

加振レーダ法によるコンクリート構造物の鉄筋腐食量評価技術の開発(1)

—RC 供試体による原理検証—

群馬大学 正会員 ○三輪 空司

群馬大学 非会員 本多 秀聡

東電設計(株) 正会員 中川 貴之

東電設計(株) 正会員 志岐 仁成

1. 目的

本報告は、図1のように励磁コイルによりコンクリート内部の鉄筋を正弦加振し、レーダにより非接触に鉄筋振動変位を計測する加振レーダ法を提案し、RC 供試体中のかぶり4 cmの鉄筋に適用することにより、電食前後での振動変位から鉄筋腐食評価の可能性を検討する。

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 離れた反射体からの反射波を受信する。この間、計測対象を単一周波数 f_0 で振動させると、電波の波長に対して、振動変位が十分小さければ、反射波は周波数 f の無変調成分と周波数 $f \pm f_0$ の1次ドップラ成分の2種類の波に分離するものとみなせる。このとき、無変調成分、ドップラ成分を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(1)、(2)式のように表される。

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

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 f_L から f_H まで掃引しながら、その伝達関数を計測し、逆フーリエ変換すればレーダ応答(インパルス応答) $\dot{g}_0(t)$ 、 $\dot{g}_{\pm}(t)$ がそれぞれ以下で与えられる。

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

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

無変調成分 $\dot{g}_0(t)$ 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波形であり、通常のレーダ反射応答と等価な時間波形である。一方、正のドップラ波形は $\dot{g}_0(t)$ 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。したがって、距離 l にある反射体の振動変位 $\delta(l)$ は無変調成分の微分波形とドップラ成分波形の反射波到達時刻の振幅比として以下で与えられる。

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

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振幅を推定することが可能である。

3. 実験システムの概要

この計測には汎用的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。得られた伝達関数より無変調成分のレーダ波形が計測できるが、ドップラ成分の計測においては、送信周波数を振動周波数 f_0 だけシフトしてアンテナに送信し、ドップラ効果によって逆シフトされた成分を計測することで得ることができる。尚、この計測の間、励磁コイルには正弦波を印加する。開発した励磁コイルを図3に示す。コアにはコの字型の100層の積層鋼板を使用し、コイルには耐熱200℃、直径1.5 mmのエナメル線を用いた。総巻き数は500回である。

RC 供試体は、普通ポルトランドセメントを用い、呼び強度が30 MPaである。サイズは300×100×150 mm、D16鉄筋をかぶり40 mmに配置した。供試体は30日の湿布養生後、気中にて90日放置した。供試体側面はエポキシ樹脂によりシーリングした。

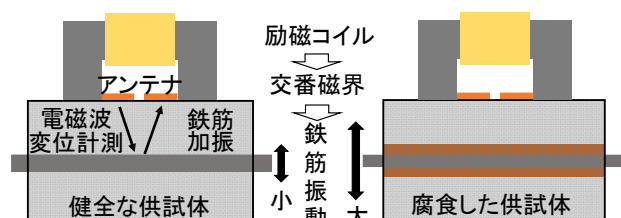


図1 加振レーダ法概念図

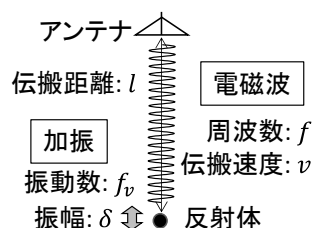


図2 変位計測概念図

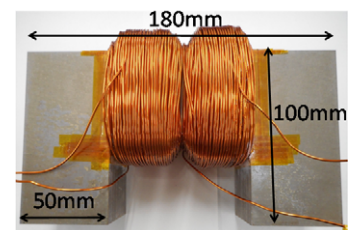


図3 使用した励磁コイル

キーワード RC レーダ, 励磁コイル, 振動変位, 鉄筋腐食

連絡先 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1 群馬大学大学院理工学府電子情報部門 TEL 0277-30-1779

4. 加振レーダによる振動計測実験

4.1 実験概要

本計測では励磁コイルに 30 App, 周波数 25 Hz の交流電流を印加し, 加振を行った。励磁コイルによる振動の基本周波数は印加電流の周波数の 2 倍となり, 鉄筋は 50 Hz で振動することとなる。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 4 cm とし, 励磁コイル下部にコンクリートから浮かせて配置した。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。また, 受信信号は 2 回の同期加算を行うこととする。尚, 一点の計測時間は約 2 分であった。

4.2 鉄筋振動変位の計測結果

まず, 健全な鉄筋供試体について, 加振レーダ計測を行った。計測は供試体中央の鉄筋直上における 10 cm 区間を 1 cm ずつコイルとアンテナを移動させながら計測した。図 4(a)に供試体の加振レーダ計測により各計測点において得られた時間波形を示す。破線で示される無変調成分は微分後の波形であり, 波形を比較しやすくするため振幅を調整している。無変調成分において 0.2 ns 付近に見られるピークはアンテナ間を直接伝わる直達波である。一方, 直達波伝搬経路には磁性物体はないため, 実線で示されるドップラ成分では振幅が低下している。また, 0.8 ns 付近に現れるピークは幾何学的位置関係から, 鉄筋からの反射波であり, ドップラ成分においても明瞭にピークが確認でき, 磁性を有する反射体のみに感度があることを示している。

4.3 電食実験後の振動変位

次に, 電食実験後の振動変位の比較を行った。電食は 6 %の NaCl 水溶液に 5 時間浸漬したのち, 0.3 A の定電流で 40 時間通電させた。このとき, 電食による鉄筋腐食量は 6.4%であった。尚, 水分の影響を受けないよう, 電食前後においてレーダ計測前には, 定温乾燥機において, 105℃, 24 時間の乾燥を行い, 乾燥状態で計測した。

図 4(b)に電食後の加振レーダ計測における時間波形を示す。電食後では, 無変調成分の振幅が低下し, パルス幅も広がっていることがわかる。このことから, 従来のレーダ波形も腐食情報を有しているといえるが, 実構造物では一般に波形情報のみから腐食を評価するのは困難とされている。しかし, 本手法で得られるドップラ成分は無変調成分に比べ, 電食前よりも大きくなっており, 両波形の比較により明らかに腐食の有無を判断でき

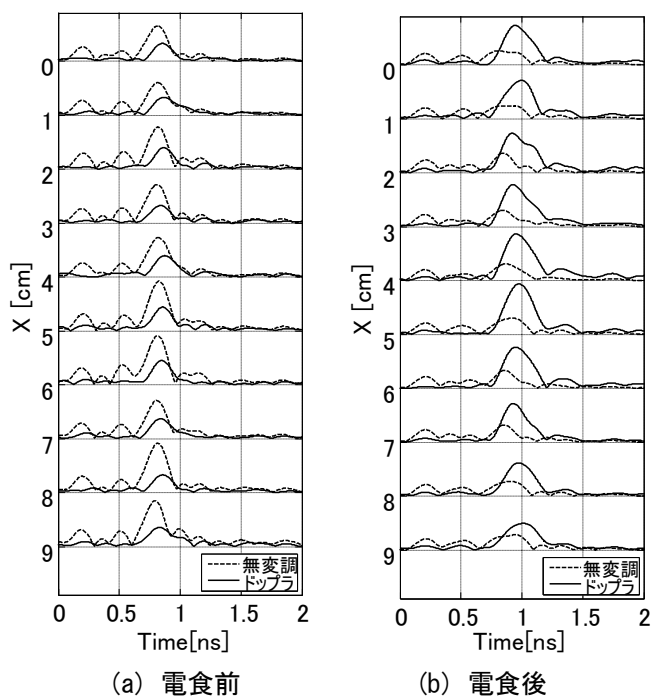


図 4 鉄筋かぶり 4cm の供試体における加振レーダの時間波形

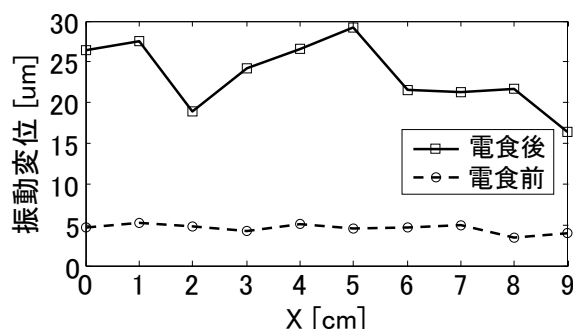


図 5 加振レーダによる鉄筋の振動変位

る。またドップラ成分は無変調成分に比べ波形のピーク時刻が遅れる現象も見られた。

図 5 に両レーダ波形のピークから(5)式によって得られる振動変位を推定した結果を示す。電食前は 5 μm 程度の振動変位であるが, 電食後において 20~30 μm と 4~5 倍の振動振幅の増加が見られた。

5. まとめ

開発した加振レーダシステムにより, かぶり 4 cm の RC 供試体の鉄筋振動変位を計測した結果, 無変調成分, ドップラ成分ともに反射波を明瞭に分離して計測できた。また, 電食実験により鉄筋を腐食させたとき, 振動変位が 4~5 倍増加する結果が得られた。これより, 鉄筋を励磁コイルにより加振し, その振動変位を計測することにより, 鉄筋の腐食の判断が可能であることが示唆される。今後, 振動変位と腐食量の関係を定量的に検討していく必要がある。