

論文 電磁波レーダによる電磁波強度に着目した鉄筋径の推定手法に関する研究

西田 敬^{*1}・大下 英吉^{*2}

要旨: 鉄筋のかぶり厚さを非破壊で予測する手法の代表に電磁波レーダ法が挙げられるが、供試体内部での伝搬速度が含水率に依存するため、その詳細な情報いかにによっては精度が劣ったり、また鉄筋径の精度良い予測が困難である。そこで、それらの問題を解消すべく電磁波強度に着目し、その強度を介したかぶり厚さ、径および含水率の関連性を定量的に評価するとともに、かぶり厚さや径を精度良く推定することのできる手法を提案している。本研究では、その手法を鉄筋軸方向に径が不均一な状態に適用するとともに、手法の改良を行った。

キーワード: 電磁波レーダ法, かぶり厚さ, 鉄筋径, 電磁波強度, 含水率

1. はじめに

近年、我が国において高度経済成長期に建設された多くの構造物が耐用年数を過ぎ、劣化の問題が表面化している。代表的な劣化要因として塩害、中性化、施工不良に起因する鉄筋腐食や、それに伴うコンクリートのひび割れが挙げられる。このような背景から、昨今では鉄筋コンクリート構造物の維持管理の重要性が高まっている。

劣化診断では、まず定期点検として目視や打音法によって構造物全体の劣化状況を定性的に把握する。その後、変状等が確認された際には、詳細点検によって、劣化状態を定量的に評価することとなる。この際、非破壊で構造物の状態を把握する検査手法も主流となっているが、精度良く広範囲を測定できる実用性のある検査方法の確立が求められている。

経年劣化に伴う鉄筋腐食および腐食ひび割れや施工不良によるひび割れや空洞を検知するための検査手法として、低コストかつ確実に既存構造物の構造性能を把握できる非破壊検査は非常に重要な位置づけにある。実構造物において鉄筋腐食に起因した鉄筋断面減少部における径の把握が構造物の構造性能および耐久性性能の観点から急務となっている。

一般に、非破壊検査のかぶり厚さに関する主な手法として、電磁波レーダ法、電磁誘導法、超音波法、放射線法などが挙げられる。しかしながら、いずれの手法もその精度良い判定が難しく、放射線法においては危険を伴うこともある。このようなことから現在、主として利用されている非破壊検査手法は電磁波レーダ法および電磁誘導法である。なかでも取扱いが簡単で、短時間かつ広範囲の測定が行える手法として電磁波レーダ法が挙げられるが、電磁波レーダ法ではかぶり厚さしか測定できず、

鉄筋径の把握が困難である。

そこで本研究は、電磁波レーダ法により鉄筋のかぶり厚さと鉄筋径を同時に測定可能とする手法の検討を行うことを目的とする。

2. 電磁波レーダ法による既往の非破壊検査手法

電磁波レーダ法は図-1のように送信アンテナから放射された電磁波がコンクリート内部の鉄筋に反射し、その反射波が受信アンテナに受信されるまでの伝播時間および電波速度によりかぶり厚さを推定する手法である。しかしながら、測定画像は図-2のように、鉄筋上には3つの波が存在し、どの波が鉄筋に相当するものであるかが判別できない。一方、電磁波レーダ法ではかぶり厚さは測定可能であるが、鉄筋径の測定は困難とされており、両者の関連性を定量的に評価した研究は確立されていない。そこで鉄筋径とかぶり厚さの同時評価を可能とする手法の提案が望まれている。

赤石, 王, 大下は既往の研究¹⁾において、電磁波レーダ法によるかぶり厚さおよび鉄筋径を同時に評価するため、測定によって得られる波形の積分値を電磁波反射強度とし、その強度を介して鉄筋径とかぶり厚さを同時に評価する試みがなされた。実験で得られた結果より、電磁波反射強度 f を鉄筋径、かぶり厚さ、含水率の関数として次式を定義した。

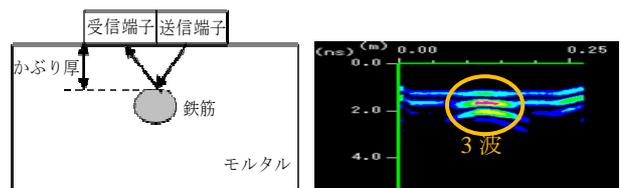


図-1 電磁波レーダ法¹⁾ 図-2 電磁波レーダによる波形¹⁾

*1 中央大学 理工学部 土木工学科 (学生会員)

*2 中央大学 理工学部 都市環境学科教授 工博 (正会員)

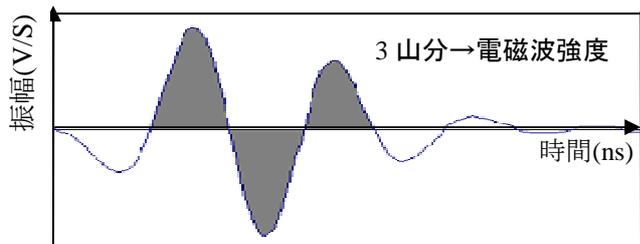


図-3 電磁波強度

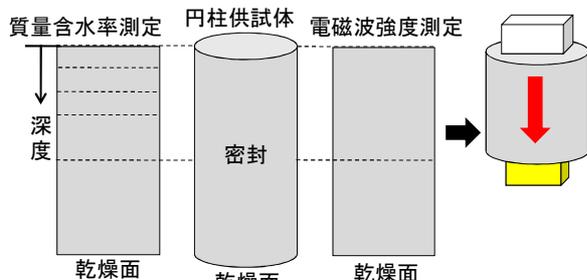


図-4 円柱供試体概要

$$f(\phi, w, d) = \alpha R(\phi, d) f(w, d)$$

$$f(w, d) = A \times d + B$$

$$R(\phi, d) = C \times w + D \quad (1)$$

ここで、 α は補正係数、 d はかぶり厚さ、 w は質量含水率であり、係数 A および B は鉄筋径 ϕ を用い次式で表わされる。

$$A = (-1.43\phi - 4.46) \times 10^{-4}$$

$$B = (1.63\phi + 14.27) \times 10^{-2} \quad (2)$$

また、係数 C および D はかぶり厚さ d の関数として次式に表わされる。

$$C = 11.58d^2 + 4416.4d - 58892$$

$$D = 8.0 \times 10^6 e^{(-0.0091d)} \quad (3)$$

しかしながら、既往の研究¹⁾ではモルタルのかぶり方向に含水率が均一ではなく、含水率と電磁波反射強度の関係式に問題があった。

3. 電磁波強度の定義と各種要因評価

3.1 電磁波強度

電磁波強度は図-3 に示すような波形のうち卓越する 3 波形の積分値を電磁波強度と定義した。本来は、全ての波形を積分することが理想であるが、それ以外の波形が全積分値に及ぼす影響は少ないため無視することとした。なお、測定時の供試体の温度は一定とした。

3.2 含水率と距離の影響評価

(1) 実験概要

本研究で使用した電磁波レーダの仕様は、中心周波数 1GHz のパルスレーダ方式であり、送受信端子が分離された構造となっている。本研究の電磁波レーダの入射波は、対応するすべての深度においてゲイン設定 57dB を基準とし、ゲイン設定 57dB で波形が崩れる場合は設定ゲインを下げ式(4)よりゲイン設定 57dB に変換すること

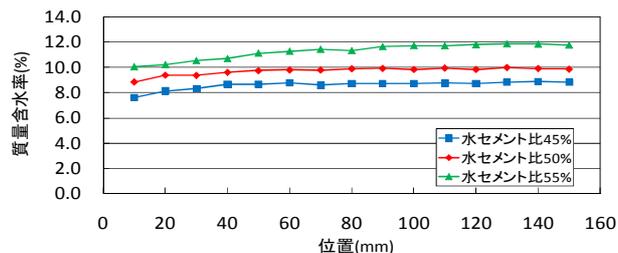


図-5 含水率分布

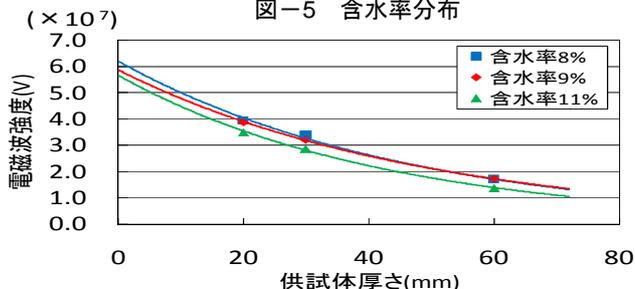


図-6 含水率による供試体厚さ-電磁波強度

によって比較を可能とした。

$$E = E_0 \times 10^{((57-G)/20)} \quad (4)$$

ここで、 E はゲイン設定 57dB に変換後の電磁波強度、 E_0 は測定した電磁波強度であり、 G は測定したゲイン設定を示している。

実験に使用した供試体は、鉄筋からの反射波を正確に把握するために骨材による電磁波への影響が少ないモルタルを使用し、鉄筋は丸鋼鉄筋を使用した。水セメント比は 45%、50%、55% の 3 水準である。

電磁波の測定は、モルタル供試体の上下面にそれぞれ送受信端子を設置して行った。含水率の管理は、図-4 に示すように直径 $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ の円柱供試体の側面および上面のみをラップにより密封し、底面のみ一面乾燥とすることで行った。脱型後ただちに水中養生し乾燥材齢 2 週間とした。なお、乾燥期間中は雰囲気温度 20°C、相対湿度 60% の環境に静置した。

含水率測定用試料は、図-4 に示す円柱供試体の深さ方向に 10mm 間隔で切断したもの(水は不使用)であり、切断した試料の質量を測定しその後、105°C の乾燥炉で絶乾状態になるまで乾燥させた。個々の試験片含水率は、次式を用いて算出した。

$$w = \frac{W_P - W_D}{W_P} \times 100 \quad (5)$$

ここで w は質量含水率であり W_P 、 W_D はそれぞれ乾燥前と乾燥後のモルタル試料の質量を示している。

(2) 含水率と距離の依存性

モルタル内の含水率分布を図-5 に示す。いずれの水セメント比においても $\pm 10\%$ の誤差範囲内にあり、ほぼ一定である。なお、含水率の平均値は水セメント比 45、50 および 55% において、それぞれ 8、9、および 11% であり、以降における含水率の差異による議論は平均含水

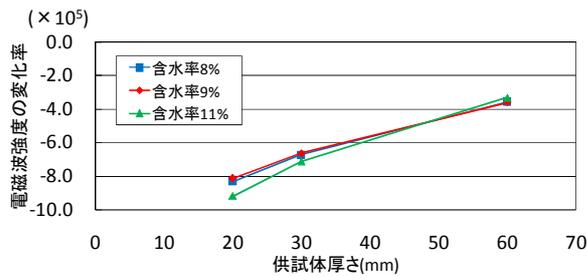


図-7 含水率による電磁波強度の変化率-供試体厚さ関係

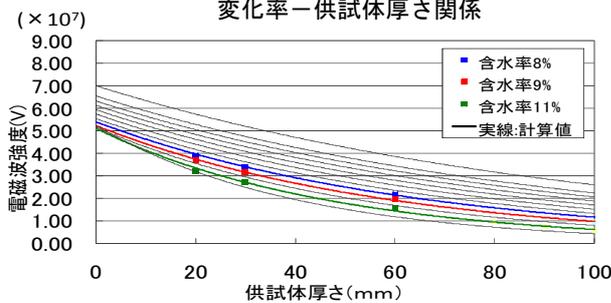


図-8 実験式から求めた各含水率の減衰と測定値の比較

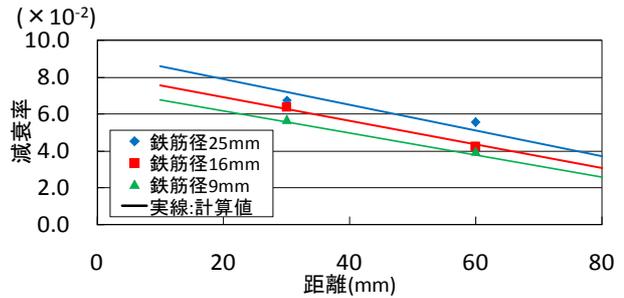


図-9 実験式より求めた減衰率と測定値の比較

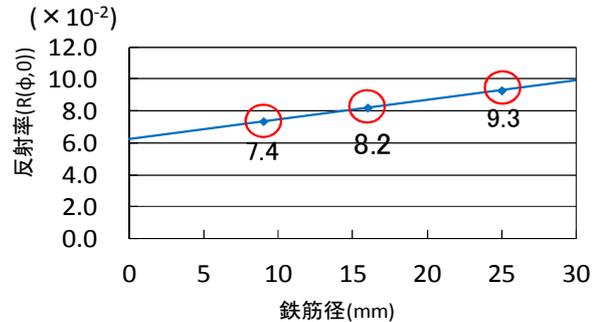


図-10 鉄筋径と反射率の関係

率を用いることとする。

電磁波強度に及ぼす平均含水率の影響をモルタルの厚さをパラメータとして図-6に示す。当然のことながら、電磁波強度への距離による減衰の影響は、供試体厚さが厚いほど大きい。含水率の差異による電磁波強度への影響は見られない。これは、含水率分布が8%~11%というように範囲が狭く、電磁波強度へ与える影響に大きな相違が無いためである。また、図-7は含水率とかぶり厚さが電磁波強度に及ぼす影響を定量的に評価したものであり、同図の曲線は、供試体厚さにおける電磁波強度の減少勾配を表している。

図-7に示すように、含水率による電磁波強度の変化率に及ぼす影響においても差異は見られない。また、いずれの含水率においても、供試体厚さが大きくなるにしたがって、変化率は0に漸近する傾向を示している。これは、かぶり厚さがある厚さ以上になると電磁波強度に与える影響が一定値に収束するためである。

電磁波強度の減衰と含水率および伝播距離の関係を式(6)に示す。実験式の右辺の第一項が含水率による減衰であり、第二項が供試体厚さによる減衰を表わしている。含水率の影響はマイクロ波水分計の原理原則より、水和による自由水の減少、水分の移動などがある。また、実験式から求めた各含水率における伝播距離による電磁波強度と測定値との比較を図-8に示す。現状ではデータ数が少ないが、本研究の範囲内では、計算値と実測値のモルタル内での距離による電磁波の減衰傾向は一致している。

$$f_{(w,d)} = (11.58 \times d^2 + 4416.4 \times d - 2.4 \times 10^6)w + 7.0 \times 10^7 \times e^{(-0.0085 \times d)} \quad (6)$$

ここで、 $f(w,d)$ はモルタル内での減衰、 d はかぶり厚さであり、 w は質量含水率を示している。

3.3 鉄筋径とかぶり厚さの影響評価

(1) 実験概要

3.1, 3.2節ではモルタルにおける電磁波強度の減衰を含水率、距離の2変数により表した。本節においては含水率分布一定状態での含水率、距離の減衰に加え鉄筋径による影響を考慮する。鉄筋径の影響を評価するため式(7)に示すように鉄筋反射以降の減衰率 $R(\phi,d)$ は、測定鉄筋反射強度データを測定減衰データで除することにより評価した。

$$R(\phi,d) = \frac{\text{測定鉄筋反射強度データ}}{\text{測定距離減衰データ}} \quad (7)$$

ここで、測定反射強度データは送受信端子一体とし、モルタル表面を一定速度で移動させた時のモルタル内での反射を取り除いた鉄筋上での反射強度データであり、測定距離減衰データは供試体を送受信端子で挟むことにより、測定した電磁波強度の減衰データである。

(2) 鉄筋径およびかぶり厚さの依存性

それぞれの鉄筋径による反射率は、レーダ方程式の散乱断面積の観点から実験値を用い、鉄筋径、かぶり厚さを変数とする実験式として式(8)に示す。

$$R(\phi,d) = (-0.08\phi - 7.2)d \times 10^{(-4.12)} + (0.38\phi + 19.87) \times 10^{(-2.5)} \quad (8)$$

ここで、 $R(\phi,d)$ は鉄筋反射以降の減衰率、 ϕ は鉄筋径であり、 d はかぶり厚さを示している。

なお、同式においてかぶり厚さ $d=0$ 、すなわちモルタルを介さずに鉄筋に直接、電磁波が入射した場合、右辺第二項のみとなり鉄筋への入射と反射直後の電磁波強度

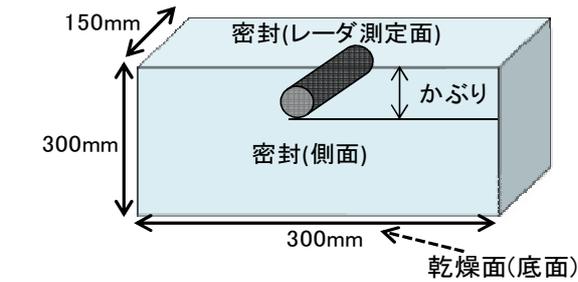


図-11 供試体寸法および乾燥状況

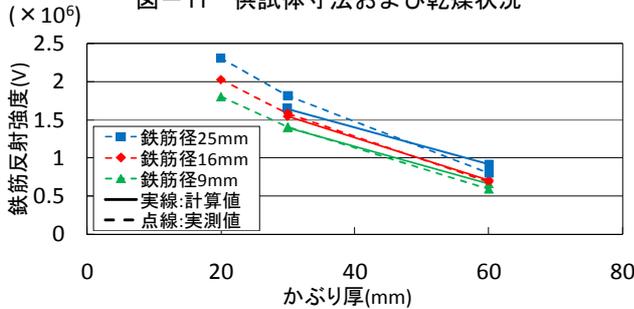


図-12 鉄筋反射強度の実験値と計算値の比較

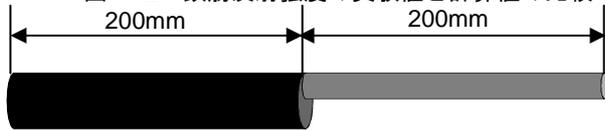


図-13 鉄筋の形状

の割合となる。これはすなわち、鉄筋での反射率を表しており、反射率はかぶり厚さによらず鉄筋径のみで評価が可能であることがわかる。減衰率の実験式による計算値と測定値との比較を図-9に示す。鉄筋径25mmにおいて多少の誤差は見られるが、全体的な傾向は一致した。図-10に鉄筋径と反射率の関係を示す。鉄筋径が大きくなるほど、反射率が大きくなる傾向を示した。これは、鉄筋径が大きくなることで反射面積が増大したためである。

3.4 電磁波強度に及ぼす各種要因の影響

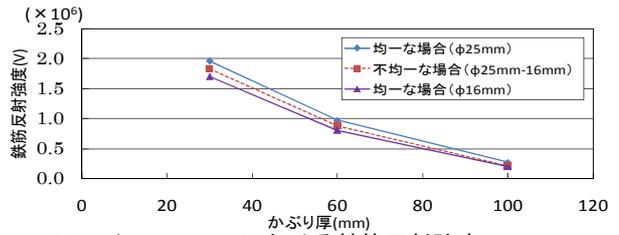
本章では電磁波強度と含水率、かぶり厚さ、鉄筋径との依存性について論じてきたが、含水率が小さいほど電磁波強度は一定の割合で大きくなり、かぶり厚さについては、深さが大きくなるほどモルタル内での減衰が大きくなるので電磁波強度が小さくなり、深さ方向に線形的に下がる傾向が見られた。また、鉄筋反射強度は鉄筋径が大きいほど大きくなっている。これは鉄筋の表面積が大きい程反射量が多くなり反射強度が大きくなるからである。

3.5 鉄筋反射強度の予測式

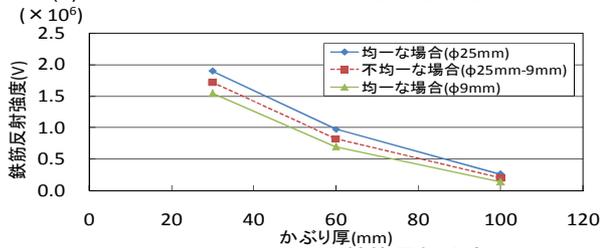
モルタルにおける鉄筋反射強度の各要素の関係式を再掲(1)に示す。同式は鉄筋径、含水率およびかぶり厚さの3変数で鉄筋反射強度を表したものである。

$$f(\phi, w, d) = \alpha R(\phi, d) f(w, d) \quad \text{再掲(1)}$$

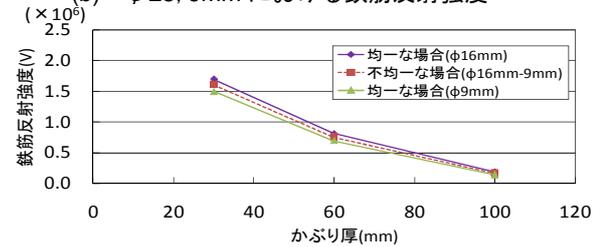
ここで、 $f(\phi, w, d)$ は鉄筋反射強度、 α は補正係数であり、本研究では補正係数を0.8としている。同式におい



(a) $\phi 25, 16\text{mm}$ における鉄筋反射強度



(b) $\phi 25, 9\text{mm}$ における鉄筋反射強度



(c) $\phi 16, 9\text{mm}$ における鉄筋反射強度

図-14 鉄筋径が軸方向に異なる部分と同じ部分の鉄筋反射強度の比較

て既往の非破壊手法と解析的手法を組み合わせることにより、かぶり厚さおよび含水率を求めることが可能である。また鉄筋反射強度は測定によって得られるので、かぶり厚さ、含水率および鉄筋反射強度を代入することで鉄筋径の推定が可能である。

4. 鉄筋径の推定手法

4.1 鉄筋径が均一な状態

(1) 実験概要

鉄筋からの反射波の測定は、図-1に示したように送受信端子を一体として鉄筋軸直交方向にモルタル表面を一定速度で移動させることにより実施した。この場合、受信端子にはモルタル表面を直接伝播した波も受信することとなる。したがって、鉄筋からの反射波のみの抽出は、鉄筋上の波形から同供試体の鉄筋と供試体側面からの反射波の影響がない無筋上の反射波を差し引くことにより実施した。また、既往の研究¹⁾と同様に抽出した反射波形のピーク値を含む3波形面積を反射強度と定義した。

使用した供試体は、図-11に示すように300×150×300mmの角柱であり、3.2節の供試体と同様の条件で養生した。乾燥状況は、同図に示すかぶり反対面のみ乾燥面とすることでかぶり厚さ領域における含水率を2.1節の結果とみなした。実験パラメータは、かぶり厚さ20, 30および60mmの3水準、含水率は8, 9および11%の

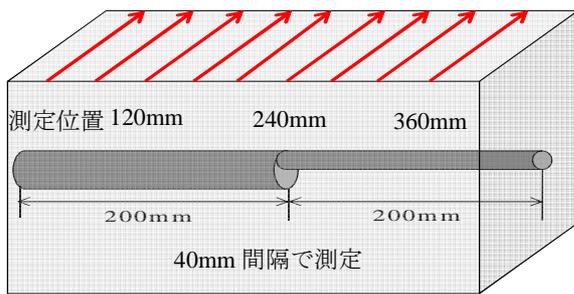


図-15 40mm 間隔での鉄筋反射強度測定方法

3 水準、鉄筋には丸鋼鉄筋を用いて鉄筋径は 9、16 および 25mm の 3 水準である。

(2) 実測値と計算値の比較

含水率 9%における、再掲(1)の計算値と実測値の比較を図-12 に示す。いずれの試験体においても、鉄筋反射強度において実測値と計算値の傾向は一致している。今後含水率、かぶり厚さおよび鉄筋径の測定データを増やすことにより精度が高いものになると考えられる。

4.2 鉄筋径が不均一な状態

本節では各種劣化要因により鉄筋径が異なる状態においても前節の手法が適用可能なように拡張を行うとともに、その精度の検討を行い、鉄筋断面減少部分が及ぼす影響について実験を行った。

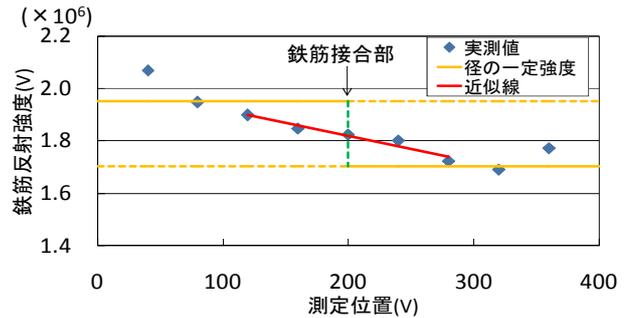
(1) 実験概要

供試体は 300×400×300mm の角柱供試体であり、3 種類の丸鋼鉄筋を図-13 のような径が不均一な鉄筋を作成することで、実構造物での鉄筋断面減少を模擬した。その鉄筋径の組み合わせは、φ25-16mm、φ25-9mm、φ16-9mm の 3 水準、かぶり厚さは 30mm、60mm、100mm の 3 水準、含水率は 8%、9%、10% の 3 水準である。

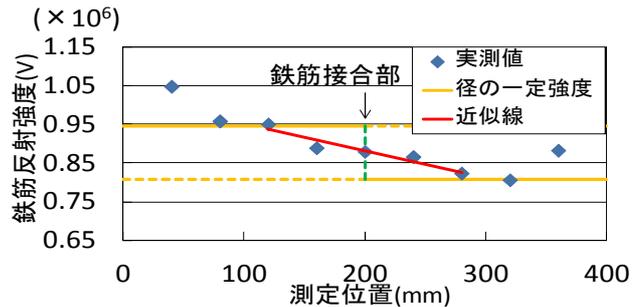
(2) 鉄筋断面減少部分が与える影響

図-14 に鉄筋径が均一な部分と不均一な部分との比較を示す。不均一な径の鉄筋反射強度は径の接合部で測定したものである。径が不均一な状態では、それぞれの均一径の中間的な値となっている。電磁波レーダで得られる強度は波状で測定を行うので、実際に測定を行う位置だけではなく、その周囲の影響も受ける。したがって、接合部を測定した場合には、その両側の径における強度の中間値となる。

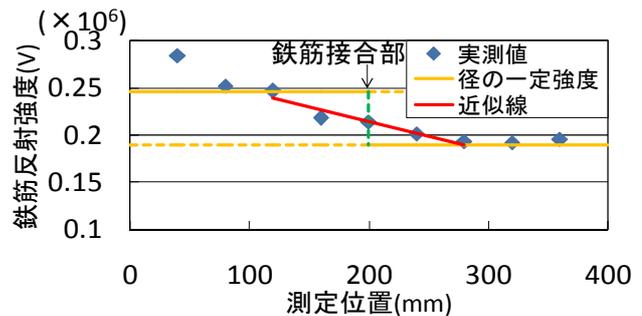
図-15 に示すように供試体に対して、40mm 間隔で電磁波強度を測定した実測値とその近似直線を図-16～18 に示す。図中に示す記号◆は実測値、朱書きの実線は鉄筋接合部を挟む測定位置 80mm～320mm における実測値の近似直線であり、破線は前節に示した各鉄筋形状における反射強度である。測定位置 200mm は径の異なる



(a)かぶり厚 30mm, 鉄筋径 25mm~16mm



(b)かぶり厚 60mm, 鉄筋径 25mm~16mm



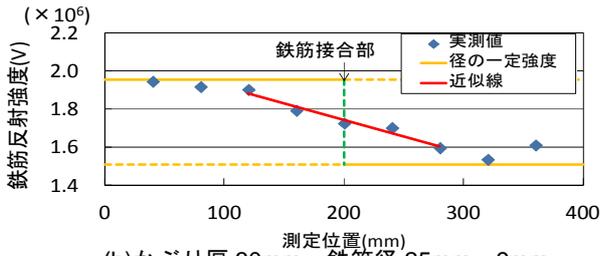
(c)かぶり厚 100mm, 鉄筋径 25mm~16mm

図-16 鉄筋径 25mm~16mm における鉄筋断面減少部分が与える影響の領域

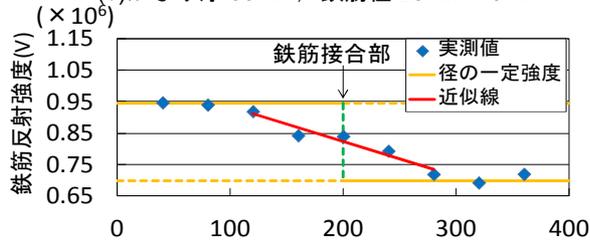
鉄筋同士の接合部であり、その位置における反射強度はそれぞれの鉄筋径の反射強度の平均値となっている。測定位置 80mm、320mm においてそれぞれ鉄筋径は均一であるので、鉄筋反射強度は鉄筋径が均一な場合とほぼ同じ値である。また、鉄筋接合部の影響は 80mm～320mm の領域で生じており、この傾向はいずれのかぶり厚さ、鉄筋径においても同一である。測定位置 40mm、360mm は強度が大きくなる傾向が見られる。これは供試体の不十分端部の反射波の影響により、電磁波強度は大きくなったと考えられる。

(3) 鉄筋断面減少を考慮した鉄筋径の推定手法

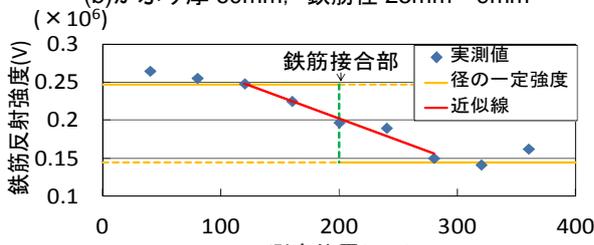
図-16～18 に示したように鉄筋断面減少部分の鉄筋反射強度はそれぞれ均一な径のほぼ中間値をとることから、鉄筋断面減少部分の径は、それぞれの鉄筋径の平均の値と仮定し、式(9)を用いて鉄筋断面減少部の鉄筋径の推定について実験を行った。その測定結果を図-19、鉄



(b)かぶり厚 30mm, 鉄筋径 25mm~9mm

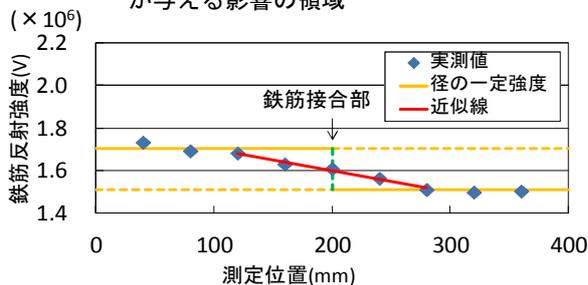


(b)かぶり厚 60mm, 鉄筋径 25mm~9mm

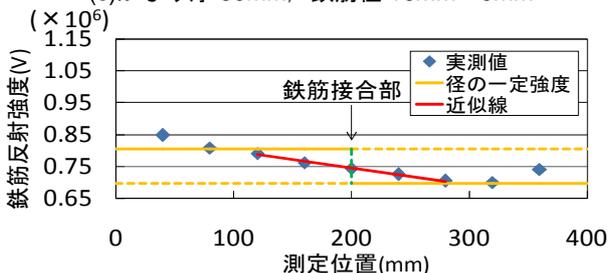


(b)かぶり厚 100mm, 鉄筋径 25mm~9mm

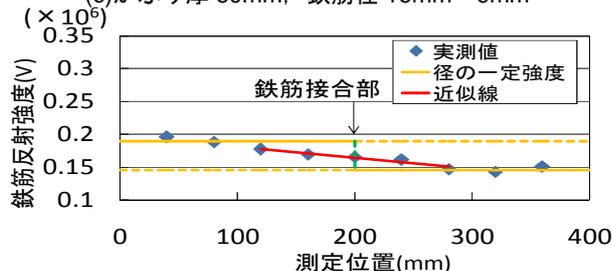
図-17 かぶり厚さ 60mm における鉄筋断面減少部
が与える影響の領域



(c)かぶり厚 30mm, 鉄筋径 16mm~9mm



(c)かぶり厚 60mm, 鉄筋径 16mm~9mm



(c)かぶり厚 100mm, 鉄筋径 16mm~9mm

図-18 かぶり厚さ 100mm における鉄筋断面減少部
が与える影響の領域

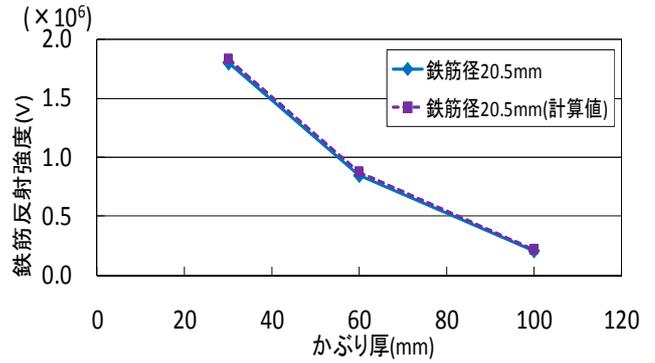


図-19 鉄筋断面減少部における鉄筋反射強度の
実測値と計算値の比較

表-1 φ 20.5mm における鉄筋反射強度

かぶり厚		30mm	60mm	100mm
鉄筋反射強度 $\times 10^6$ (V)	計算値	1.83	0.88	0.22
	実測値	1.80	0.85	0.21

筋反射強度を表-1 に示す。実測値と計算値がほぼ一致していることより実構造物において、鉄筋径が変化している箇所とその鉄筋径の推定を電磁波強度から、把握できるという可能性を示した。

5.まとめ

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) かぶり厚さについては、深さが大きくなるほどモルタル内での減衰が大きくなるので電磁波強度が小さくなり、深さ方向に線形的に下がる傾向が見られた。
- (2) かぶり厚さが及ぼす減衰の電磁波強度の影響は、供試体厚さが厚いほど減衰するが、含水率の差異による電磁波強度への影響は見られない。
- (3) 反射率は鉄筋径のみに依存しており、鉄筋径により評価が可能であり、鉄筋径が大きくなると反射強度は大きくなる。
- (4) 鉄筋断面減少部分は測定距離 80mm~320mm 部分にかけて電磁波強度に影響を与える。
- (5) 鉄筋断面減少部分の鉄筋反射強度はそれぞれの径の平均値をとることから鉄筋断面減少部分の推定が可能である。

参考文献

- 1) 赤石圭治, 王会娟, 大下英吉: 鉄筋における電磁波反射強度のかぶり厚さおよび鉄筋径の依存性に関する研究, 第 36 回土木学会関東支部技術研究発表会, V-33, 2009