

論文 加振パルスドップラレーダによる RC 構造物内鉄筋振動変位計測

三輪 空司*1・ 高橋 一徳*2・ 松井 隼平*3

要旨：我々は RC 構造物の劣化評価法として，励磁コイルにより正弦加振したコンクリート内の鉄筋の振動変位をドップラ法により非破壊的に計測する加振レーダ法を提案し，鉄筋腐食や水平ひび割れの評価に適用してきた。一方，従来の計測システムは 1 計測に 2 分程度の計測時間を要するため，広範囲の測定には適用困難であった。そこで，新たにパルスレーダを基礎とする鉄筋の振動変位計測手法を提案し，商用の 2 GHz 帯の RC レーダ装置を用いて基礎的な実験を行った。その結果，パルスレーダ装置において鉄筋の加振レーダ計測は可能であり，既報のシステムと同様の精度の振動変位が 10 秒程度で計測可能なことが示唆された。
 キーワード：電磁波レーダ法，加振，非破壊検査，RC 構造物劣化評価

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，その伝搬速度の変化や振幅情報から，鉄筋腐食¹⁾やひび割れ，弾性係数等の評価に有効に利用されている。しかし，弾性波を用いた手法はその検出に接触式のセンサを用いる必要があり，広範囲の劣化を迅速に評価するには向いていない。一方，非接触，簡便な非破壊探査法として知られる電磁波レーダ法ではレーダをスキャンし，コンクリート内部を映像化することも容易であるものの，コンクリートの劣化要因を直接評価することは困難である。これは，弾性波に比べひび割れに対する感度が低いためであり，実用的には鉄筋の配筋探査やジャンカ等の空隙の探査のみに適用されてきた。

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 100 Hz 程度で正弦振動させながら，マイクロ波を用いて，非破壊，非接触的に鉄筋の振動変位を定量的に計測する加振レーダ法²⁾を提案している。本手法は従来の電磁波レーダ波形に加え，振動物体のみ感度を持つ 2 種類の独立なレーダ波形を取得可能であり，両レーダ波形から振動物体を特定できる。また，その反射振幅の比により振動変位が得られるため，水分等による電磁波の減衰の影響を受けにくい利点を有する。これまで，鉄筋腐食評価においては，電食実験により表面ひび割れ顕在化前から振動変位が増加し始め，腐食量に対し単調に 4 倍程度まで増加することを報告した³⁾。

また，水平ひび割れの評価では，ひび割れを模擬した RC 供試体の鉄筋振動変位が健全な場合と比べ，40%程度増加する⁴⁾ことも示しており，電磁波を用いた劣化要因の非破壊，非接触評価法の一つとして期待されている。しかし，既報の加振レーダ装置は送受信アンテナ間の伝達関数を計測可能な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レーダ計測システム²⁾であり，計測時間が 2 分と長いことや，振動成分の振幅は通常のレーダ波形の振幅に比べ 1/1000 程度小さく，推定振動変位には 20%程度のばらつきがあることが問題となっている。

もし，計測時間を大幅に短縮することができれば，市販の RC レーダと同様に加振レーダをスキャンさせることでコンクリート内部の断面イメージに加え，振動変位の断面イメージを現実的な時間で取得可能になり，振動変位の推定精度も向上するものと考えられる。また，これにより加振レーダ法の実フィールドでの検証も容易になり，鉄筋腐食やひび割れ検知だけでなくコンクリートの弾性係数評価や PC のグラウト充填評価といった適用範囲の拡大も期待できる。

ここで，パルスレーダ方式を採用する市販の RC レーダ装置の計測時間が数ミリ秒であることを考慮すると，加振レーダ法的高速化にはパルスドップラレーダ方式の導入が有効と考えられる。しかし，これまで加振パルスドップラレーダによる振動変位推定の定式化はなされておらず，パルスレーダにおいて得られる鉄筋反射の大きさより 1/1000 程度小さい振動成分を十分な SN 比で計測できるかどうか検討された例はない。

そこで，本論文では励磁コイル加振により正弦振動した鉄筋のドップラ成分から鉄筋振動変位を推定する手法を提案し，商用のパルスレーダ装置を用い，RC 供試体において実験的に鉄筋振動変位の推定が可能かどうかを検討した結果について報告する。

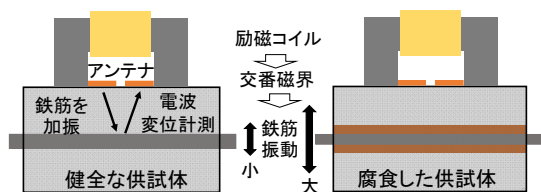


図 - 1 加振 RC レーダの概念図

*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 応用地質株式会社 技術本部 博士(工学) (非会員)

*3 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 (非会員)

2. パルスドップラレーダにおける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、包絡線波形 $e(t)$ に中心周波数 f_c 、初期位相 φ で変調された変調パルス $p(t)$ を考える。

$$p(t) = \cos(2\pi f_c t + \varphi)e(t) \quad (1)$$

ここで、 $e(t)$ は時刻 0 でピーク値 1 を有する任意の単峰性の波形である。今、送信アンテナから距離 L 離れた反射体に向けパルス状の電波を照射し、反射体からの反射波を同一のアンテナで受信するものとする。このとき、レーダ波形 $h_r(t)$ は反射係数を R 、電磁波の伝搬速度を v とすると式(2)のように表される。

$$h_r(t) = Rp\left(t - \frac{2L}{v}\right) \quad (2)$$

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、距離の時間変動を $L(t)$ とすると式(3)がのように表される。

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

加振レーダでレーダ波形の変動は GHz オーダーであるのに対し、 f_v は 100 Hz オーダーであり、その変化速度は極めて遅い。この速度の違いからレーダを固定したまま、あるパルス繰り返し周波数でレーダ波形を取得し、繰り返し毎に波形を並べた 2 次元のレーダプロファイル $h_r(t, T)$ を考えると、レーダ波形の時間 t とその取得時間 T は独立とみなせ、式(4)のように表される。

$$h_r(t, T) = Rp\left(t - 2\frac{L - \delta \sin(2\pi f_v T)}{v}\right) \quad (4)$$

ここで、本来レーダ波形の振幅がピークを持つべき反射波の到達時刻 $t = 2L/v$ での振幅に着目すると $p(0)=1$ であるため、式(5)のように表される。

$$h_r\left(\frac{2L}{v}, T\right) = R \cos\left\{\frac{4\pi f_c \delta}{v} \sin(2\pi f_v T) + \varphi\right\} \quad (5)$$

ここで、式(5)は初期位相 φ の影響で到達時刻において常に最大値を持つとは限らないことに注意すべきである。

さらに、電磁波の波長が数 cm に対し、振動変位は数 μm であり、極めて小さいため式(6)が成立する。

$$\frac{4\pi f_c \delta}{v} = \frac{4\pi \delta}{\lambda_c} = 2k_c \delta \cong 1/1000 \ll 1 \quad (6)$$

したがって、式(5)を 1 次近似すると式(7)が得られる。

$$h_r\left(\frac{2L}{v}, T\right) \cong R\{\cos \varphi - 2k_c \delta \sin(2\pi f_v T) \sin \varphi\} \quad (7)$$

$h_r(2L/v, T)$ は波形取得毎に振幅が振動周波数 f_v で正弦的に変化しており、その振幅が振動変位 δ に依存している。一方、初期位相 φ にも依存するため、 φ が未知のとき、このままでは振動変位 δ を評価できない。

そこで、式(8)のように送信パルスの変調波の位相に直交する成分を持つ変調パルス $q(t)$ を考える。

$$q(t) = \sin(2\pi f_c t + \varphi)e(t) \quad (8)$$

同様に $q(t)$ に対応する直交位相レーダ波形に対しても反射波の到達時刻での振幅に着目し、式(7)と同様の 1 次近似をすると式(9)が得られる。

$$h_i\left(\frac{2L}{v}, T\right) \cong R\{\sin \varphi + 2k_c \delta \sin(2\pi f_v T) \cos \varphi\} \quad (9)$$

ここで、 $h_r(t, T)$ を実部、 $h_i(t, T)$ を虚部にもつ複素レーダ波形(解析信号と呼ぶ) $\hat{h}(t, T)$ を定義し、到達時刻での振幅に着目すると、式(10)が得られる。

$$\hat{h}\left(\frac{2L}{v}, T\right) \cong Re^{j\varphi}\{1 + j2k_c \delta \sin(2\pi f_v T)\} \quad (10)$$

従って、 $k_c \delta$ が極めて小さいことから、 $|\hat{h}(t, T)|$ は φ によらず、到達時刻 $t = 2L/v$ で最大値 R を持つ。さらに、得られた複素レーダ波形 $\hat{h}(t, T)$ は振動周波数 f_v で微小に正弦変化しており、さらに式を展開すれば、反射波到達時刻の複素振幅として式(11)のように表される。

$$\hat{h}\left(\frac{2L}{v}, T\right) \cong Re^{j\varphi}\{1 + k_c \delta (e^{j2\pi f_v T} - e^{-j2\pi f_v T})\} \quad (11)$$

ここで、式(11)を T 方向にフーリエ変換すれば、直流成分及び、正、負の振動周波数 f_v において、それぞれピーク振幅値 R 及び $k_c \delta R$ が得られる。さらに、レーダ波形から搬送波の波長 λ_c を読み取るにより k_c は既知となり、直流成分に対するドップラ成分の振幅比を A とすると、振動変位 δ は式(12)のように与えられる。

$$\delta = \frac{A}{k_c} = \frac{\lambda_c A}{2\pi} \quad (12)$$

図-3 にレーダプロファイルから振動変位を計測するながれを示す。まず、得られたレーダ波形 $h_r(t)$ からヒルベルト変換により複素レーダ波形 $\hat{h}(t)$ を求める。ヒルベルト変換はレーダ波形をフーリエ変換し、負の周波数成分を 0、正の周波数成分を 2 倍した後、逆フーリエ変換することで取得レーダ波形から容易に計算できる。その後、反射波到達時刻での複素振幅を計測時間方向にフーリエ変換し、得られたドップラスpekトルの直流成分とドップラ成分との振幅比から反射体の振動変位を得ることができる。

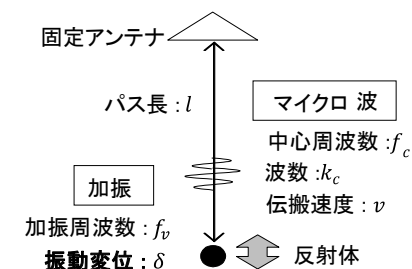


図-2 加振ドップラ変位計測の概念図

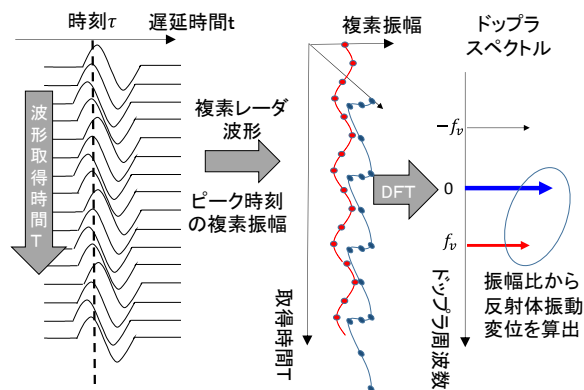


図 - 3 振動変位計測のながれ

3. 実験概要

3.1 パルスレーダシステム

パルスレーダを用いて本手法により実験的に鉄筋振動変位を推定するための基礎検討を行った。本手法を適用するためのレーダ性能の要件として、以下の4点が挙げられる。

- 1) ドップラスペクトル取得時のエイリアシングの影響を考慮し、振動周波数(本加振システムでは 114 Hz)の 2 倍より速い波形取得速度を有すること。
- 2) ドップラ成分の大きさは直流成分の 1/1000 程度と極めて小さいため、サンプリングの際の量子化 bit 数は 16 bit 以上が望ましいこと。
- 3) アンテナを固定して鉄筋の振動変位を計測するため、一定周期でパルスを送信するモードを有すること。
- 4) アンテナ近傍にコイルを配置し、加振計測を行う必要があるため、レーダ部の電子機器に磁界が影響を与えないようレーダ部とアンテナ部が分離可能な構造であること。

これらの条件を可能な限り満たすレーダ装置として、GSSI 社の SIR-4000 を用いた。本レーダはレーダ表示部とアンテナ部が独立しており、アンテナには 2 GHz パームアンテナを用いた。表 - 1 に本システムの性能をまとめた。既開発のネットワークアナライザを用いた加振レーダシステムでは 2~6 GHz に帯域を有するアンテナを用いていたが、本レーダでは 2 GHz を中心とする低周波帯を用いるため電磁波に対する減衰の影響を受けにくく、従来よりもより深いかぶりの鉄筋を計測できる。

表 - 1 使用したレーダの性能

波形取得速度	400 Hz/トレース
サンプル点数	256 点/トレース
量子化 bit 数	16 bit
アンテナの分離	可能,ただしアンテナ部にパルス発生回路が内臓
可能探査深度	30 cm (コンクリート内)

3.2 励磁コイル加振システム

励磁コイルはこれまでかぶり 40 mm の RC 供試体での腐食評価に使用してきた実績³⁾のあるコイルとして、断面積 50 mm × 50 mm、全長 180 mm のコの字型の 100 層積層鋼板コアに、耐熱 200℃、直径 1.2 mm のエナメル線を 500 巻したコイルを用いた。コイルのインダクタンスは 111 mH であり、直流抵抗は 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 70 μF の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。これにより、鉄筋には交番引力が発生するが、電流の正負のピークで引き付けあうために、鉄筋の振動周波数 f_v は印加周波数の 2 倍の 114 Hz となる。

3.3 RC 供試体の概要

RC 供試体は 2 種類を用いた。一つ目は、提案法による計測対象の振動変位の推定可能性や、得られる振動変位の妥当性について検証することを目的とし、鉄筋拘束の極めて低い RC 供試体を模擬した RC 供試体 1 を用いた。RC 供試体 1 は図 - 4(a)に示すようにコンクリート内部に径 30 mm の樹脂製のシース管が埋設されており、その内部は空洞となっている。さらに、その空洞内の上部に径 3 mm の針金を挿入する。針金は両端支持されており、中央を加振すれば比較的大きな振動変位が期待できる。また、針金は供試体に拘束されていないため、供試体を取り除き、同じコイル - 針金配置で針金の振動変位を直接計測することもできる。

二つ目は、先行研究においても計測実績^{2,3)}のあるかぶり 40 mm 程度の RC 供試体を対象とする。この実験は、通常の鉄筋反射に比べ 1/1000 程度小さい鉄筋振動成分の計測可能性や鉄筋振動変位の評価可能性を検証することを目的とし、図 - 4(b)に示す RC 供試体 2 を用いた。

3.4 計測条件

パルスレーダの測定条件は、測定レンジを 4 ns とし、測定時間を 1 秒とした。このとき、測定トレース数は 400 個である。また、ドップラスペクトルの周波数分解能は 1 Hz となる。尚、すべてのレーダ波形はノイズ除去のため

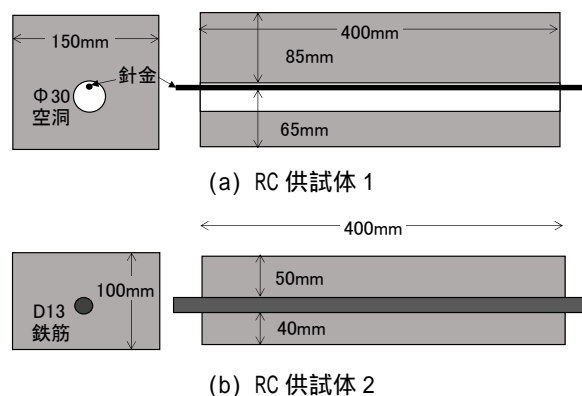


図 - 4 供試体の概要

め、中心周波数 2 GHz、帯域幅 3 GHz のガウシアン型のバンドパスフィルタを適用した。

図 - 5 に供試体に対するアンテナとコイルの配置の関係を示す。これまでの加振レーダ計測ではコイルの両足間の空間にアンテナを配置し同一面から計測を行うが、本実験で使用したアンテナ内部にはパルス発生器等の電子回路が内蔵されており、コイルからの交番磁界による電磁誘導により、アンテナ内部の電子機器や計測結果に影響が出る恐れがあるため、アンテナをコイルから離して設置することとした。本論文の目的である加振パルスレーダによる振動変位推定の妥当性検証は、加振力に影響を与えるコイル - 鉄筋間距離、振動変位に影響を与える加振点と計測点の位置を既報のシステムと同様にできればよい。一方、アンテナとコイルを同一面で離して設置した場合、コイルによる鉄筋加振位置とアンテナによる鉄筋計測位置を同一にすることは困難である。そこで、本論文ではレーダ計測面とは反対側の面にコイルを配置し、下から鉄筋を加振し、上から鉄筋を計測する加振パルスレーダ計測を行った。尚、今後、電子回路の受ける影響を検討し、問題があれば電子回路部とアンテナが分離した構造にすることで、既報システムと同様に同一面からの計測は可能と考えられる。本配置では計測対象の反射波に加え、供試体底面やコイルからの反射波が計測されるが、本レーダの空間分解能は 30 mm 程度であり、鉄筋と底面は分解能以上離れているため、底面による鉄筋振動変位への影響はないと考えられる。

4. 実験結果

4.1 針金の振動変位計測

図 - 6 に RC 供試体 1 におけるレーダ波形の例を示す。実線が得られたレーダ波形である。また、破線は直交位相レーダ波形、点線はレーダ波形を実部、直交位相レーダ波形を虚部とした複素レーダ波形の絶対値であり、レーダ信号の包絡線を表す。乾燥したコンクリート供試体の比誘電率は 6~8 とされており、アンテナから針金までのかぶり厚が 85 mm であるため、反射波の予想到達時刻は 1.39~1.60 ns に対応する。したがって図中に示した波

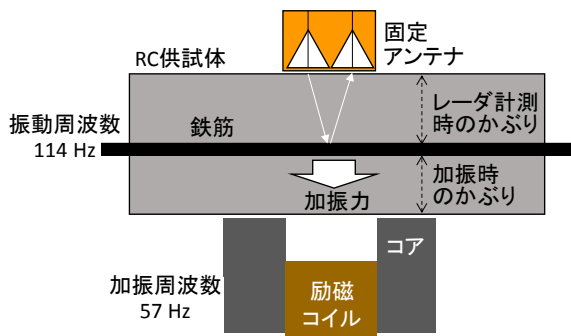


図 - 5 供試体とアンテナ、コイルの配置

が針金の反射波と考えられ、その到達時刻から比誘電率を推定すると約 6.5 であった。

図 - 7 に 1 秒間計測したレーダ波形の解析信号の全サンプル点に対し、計測時間方向のドップラスペクトルを求めた結果を示す。尚、縦軸はレーダ波形の遅延時間方向である。カラースケールは静止成分の最大パワーを基準とする dB スケールとした。静止成分となる 0 Hz に対して、それ以外の周波数では -70 dB 程度のパワーと極めて小さい。上図に針金の反射波到達時刻（破線）である 1.4 ns におけるドップラスペクトルの断面も示すが、114 Hz 付近において約 -63 dB の鋭いピークが現れていることがわかる。また、これが針金の振動周波数と一致することから針金の振動が捉えられていると考えられる。

また、直流及び 114 Hz 以外の周波数では白色雑音の特徴を有しており、これがノイズレベルになるものと考えられる。その平均電力は -75 dB 程度であり、振動成分の SN 比は 12 dB 程度である。これより、計測時間 1 秒の加振パルスレーダ計測においても十分振動変位を評価可能なドップラ信号が得られることが確認できた。

図 - 8 に正のドップラ周波数(114 Hz)におけるレーダ波形を抽出した結果を示す。これは、加振により 114 Hz で振動する物体を選択的に抽出したレーダ波形に相当し、

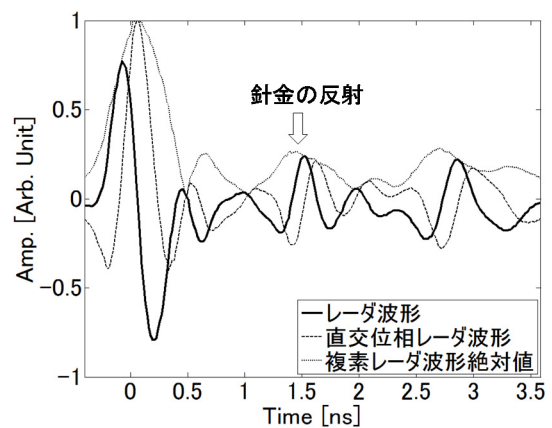


図 - 6 レーダ波形と解析信号の例

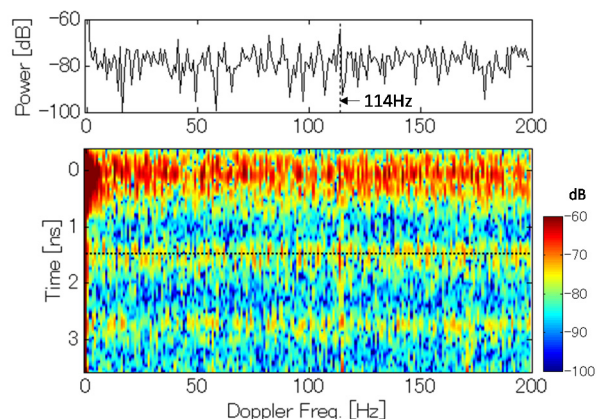


図 - 7 解析信号のドップラスペクトル
上図：反射波到達時刻（点線）でのパワー

図 - 6 における針金の到達時刻である 1.4 ns 付近に強い反射波が見られることから、このピークは振動する針金の反射波に相当する。図 - 6 には針金の反射だけではなく、0 ns 付近に直達波や、2.7 ns 付近には供試体底面からの反射波のピークも見られている。加振力は約 20 mm で半減することがわかっており²⁾、コイルから離れた供試体表面が振動するとは考えにくい。また、供試体底面はコイルの足と極めて近いが、コアが印加周波数の 57 Hz で振動することは考えられるが、その 2 倍の 114 Hz で振動する成分は小さい。そのため、針金の反射応答に比べ相対的に小さい値となっていることもわかる。

次に、30 秒間信号を取得し、1 秒区間で同期加算を行うことにより 30 回のアレーシングを行った結果を図 - 9 に示す。平均化によりノイズ成分が低減し、振動成分による 114 Hz のドップラ成分が明瞭に確認できる。また、それ以外には印加周波数である 57 Hz や、その 3 倍の周波数成分のみが支配的である。57 Hz の成分は理論的には表れない成分であるが、コイル自身の振動が供試体からアンテナに伝わることにより現れる振動ノイズや信号ケーブルへの誘導雑音等の影響が考えられるものの、1 秒間の計測ではドップラ成分の周波数分解能が 1 Hz であり、ドップラ領域でそれらを完全に分離できるため、

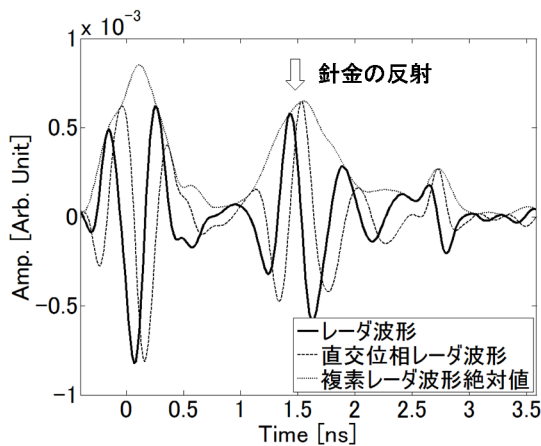


図 - 8 正のドップラ周波数におけるレーダ波形

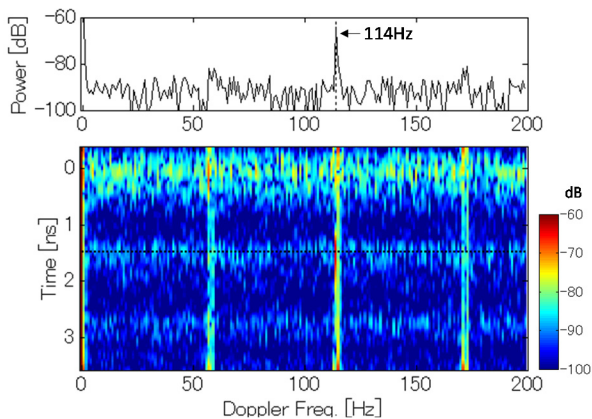


図 - 9 30 回の同期加算後のドップラスペクトル
上図：反射波到達時刻（破線）のパワー

114 Hz のドップラ成分には影響を与えない。

図 - 10 に図 - 9 の 0 Hz, 114 Hz の複素レーダ波形の絶対値を示す。1 秒計測での図 - 6 の静止成分や図 - 8 のドップラ成分の針金の反射波は同期加算後の振幅と類似しており、これらの波は同期加算によりコヒーレントに重ね合わされたものと考えられる。一方、ドップラ成分の 0 ns 付近の直達波は図 - 8 に比べ大きく低減しており、ドップラ成分の直達波のコヒーレンス性が低いことがわかる。図 - 7 から、直達波付近の波が様々なドップラ周波数にランダムに現れているため、送信パルスの周波数揺らぎ等により表れた乗法的ノイズ成分が、ドップラ成分に分散し表れたものと考えられる。かぶりが浅い場合では、直達波と反射波が重畳し振動変位の推定が困難となるが、このような場合、同期加算を行い直達波のドップラ成分の影響を低減することが有効と考えられる。

また、図 - 6 から反射波の基本周期は 0.5 ns 程度であり、搬送波の中心周波数 f_c を 2 GHz とみなせるので、中心波長 λ_c は 59 mm と推定できる。そこで、式(12)より反射波到達時刻での静止成分とドップラ成分の振幅比から、振動変位は 21 μm と推定できる。尚、供試体とアンテナを取り除き、空中において針金を加振させ、レーザ変位計により針金中央の振動変位を直接測定した結果、3 回の平均値で 19.3 μm であった。加振パルスレーダ法により得られた振動変位とレーザ変位計より得られた振動変位は概ね一致しており、提案した振動変位推定法の妥当性が確認できた。

4.2 RC 供試体の振動変位測計測

次に、RC 供試体 2 について計測を行った。鉄筋を計測対象とすると振動変位は小さくなることが予想されるため、1 秒を基本解析時間とし 30 回の同期加算を行うものとする。図 - 11 に 0 Hz, 114 Hz の複素レーダ波形の絶対値を示す。コンクリートの比誘電率を 6.5 とすると、50 mm の鉄筋かぶりから得られる鉄筋反射波の予想到達時刻は 0.85 ns であり、その時刻に両波形ともに強いピー

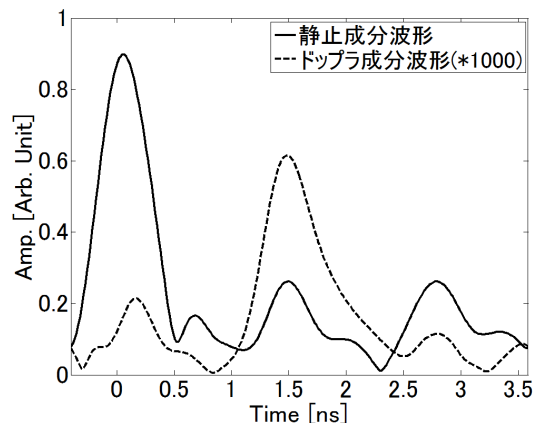


図 - 10 静止成分(0Hz)、ドップラ成分(114Hz)での複素レーダ波形絶対値 (RC 供試体 1, 同期加算 30 回)

クが見られることから、0.85 ns の反射波が鉄筋の反射波と考えられる。反射体が鉄筋となるため静止成分での反射波の振幅は細い針金に比べ相対的に大きくなっていることがわかる。また、鉄筋が拘束されるため振動しにくくなるため、ドップラ成分の鉄筋反射は針金に比べ相対的に小さくなっている。両波形の振幅比から式(12)により振動変位を推定すると、4.8 μm であった。

また、同一の供試体、コイル配置を用いて既報のネットワークアナライザでの加振レーダ測定を試みたが、計測困難であった。これは、既報のシステムが高周波であり、かぶりが 50 mm と比較的深い反射波の計測に不利なことが原因であると考えられる。一方、市販パルスレーダシステムでは低周波を利用しており、深いかぶりのレーダ測定に有利であるため、加振パルスレーダ計測においても加振力を増大させることが出来れば、より深いかぶりの鉄筋振動変位計測が実現可能であると考えられる。

4.3 計測時間の検討

既報のシステムではドップラ成分の SN 比にかかわらず 1 点で約 2 分の計測時間を要していた。一方、本システムでは SN 比が高い場合、計測時間を大幅に短縮することができる。図 - 12 に 1 秒をドップラ解析時間とし同

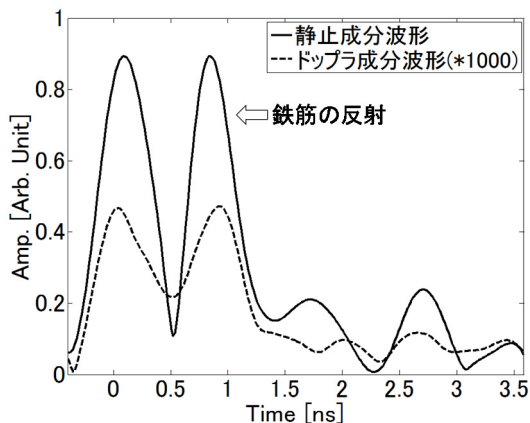


図 - 11 静止成分(0Hz)、ドップラ成分(114Hz)での複素レーダ波形絶対値 (RC 供試体 2, 同期加算 30 回)

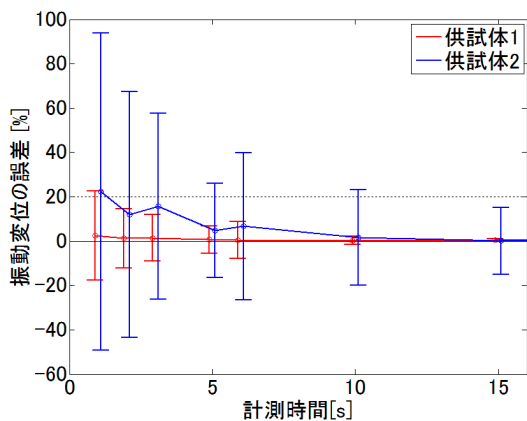


図 - 12 振動変位の推定誤差の計測時間依存性 (解析時間を 1 秒とし、同期加算の回数を変化)

期加算を行い、その回数を変化させることで振動変位の誤差を評価した結果を示す。真値は計測時間 30 秒の結果を用い、真値からの誤差の平均値、標準偏差を評価した。図から概ね計測時間が短いほどばらつきは増加し、振動変位が過剰推定される傾向にあることがわかる。また、既報のシステムでの振動変位のばらつきと同等の約 20% の標準偏差を基準とすると供試体 1, 2 ではそれぞれ、1 秒、10 秒程度の計測時間で振動変位を評価できると考えられる。

5. まとめ

本論文では、商用の 2 GHz 帯のパルスレーダ装置を用いた加振レーダ計測により、励磁コイルにより正弦加振したコンクリート内の鉄筋の振動変位を非破壊的に計測する手法を提案し、実験的に振動変位の評価を行った。その結果、

- ・コンクリート内の拘束を受けていない針金の振動変位が 1 秒程度で計測できることを示した。
- ・また、その振動変位はレーザ変位計の振動変位と概ね一致しており、振動変位推定アルゴリズムの妥当性が示された。
- ・かぶり 50 mm (加振距離 40 mm) の RC 供試体において 10 秒程度で既報のシステムと同等の振動変位が得られることがわかった。

現状では、供試体下部から加振を行っているため、実用的ではないが、今後、コイル側にアンテナを配置可能なハードウェアの変更を行うことで、実用的な加振パルスレーダシステムを開発していく予定である。

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, 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, No. 1, pp. 1777-1782, 2017.
- 3) 三輪空司, 本多秀聡, 富田沙希, 中川貴之: 鉄筋腐食量評価のための加振レーダ法による電食中の鉄筋振動変位計測, 非破壊検査シンポジウム論文集, Vol. 6, pp. 97-102, 2018.
- 4) 清水俊秀, 三輪空司, 鈴木真, 鎌田敏郎: 増厚床板下の水平ひび割れ探査のための加振ドップラレーダシステムの開発, 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. 517-522, 2018.