

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物における鉄筋の径やかぶりに関する現在の主たる非破壊検査手法には、電磁レーダ法、電磁誘導法などが挙げられる。かぶりに関しては、いずれの手法においても比較的精度良く推定が可能であるが、鉄筋径に関しては電磁誘導法のみによる推定に留まり、その精度は非常に悪い。すなわち、現時点において、鉄筋径を精度良く推定する手法は確立されておらず、かぶりも同時に評価可能とする手法は皆無であるといっても過言ではない。本研究は、電磁レーダ法により鉄筋の径やかぶりを同時にかつ精度良く評価することのできる非破壊検査手法の確立を最終目的として、その基礎的研究に位置付け、形状最適化理論に基づいて鉄筋の径とかぶりを同時に推定可能とする手法を構築する。

2. 形状最適化理論に基づく鉄筋径およびかぶりの推定手法の構築

本研究においては、コンクリート表面のある計測点における鉄筋からの反射波と有限要素法に基づき計算された反射波を一致させるような最適な鉄筋径とかぶりを同時に推定するものである。したがって、評価関数は計算により求めた反射波と計測波の残差二乗和により式(1)のように定義する。

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \int_{\Omega} (u - u_{obs.}) Q (u - u_{obs.}) d\Omega dt \quad (1)$$

$u_{obs.}$: 計測波の振幅の時系列値(単位: volt)

u : 計算波の振幅の時系列値(単位: volt)

t_f : 観測時間の終端時刻, 7ns と設定している

Q : 重み定数, 計測点には 1, それ以外には 0

形状最適化問題においては、式(2)に示す波動方程式および式(3)~式(6)に示す初期条件と境界条件のもとで評価関数を最小とする鉄筋径およびかぶりを求めることとなる。

$$\ddot{u} + \eta \dot{u} - c^2 u_{,ii} = 0 \quad (2)$$

$$u = 0 \quad \text{at } t = t_0 \quad \text{in } \Omega \quad (3)$$

$$\dot{u} = 0 \quad \text{at } t = t_0 \quad \text{in } \Omega \quad (4)$$

$$u = \hat{u} \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (5)$$

$$b = c^2 u_{,i} n_i = 0 \quad \text{on } \Gamma_2 \quad \text{and } \Gamma_c \quad (6)$$

ここで、計算領域は図-1に示すように定義される。 Γ_1 は電磁波を入力する境界、 Γ_2 は入力点以外の表面境界、 Γ_c は鉄筋周りの境界、 Ω はそれ以外の境界を示す。式(1)に示した評価関数の最小化問題を解く際に随伴変数 λ を導入し、式(7)のように拡張することができる。

$$J^* = J + \int_{t_0}^{t_f} \int_{\Omega} \lambda (\ddot{u} + \eta \dot{u} - c^2 u_{,ii}) d\Omega dt \quad (7)$$

拡張評価関数 J^* の最小化問題を議論するに当たり停留条

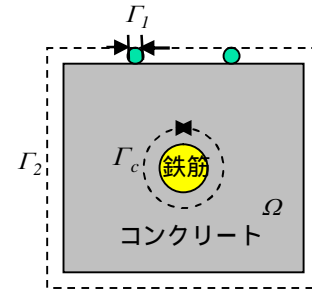


図-1 計算領域



装置本体

送受信アンテナ

図-2 電磁波レーダ装置

件の導出を行う。拡張評価関数 J^* の第一変分を計算することにより必要とされる随伴方程式および計算条件が式(8)~式(12)のように得られる。

$$\ddot{\lambda} - \dot{\lambda} \eta - c^2 \lambda_{,ii} + (u - u_{obs.}) Q = 0 \quad (8)$$

$$\lambda = 0 \quad \text{at } t = t_f \quad \text{in } \Omega \quad (9)$$

$$\dot{\lambda} = 0 \quad \text{at } t = t_f \quad \text{in } \Omega \quad (10)$$

$$c^2 \delta u_{,i} n_i = 0 \quad \text{on } \Gamma_2 \quad \text{and } \Gamma_c \quad (11)$$

$$\frac{\partial J^*}{\partial x_i} = \int_{t_0}^{t_f} (c^2 \lambda_{,i} n_i) u_{,i} dt \quad (12)$$

拡張評価関数の最小化手法には、Sakawa・Shindoらにより提案された勾配法¹⁾を適用する。すなわち、拡張評価関数 J^* にペナルティ項を付加した修正拡張評価関数を用いて停留条件を導出することになる。最後に鉄筋周り座標の更新式は式(13)のように得られる。

$$X^{(l+1)} = X^{(l)} - \frac{1}{W^{(l)}} \frac{\partial J^{*(l)}}{\partial u^{(l)}} \frac{\partial u^{(l)}}{\partial x_i^{(l)}} \quad \text{on } \Gamma_c \quad (13)$$

この式を用いて座標の変化量が繰り返し計算過程においてほぼゼロとなるまで鉄筋径およびかぶりを同定する。

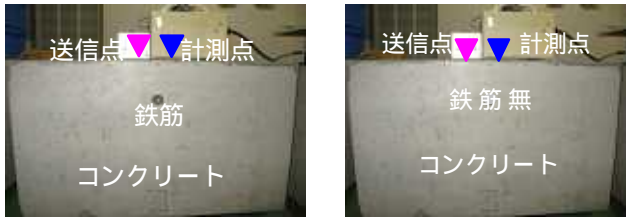
3. 鉄筋径とかぶりの予測

3.1 実験概要

(1) 電磁波レーダ装置と試験体

本研究で使用した電磁波レーダ装置は図-2に示し、中心周波数1GHzのパルス方式で、送受信アンテナが分離型となっている。

鉄筋コンクリート試験体は図-3に示すように300mm×



(a)有筋試験体 (b)無筋試験体
図 - 3 試験体への送受信アンテナの設置概要

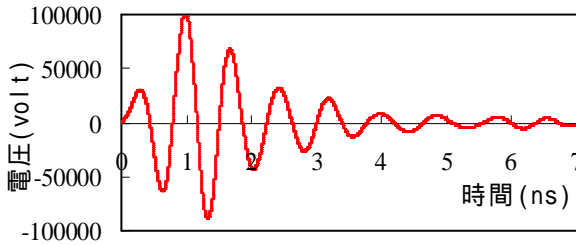


図 - 4 コンクリートへの入力波形

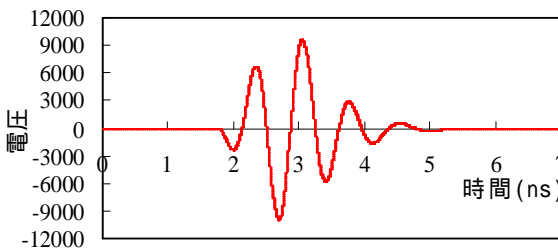


図 - 5 計測された鉄筋からの反射波

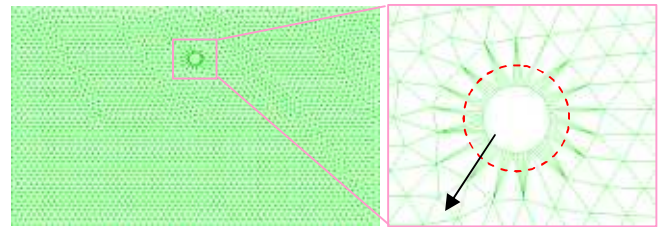
300mm × 500mm の形状寸法であり、かぶり 60mm の位置に直径 25mm の丸鋼が設置されている。なお、コンクリートの配合は $w/c=0.45$, $s/c=2.5$ であり、含水率はいずれの個所においても 9% の一定値である。送信アンテナと受信アンテナは同図に示すように、鉄筋を中心として左右 36mm の位置に設置した。

(2) コンクリートへの入射波形

コンクリートへの入射波は、図 - 4 に示すように、周波数 1GHz 電磁波レーダ装置のゲインを 55.5 と設定した状態である。

(3) 鉄筋からの反射波形の抽出

図 - 3 に示した受信アンテナでは、鉄筋からの反射波(重複反射も含む)に加えて送信アンテナからコンクリート表面を直接伝搬した波(以下、直達波と称す)も受信することとなる。本来であれば、受信した全波形を観測値として前章で構築した理論に適用すべきであるが、直達波の振幅は鉄筋からの反射波に比べて大きいので、鉄筋径とかぶりの予測においては直達波が支配的となった結果になる。したがって、予測精度の向上のためには、全波のうち鉄筋からの反射波成分のみを抽出する必要がある。そこで、本研究では、鉄筋を設置せずに図 - 3(b)に示した同じ形状寸法のコンクリート試験体に鉄筋なしで直達波を計測し、図 - 3(a)の結果からその成分を除去したものを反射波形とした。なお、反射波形は図 - 5 に示す通りである。



(nodes=3210 elements=6162) 鉄筋の正解位置

(a)解析メッシュ (b)局所拡大図

図 - 6 鉄筋に関する初期条件

表 - 1 解析条件

時間増分	0.001ns	初期重み	10^9
時間ステップ数	7000	パラメータ $w(0)$	
収束判定定数 ϵ	10^{-3}	比誘電率	13

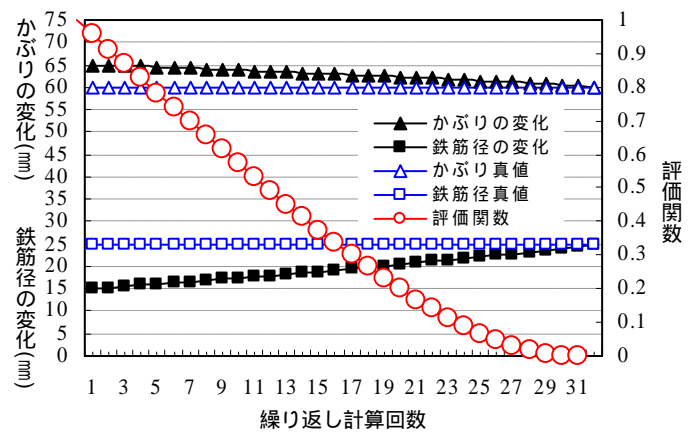


図 - 7 鉄筋径およびかぶりの解析値の変化と評価関数

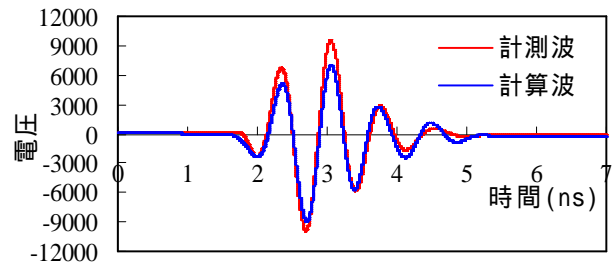


図 - 8 観測波と計測波の比較

3.2 予測値と精度の検討

2章で構築したモデルに図 - 4 に示すコンクリートへの入力波と図 - 5 に示す観測波を適用し、鉄筋径とかぶりの推定を実施する。解析における鉄筋に関する初期条件は図 - 6 に示すように径が 15mm、かぶりが 65mm である。なお、解析条件は表 - 1 に示す通りである。

図 - 7 は、繰り返し計算に応じた鉄筋径およびかぶりの推定値であり、図中には評価関数も表している。図 - 7 示すように評価関数は繰り返し計算によりほぼゼロとなっており、鉄筋径とかぶりの解析値が真値に近づいていることがわかった。評価関数が最小となった時点における鉄筋径およびかぶりは、それぞれ 24.9mm および 60.0mm であり、真値とほぼ一致している。計算波は図 - 8 に示すように観測波と良好な一致を示している。

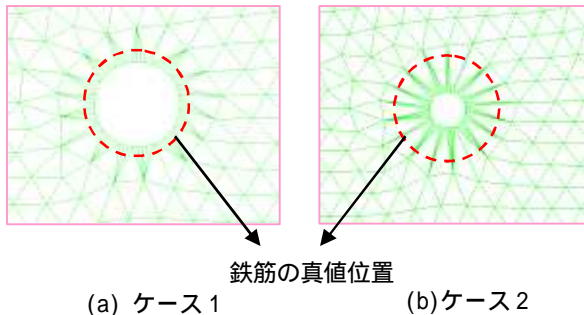


図 - 9 鉄筋に関する初期条件

3.3 予測精度に及ぼす初期値依存性

本節では、予測精度に及ぼす初期値の依存性について検討する。検討に際しては、図 - 9 に示すように、鉄筋径およびかぶり真値に近いケースおよびかけ離れたケースの2種類とした。具体的な設定値は、前者のケースでは直径20mm かぶり65mm、後者のケースでは直径10mm かぶり67.5mmである。

計算結果は、図 - 10 と図 - 11 に示すようになり、ケース1の場合は14回の繰り返し計算回数で収束しているのに対し、ケース2では56回の繰り返し計算を要する結果となった。また、両ケースにおいて推定された鉄筋径とかぶりの値は、ケース1では247.8mm、60.0mm、ケース2では24.1mm、60.0mmとなっており、両ケースとも真値と良好に一致していることがわかる。

以上に示した鉄筋径とかぶりの推定手法および推定結果は、コンクリート中の含水率が一定の条件下におけるものである。実構造物においては、乾湿変化に起因してコンクリート表面からの位置により含水率は異なるため、含水率に依存する比誘電率も位置により異なることである。さらに、電磁波速度 v は次式に示すような比誘電率 ϵ と真空中の光速 c の関数であるため、この意味からすると、本研究では鉄筋径、かぶり、含水率の3パラメータを同時に最適化しなければならない。しかしながら、3パラメータを同時に最適化可能とする手法の確立は、現時点で非常に困難と考えられ、3パラメータを2パラメータに低減できるようなパラメータ間の関連性を検討することとする。

$$v = c / \sqrt{\epsilon} \quad (14)$$

4. 電磁波に及ぼす含水率、距離、鉄筋径の影響

本章では、電磁波強度に及ぼす鉄筋の径、位置および含水率の影響に関する実験を実施し、各要因の関連性について検討を行うこととする。

4.1 実験概要と供試体

電磁波強度に及ぼす含水率の影響に関する実験は、直径150mm 高さ100mmの円柱供試体を乾燥面から7mm、9mm、10mm、20mmの長さで切断したものを試料とし、図 - 12 に示す方法で受信波強度を計測した。なお、試料の含水率は105の炉乾燥による質量変化により測定した。

電磁波強度に及ぼす距離の影響に関する実験は直径150mm 高さ60mm、80mm、100mm、120mm、140mmの円柱

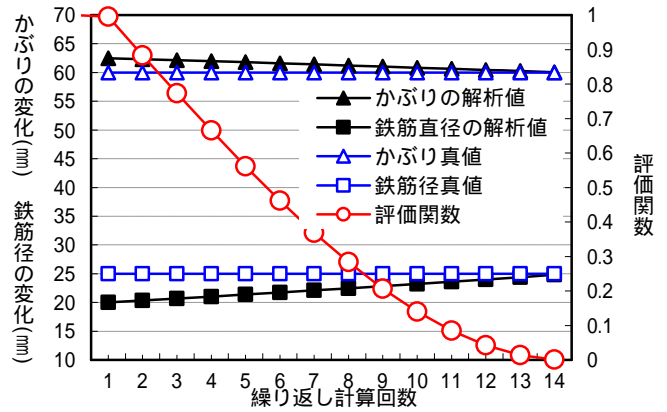


図 - 10 ケース1の計算結果

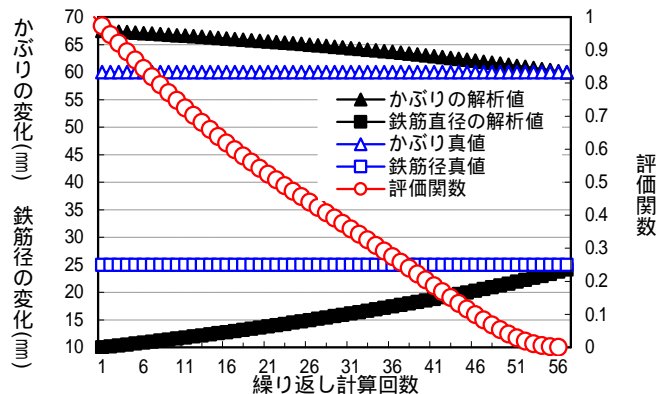


図 - 11 ケース2の計算結果

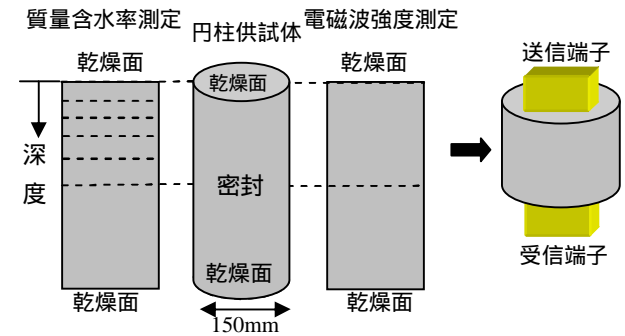


図 - 12 円柱実験体概要

供試体を用い、受信波強度と距離の検討をした。

電磁波強度に及ぼす鉄筋径の影響に関する実験は、図 - 3 に示した供試体の3水準を用いることとして、かぶりを30mm、60mm、100mm、鉄筋径を9mm、16mm、25mmの3水準で3.1節と同じ方法で鉄筋から反射波を抽出した。

4.2 電磁波強度に及ぼす各種要因

(1) 含水率

受信波強度と含水率の関係を図 - 13 に示す。含水率が高いほど電磁波強度はほぼ線形的に減少している。また、試料の厚さが大きいほど電磁波強度も減少しており、その詳細は次項において述べる。

(2) 距離

受信波強度と伝搬距離の関係を図 - 14 に示す。当然のことではあるが、距離が増加するほど電磁波強度が減少している。

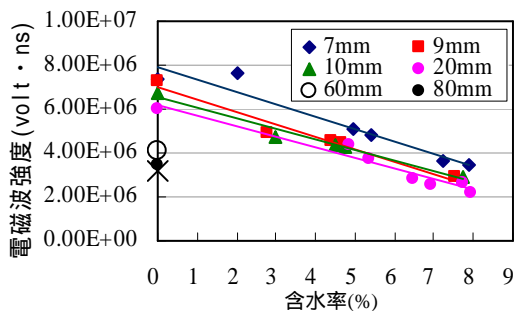


図 - 13 電磁波強度と含水率の関係

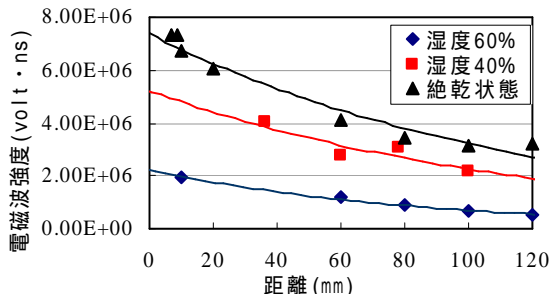


図 - 14 電磁波強度と距離の関係

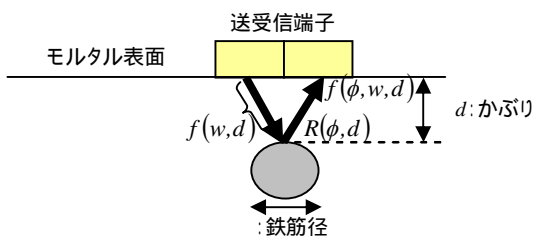


図 - 15 鉄筋反射後の減衰率の測定

また、電磁波強度の深度方向における勾配は、いずれの相対湿度においても絶対乾状態とほぼ同じであることがわかる。

図 - 13 および図 - 14 に示したように、電磁波強度は含水率と伝搬距離の関数で表現でき、それを式(15)で表すこととする。ここで、 w は含水率、 d は伝搬距離である。

$$f(w, d) = (11.58d^2 + 4416.4d - 588892)w + 8.0 \times 10^6 e^{(-0.0091d)} \quad (15)$$

(3) 鉄筋径

電磁波強度に及ぼす鉄筋径の要因であるが、まず図 - 15 に示すように、受信端子で得られた電磁波強度 $f(\phi, w, d)$ と鉄筋への電磁波入射強度 $f(w, d)$ との関連性を検討する。鉄筋径に応じた反射強度は図 - 16 に示す反射率 α に図 - 15 に示す $f(w, d)$ を乗じたものとなり、次式で表すことができる。

$$f'(\phi, w, d) = \alpha f(w, d) \quad (16)$$

4.3 各要素の関連性

以上の結果から、電磁波強度そのまま鉄筋径に関する関係は式(17)と式(18)に示すようになる。

ここで、 $f(w, d)$ は伝播距離および含水率の影響による電磁波強度の減衰、 $R(\phi, d)$ は鉄筋反射以降の減衰率、 β は補正係数である。

$$f(\phi, w, d) = \beta R(\phi, d) f(w, d) \quad (17)$$

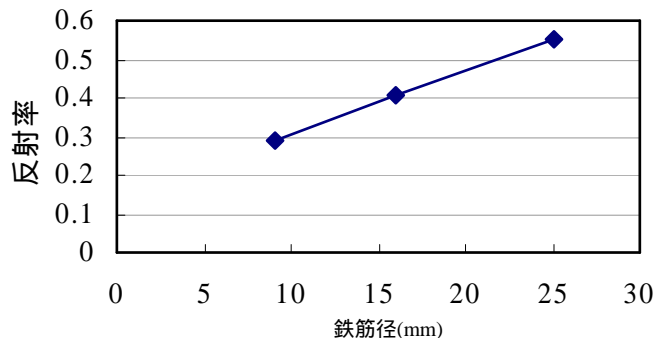


図 - 16 鉄筋径と反射率の関係

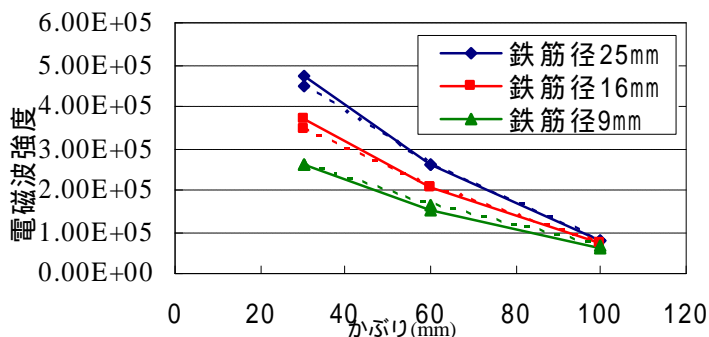


図 - 17 反射強度の計算値と実験値の比較
(実線が実験値、点線が計算値を表す)

$$R(\phi, d) = (-1.43\phi - 4.46)d \times 10^{-4} + (1.63\phi + 14.27) \times 10^{-2} \quad (18)$$

補正係数 β を 0.8、含水率を 9% として、かぶりと鉄筋径の計算値は図 - 17 に示すように実験値と一致している。

現時点においては、実験データが少なく、式(17)が含水率の異なるコンクリートに適用可能が検討する必要がある。式(17)と精度向上により、上述した同定解析と併用することで鉄筋径とかぶりを同時に定量的に評価することが可能であると考えている。比誘電率を未知パラメータとして同定することが今後の課題である。

5. おわりに

本検討では、最適化理論と有限要素法を組み合わせたシミュレーションにより鉄筋コンクリート内部における鉄筋径およびかぶりに関する推定計算を行った。メッシュの細かさおよび時間増分の設定を適切に行った場合、鉄筋径とかぶりの推定精度は真値と比較したところ 96% 以上となった。今までの解析においては、未知パラメータは鉄筋径とかぶりを対象としており、コンクリート比誘電率は既知であるものとし検討を行った。今の実験を踏まえて、今後は、鉄筋径、かぶりの他に、コンクリートの比誘電率を未知パラメータに加え、3種のパラメータを同時に推定する手法について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Y.Sakawa and Y.Shindo : On Global Convergence of An Algorithm for Optimal Control, IEEE Trans.on Automatic Control, Vol.ac-25, No.6, pp.1149-1153, 1980.