中央大学 理工学部土木工学科 学生会員 須賀 大介 中央大学 理工学部都市環境学科 正会員 大下 英吉

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物のかぶり厚さ及び鉄筋 径を非破壊で予測する手法の代表として電磁波レ ーダー法が挙げられる。その手法は、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より伝播距離、 かぶりを推定するものである。しかしながらコン クリート内部での伝播速度は含水率に大きく依存 するため、事前にコンクリート内部の含水率分布 の把握が必要となるが、両者の関連性を定量的に 評価した研究は著者の知る限りでは皆無である。 さらに、電磁波レーダー法もそうであるが鉄筋径

を精度良く予測する手法も確立されていないのが 現状である。

本研究は電磁波レーダーによりかぶり厚さ及び 鉄筋径を精度良く予測する手法の確立を最終目的 として,電磁波強度に着眼し,かぶり厚さや鉄筋 径ならびに含水率との関連性を評価した。そして, モルタルからコンクリートに変えたことによる影 響を評価するための一考察を行うこととする。

2.電磁波強度に及ぼすコンクリートの減衰と含水 率

2.1 電磁波強度に及ぼすコンクリートの減衰の影響

電磁波強度は測定した電磁波の波形の最大ピー ク点を含む3波形の面積の積分値とした。電磁波 レーダーによる波形を図-2に示す。本研究で使 用した電磁波レーダーの基本的な仕様は表-1に 示すとおりである。測定は図-3に示すようにコ ンクリート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。試験片はコンクリートの円柱 供試体を30mm,60mm,100mmの長さに切断して用い た。また,電磁波強度に及ぼす平均含水率の影響を

D:かぶり厚さ

図 - 1 電磁波レーダー

表 - 1 レーダー・アンテナ仕様

方式	パルスレーダー方式
中心周波数	1GHz
探查深度	30cm 程度
測定レンジ	8,16,24ns より選択可能
移動距離計測	最小測定間隔 2.5mm(±1%)





コンクリートの試験片の厚さをパラメータとして 示したものが図-3である。電磁波強度は試験片 厚さが厚いほど線形的に減衰した。

2.2 電磁波強度に及ぼす含水率の影響

キーワード 電磁波レーダー,かぶり厚さ,鉄筋径,含水率,電磁波強度 連絡先 中央大学都市環境学科 TEL:03-3817-1892 E-mail: h_1_3_13@civil.chuo-u.ac.jp

8 7 質量岔水棒[%] 6 5 4 3 W/C55% W/C50% W/C45% 2 1 0 0 2 8 12 14 4 6 10 16 深さ[cm] 図 - 4 含水率分布 3.50E+07 含水率7% 含水率8% 3.00E+07 2.50E+07 2.00E+07 1.50E+07 1.00E+07 5.00E+06 0.00E+00 0 20 80 100 120 60 供試体厚さ[mm] 図 - 5 含水率による供試体厚さ - 電磁波強度 7.00E+07 含水率6% 含水率7% 宝線 計算值 含水率8% 6.00E+07 5.00E+07 4.00E+07 3.00E+07 2.00E+07 1.00E+07 0.00E+00 0 20 40 60 80 100 実験式から求めた各含水率の 図 - 6

減衰と測定値の比較

$$f(w,d) = (11.58 \times d^2 + 44164 \times d)$$

-3.2×10⁶)×w+6.5×10⁷×e^(-0.0092×d) (1)

電磁波レーダー法により電磁波強度を測定する ためには,コンクリート内部の質量含水率の把握 が必要である。既往の研究¹⁾ではコンクリートの 含水率について表層コンクリートは保存環境や乾 燥材齢による影響を強く受けているとしている。

そこで直径 150mm,厚さ 300mm の円柱供試体を製 作。脱型後,ただちに水中養生し,乾燥材齢 2 週 間とした。その後の養生は円柱供試体の側面及び 上面のみをラップにより封緘し,底面のみの一面 乾燥として温度 20 ,湿度 60%の試験室内で保管 した。含水率の測定は図-3に示すように含水率 に大きな影響を与えないよう円柱供試体の深さ方 向に 10 mm間隔で切断した。切断した質量を測定し, 絶乾状態になるまで乾燥させた。そして乾燥後質 量と乾燥前質量から個々の試験片の質量含水率を 求めた。含水率分布を図-4に示す。いずれの水 セメント比においても含水率はほぼ一定であり, 水セメント比 45%,50%,55%において含水率は それぞれ6%,7%,8%であった。以降における含 水率の差異による議論は平均含水率で行うとする。

電磁波強度に及ぼす含水率の影響は図-5に示 すようにいずれの試験片厚さにおいても含水率が 小さいほど強度は大きく,その割合はほぼ一定で あることがわかる。なお,モルタルとコンクリー トの比較については4章で述べるとする。

2.3 含水率と距離の依存性

コンクリート内での電磁波強度の減衰について 含水率とかぶり厚を変数とする実験式を式(1)に 示す。式中の右辺第一項が含水率による減衰,第 二項が試験片厚さによる減衰である。実験式から 求めた各含水率におけるかぶり厚さによる電磁波 強度の測定値との比較を図-6に示す。現状では データ数が少なく含水率の差異も大きくはないた め精度に問題はあるが,コンクリート内での電磁 波の減衰傾向は一致している。なお,含水率9%は モルタルの値であり,比較については第4章で述 べる。

3.鉄筋からの反射強度に及ぼす鉄筋径とかぶり厚 の影響

3.1 実験方法

鉄筋からの反射強度は反射波形の最も大きなピ ーク値を含む3つのピークの積分値とした。電磁 波の測定は図-1に示した送信端子と受信端子を 並べて測定する通常測定を用いて行った。

また,受信端子で測定される電磁波には,鉄筋か らの反射波以外に加えて,コンクリート表面を直 接伝播する電磁波が存在する。そこで,鉄筋からの 反射波から同供試体の鉄筋と供試体側面からの反 射波が入らない無筋上の表面反射波のみを差し引 くことにより鉄筋反射波のみを抽出した。

供試体の形状寸法は図 - 7 に示す角柱であり, 鉄筋は 9,16,25mm の丸鋼としてかぶり厚は 30,60, 100 mmの位置に設置されている。コンクリートは, 図 - 7 に示す底面のみを乾燥させ,それ以外は全 て封緘した状態で温度 20 ,相対湿度 60%の室内

9



図 - 9 かぶり 30 mmおける含水率に応じた減衰率









$$R(\phi, d) = (-0.07 \times \phi - 5.2) \times d \times 10^{(-4.22)} + (0.62 \times \phi + 22.17) \times 10^{(-2.48)}$$
(2)

に静置した。なお,かぶり領域における含水率の制御は,水セメント比を変化させることで実施し,その分布は図-4の含水率分布と同一とした。

3.2 鉄筋反射強度とかぶり厚及び鉄筋径の依存性

含水率7%におけるコンクリ-トの反射強度を 図-8に示す。かぶり厚が大きくなるほど,コン クリート内部での減衰が大きくなり鉄筋からの反 射強度が小さくなっている。また,鉄筋径によっ ても径が小さいほど反射強度が小さくなっている。 これは反射鉄筋面積が大きい程反射量が多くなり, 反射強度がそれに応じて増しているからと考えら れる。また,かぶり100mm付近では反射強度に大 きな差がなく,本研究のレーダーではかぶり100 mmでは鉄筋での反射波よりコンクリート表面を伝 播する波の方が大きく,正確に測定ができていな いと考えられる。電磁波レーダーの周波数をあげ ることでかぶり厚100mmも判定でき,かぶり厚30 mm,60mm間と同じ傾きで直線を描くと考えられる。

3.3 鉄筋反射強度の距離と含水率依存性

鉄筋径が電磁波強度に及ぼす影響を評価するた め,鉄筋反射から受信端子間での電磁波の減衰率 を用いて検討した。なお,減衰率は測定反射強度 データと測定距離減衰データの割合として定義し た。測定反射強度データは送受信端子一体として コンクリート表面を一定速度で移動させた時のコ ンクリート内での反射を取り除いた鉄筋上での鉄 筋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 磁波強度データである。

かぶり 30 mmにおける鉄筋径ごとの含水率に応じ た減衰率を図-9に示す。また,減衰率の実験値 より,鉄筋径,距離を変数とする実験式を式(2) に示す。なお,同式において,かぶり厚d=0の時 点で右辺第二項のみとなり鉄筋反射直前と反射直 後の電磁波強度の割合となることから,鉄筋での 反射率を表しており,反射率はかぶり厚によらず 鉄筋径のみで評価が可能である。減衰率の実験式 による計算値と測定値との比較を図-10に示す。 また,鉄筋径と反射率の関係を図-11に示す。 鉄筋径が大きくなるほど反射率が大きくなること がわかる。これは,鉄筋径が大きくなることで反射 面積が増大することによるものである。また,鉄筋 径 0 mmでは反射率 0.07 であり,これは粗骨材自体 の反射係数ではないかと考えられる。鉄筋径が大 きくなるほど反射率が大きくなることがわかった。

4. 鉄筋反射強度推定式の提案

4.1 鉄筋反射強度の予測式

鉄筋からの反射強度と鉄筋径,距離,及び含水率, とを関連付ける式は,式(3)に示すように式(1) と式(2)を乗じることで定義した。また,同式にお いて は補正係数とした。ここで,式(3)において 含水率7%,補正係数1.05とした計算値と含水率 7%の供試体の鉄筋反射強度の測定値との比較を 図-12に示すが,計算値と測定値はほぼ一致して いると考えられる。

4.2 コンクリートとモルタルの鉄筋反射強度にお ける推定式の比較

既往の研究²⁾よりモルタル中における鉄筋反射強 度は**式(3)**中の α , $R(\phi, d)$, f(w, d)が**式(4)** と なる。

 $f(\phi, w, d) = \alpha R(\phi, d) f(w, d)$ (3) $f(\phi, w, d)$: 鉄筋反射強度 $R(\phi, d)$: 鉄筋反射以降の減衰 f(w, d): コンクリート内での減衰

α : 補正係数







図 - 13 コンクリートとモルタルの推定式の比較

$f(\phi, w, d) = 0.8 \times [\{(-0.08 \times \phi - 7.2)\}$	
$\times d \times 10^{(-4.12)} + (0.38 \times \phi + 19.87) \times$	
$10^{(-2.5)}$ \ \ \ \ \ \ \ \ \ (11.58 \times d^2 + 4416.4 \times d - \)	•)
2.4×10^{6}) × w + 7 × 10 ⁷ × e ^(-0.0085×d) }]	

既往の研究におけるモルタル²⁾と本研究のコン クリートの推定式において含水率 7%の鉄筋から の反射強度の比較を図 - 13に示す。反射強度は コンクリートの方がモルタルよりも大きかった。

また,反射率に関しては既往の研究²⁾において モルタル自体の反射率は0.06だったが本研究にお いて粗骨材自体の反射率は0.07となった。この結 果からモルタルよりコンクリートの方が鉄筋から の反射強度は大きくなるといえる。

5.まとめ

電磁波レーダー法によるコンクリートの電磁波 強度,鉄筋反射強度について以下の知見を得た。 (1)コンクリート内の電磁波強度はかぶり厚が大 きい程減衰することがわかった。

(2)鉄筋反射強度は径の表面積の大きさに依存している事がわかった。また,コンクリート自体の反射率も大きな割合を占めていることが分かった。
(3)鉄筋反射強度に関してはモルタルよりコンクリートの鉄筋反射強度の方が大きくなった。これはモルタル自体の反射率よりもコンクリート自体の反射率の方が大きかったからだと考えられる。
謝辞

本研究はアイレック技建と共同で実施したもの であり電磁波レーダー及びレーダー解析ソフトは アイレック技建株式会社に提供していただきまし た。深く感謝いたします。

参考文献

1)吉岡他:中庸熱セメントを用いたモルタルおよ びコンクリートの含水率分布に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No1, pp1331~1336, 2006

2)今井智也他:電磁波反射強度に及ぼす鉄筋のか ぶり厚さと径及び含水率の影響に関する研究,土 木学会関東支部第37回, V-18