp. 628-632, 2003.11
- 4) 原田和樹, 渡邊健, 橋本親典, 石丸啓輔: 鉄筋コンクリート内を伝播する超音波を用いた鉄筋腐食の評価に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1879-1884, 2013.7
- 5) 河邊亮太, 国枝稔, 三浦泰人: RC 部材の腐食鉄筋中を伝搬する弾性波特性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp.1168-1173, 2014.7
- 6) 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, 2018.7
- 7) 三輪空司, 中村和弘, 清水崇至, 小澤満津雄: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, pp. 1169-1174, 2021.7
- 8) 中澤有理, 三輪空司, 小澤満津雄: 加振レーダ法による複合サイクル試験中の RC 供試体の鉄筋腐食評価, 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. 22, No.1, pp. 29-34, 2022.10