

論文 非破壊による鉄筋コンクリート中の塩分測定に関する研究

新井 淳一*1・溝淵 利明*2・坂田 昇*3・須田 久美子*4

要旨：鉄筋コンクリート中の塩分測定を非破壊で調査する方法を検討するために、塩分含有量の異なるコンクリートおよび鉄筋コンクリート供試体を用い電磁波法の適用を試みた。実験の結果、コンクリートの塩分含有量と電磁波の鉄筋からの反射波振幅量との間に高い相関があることが明らかになり、電磁波法による鉄筋コンクリート中の塩分測定の可能性を示した。

キーワード：塩害，塩分量，非破壊試験，電磁波，含水率，比誘電率

1. はじめに

コンクリート構造物の塩害による劣化診断を行う場合には、コンクリート中の塩分量を把握することが重要である。従来は、構造物から採取したコアを用いて塩分量を分析するのが一般的であるが、物理的および経済的な理由から、構造物の局所的な情報しか得られないことが多い¹⁾。しかし、面的な広がりをもつ構造物の計画的な維持管理に役立つ情報を取得するためには、広範囲の測定を非破壊で簡易に行う方法の開発が望まれている。

本論文では、電磁波の伝播特性がコンクリートの配合、含水率、塩分濃度等によって変化することに着目し、実験的に鉄筋コンクリート中の塩分測定への電磁波法の適用を試みた。

2. コンクリート中の電磁波伝播特性

電磁波がコンクリート中を伝播する速度や減衰特性は、コンクリートの電気的性質（誘電率、導電率、透磁率 μ ）によって定まる。伝播速度は式(1)に示すように、比誘電率 ϵ_r （媒体の誘電率/空気の誘電率）と真空中の光の速度 C で表されるが、コンクリートの比誘電率は乾燥状態で4~10、湿潤状態で10~20程度であり、コンクリート中の含水率によって変化する

ことが知られている²⁾³⁾。

$$v = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

一方、減衰定数 α は式(2)で表され、コンクリートの電気的性質に支配されるが、コンクリートの透磁率は電場が一定であることから変化しないとされており、したがって減衰特性は誘電率と導電率によって変化する⁴⁾。

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2)$$

比誘電率は真水および海水ともに81という同じ値になり塩分濃度による変化はないと考えられるが、導電率はコンクリート中のイオン量によって変化するとされており、例えば、真水で $10^{-4} \sim 10^{-2} (\text{S/m}; = 1/\text{m})$ 、海水で $4 (\text{S/m})$ 、乾燥状態のコンクリートで $10^{-3} \sim 10^{-2} (\text{S/m})$ 、湿潤状態のコンクリートで $10^{-2} \sim 10^{-1} (\text{S/m})$ 程度の値が示されている³⁾⁵⁾。

以上のことから、コンクリート中に塩化物イオンが存在すると導電率が変化し電磁波の減衰特性に影響を及ぼすことがわかる。すなわち、電磁波の振幅に着目することによってコンクリート中の塩分濃度の違いを検出できる可能性が見込まれる。ただし、コンクリートの含水状態によって比誘電率および導電率が変化するため、

*1 リテックエンジニアリング(株) 技術第一部 (正会員)

*2 法政大学工学部講師 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 鹿島建設(株)技術研究所 土木技術研究部材料・LCEグループ長 工博 (正会員)

*4 鹿島建設(株)技術研究所 土木技術研究部材料・LCEグループ主管研究員 工博 (正会員)

含水率の影響も併せて把握しておく必要がある。

3. 実験概要

3.1 実験要因と水準

実験要因としては、電磁波の伝播特性に影響を及ぼすと考えられるコンクリート中の塩分含有量、含水率および鉄筋の有無を設定した。塩分含有量は7水準(0,1,2,3,4,5,6kg/m³)とした。含水率は、気乾養生により経時的に供試体の含水率が減少するようにした。

なお、コンクリートの配合によって電磁波の伝播特性が異なるが、今回の実験では電磁波法の適用性を確認するのが目的であるので、配合は1水準とした。

3.2 供試体

供試体は、図-1に示す100×100×400mmの無筋コンクリート供試体(以下C供試体)と鉄筋コンクリート供試体(以下RC供試体)の2種類とした。表-1に試験ケースを示す。各供試体はコンクリートの練り混ぜ時に所定の塩分を添加して作製した。また、コンクリートの使用材料および配合を表-2および表-3に示す。

3.3 測定方法

(1) 含水率と水分逸散率

供試体は材齢31日目まで水中に浸漬し、材齢31日目から1回/日の頻度で供試体質量を計測した。材齢34日目からは電磁波の測定も併せて行った。含水率は単位体積当たりの水分量によって整理したが、経時変化を比較する場合C供試体とRC供試体には、鉄筋の有無による質量差が生じるため、式(3)に示す鉄筋の有無による影響を受けにくい水分減少量とコンクリート中の水分量の比である水分逸散率によって整理を行った。

$$\text{体積含水率(\%)} = \frac{\text{飽水状態の質量} - \text{測定値}}{\text{飽水状態の質量} - \text{絶乾質量}} \times 100 \quad (3)$$

(2) 比誘電率・振幅量

電磁波の測定には表-4に示す仕様器材を用いた。図-2に示すとおり供試体の上面に電磁波アンテナを設置し、15秒間同一地点で計測を

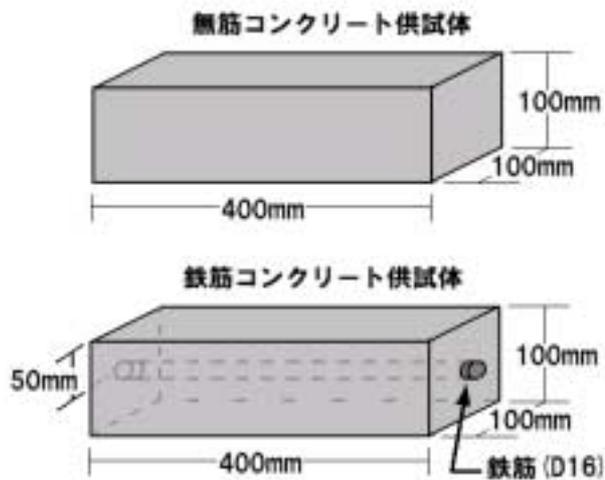


図-1 供試体概念図

表-1 試験ケース

塩分含有量	供試体番号	
	無筋コンクリート	鉄筋コンクリート
0 (kg/m ³)	C-1	RC-1
1 (kg/m ³)	C-2	RC-2
2 (kg/m ³)	C-3	RC-3
3 (kg/m ³)	C-4	RC-4
4 (kg/m ³)	C-5	RC-5
5 (kg/m ³)	C-6	RC-6
6 (kg/m ³)	C-7	RC-7

表-2 使用材料

使用材料	記号	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm ³
細骨材	S	新潟産川砂、表乾密度2.63g/cm ³ 、粗粒率2.46
粗骨材	G	上野原産硬質砂岩、表乾密度2.66g/cm ³ 、粗粒率6.89
混和剤	AD	AE減水剤、リグニンスルホン酸化合物、密度1.25g/cm ³

表-3 コンクリート配合

W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	AD
60	42	155	258	793	1108	0.81

表-4 電磁波測定装置の仕様

項目	仕様
アンテナ周波数	1.0GHz
計測モード	距離、時間計測
方式	インパルス方式
発信電圧	17V _{p-p} (50 負荷時)
水平分解能	80mm

行った。電磁波の反射波形を強調するために、供試体の下面には鉄板を敷いた。測定は材齢 34 日目から 1 回/日の頻度で 90 日間行い、天候の影響を受けないように室内で測定した。測定状況を写真 - 1 に示す。

電磁波の測定データ例を図 - 3 ~ 図 - 5 に示す。図 - 3 は C 供試体の下面に設置した鋼板からの反射波を受信するまでの時間を、図 - 4 は RC 供試体の内部に配置されている鉄筋と下面に設置した鋼板からの反射波を受信するまでの時間を示すものである。図 - 4 中の鉄筋からの反射波には、供試体下面に設置した鋼板からの反射波の影響を受けて振幅量に変化しているため、鉄筋からの反射波振幅量を求めるためには、鋼板からの反射波の影響を除去する必要がある。このため、鉄筋と鋼板からの反射波の測定デー

タから塩分含有量が同じ供試体の鋼板からの反射波の測定データを差分し、図 - 5 に示すような鉄筋からの反射波だけのデータに加工してから振幅量を求めた。振幅量の単位は測定開始時のゲインで出力される出力比の最大を基準値 (100%) として、ゲインを変えて測定した場合もこの基準値に対する比率で解析ソフト上から求めた。

比誘電率は、C 供試体の鋼板からの反射波を受信するまでの時間を、RC 供試体の鉄筋からの反射波を受信するまでの時間を式 (4) に代入して算出した。

$$\epsilon_r = \left(\frac{2D}{CT}\right)^2 = \left(\frac{2D}{3 \times 10^8 T}\right)^2 \quad (4)$$

ϵ_r : 測定時の比誘電率

D : C 供試体の鋼板までの距離 (100mm),
RC 供試体の鉄筋までの距離 (42mm)

T : 反射波を受信するまでの時間 (s)

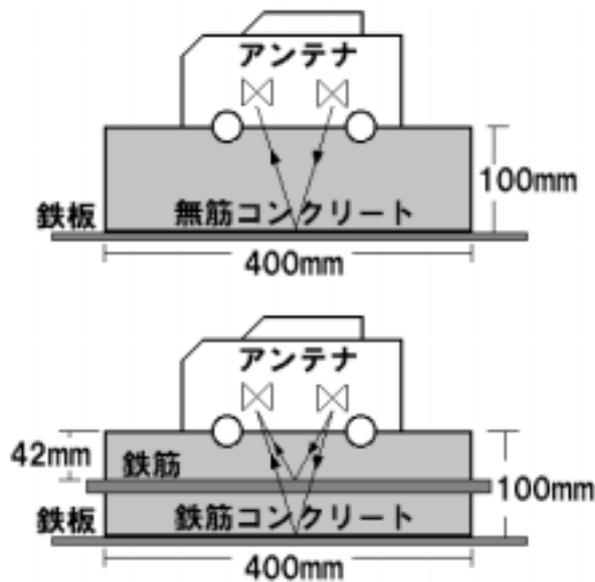


図 - 2 電磁波測定概念図



写真 - 1 電磁波測定状況

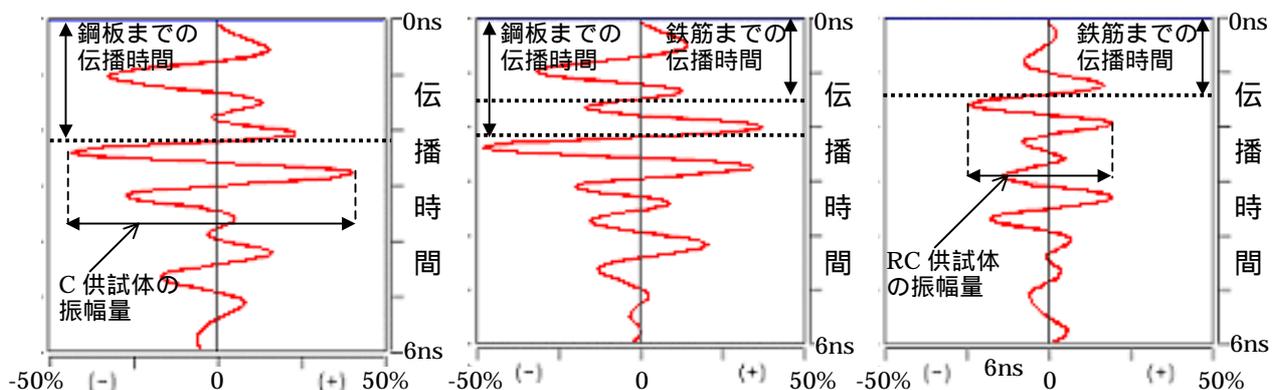


図 - 3 C 供試体の電磁波反射波 図 - 4 RC 供試体の電磁波反射波 図 - 5 差分処理波形 (RC-C)

4. 実験結果および考察

4.1 水分逸散率と塩分含有量の関係

C 供試体および RC 供試体の水分逸散率と材齢の関係をそれぞれ図 - 6 および図 - 7 に示す。C 供試体の場合、計測開始後 10 日前後で全逸散量の 20~25%程度逸散しており、計測期間内の逸散量の 50%以上が、10 日間程度の間で逸散している。RC 供試体の場合も同様の傾向が見られるが、C 供試体に比べて、全体的に 5%程度小さい結果となった。逸散率のパラツキの要因は、供試体コンクリートの密実性であると考えられ、C 供試体に比べて RC 供試体の逸散率が小さくなった理由は、RC 供試体を作成する際には鉄筋配置位置付近に空隙が生じないように入念に締固めを行ったためではないかと推測される。水分逸散率と塩分含有量との相関は特に見られない。

4.2 比誘電率と含水率の関係

比誘電率と含水率の関係を図 - 8 および図 - 9 に示す。比誘電率は供試体毎に見ると含水率の

低下に応じて比誘電率が小さくなる傾向が見られる。また、C 供試体と RC 供試体では後者の方が比誘電率の変化の度合いが大きく、鉄筋かぶりに相当する部分の比誘電率は、供試体の平均的な比誘電率に比べてばらつきが大きいことが示唆される。これは、RC 供試体における鉄筋からの反射波が鉄筋かぶりコンクリート部分を伝播しているのに対して、含水率は供試体全体の値を測定しているため、鉄筋かぶりコンクリート部分の含水率を正確に示しているわけではないためではないかと考えられる。

4.3 比誘電率と塩分含有量の関係

比誘電率と塩分含有量の関係を図 - 10 および図 - 11 に材齢 34 日、74 日、123 日における比誘電率と塩分含有量の関係を示す。塩分含有量の増加とともに比誘電率がわずかに大きくなる傾向が見られる。

4.4 振幅量と塩分含有量の関係

図 - 12 および図 - 13 に電磁波反射波形の

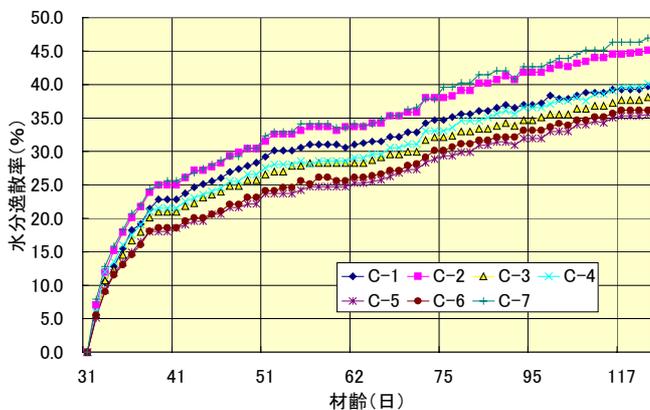


図 - 6 C 供試体の水分逸散率と材齢の関係

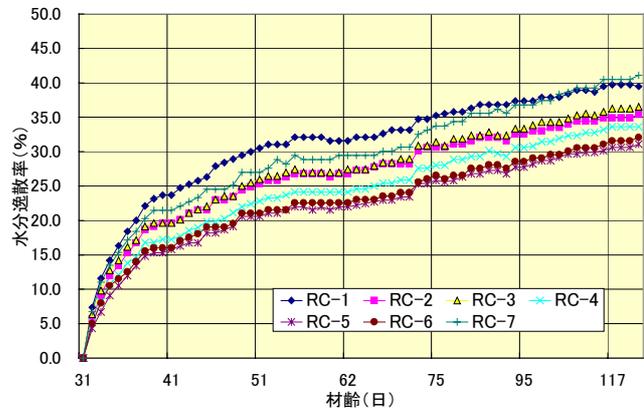


図 - 7 RC 供試体の水分逸散率と材齢の関係

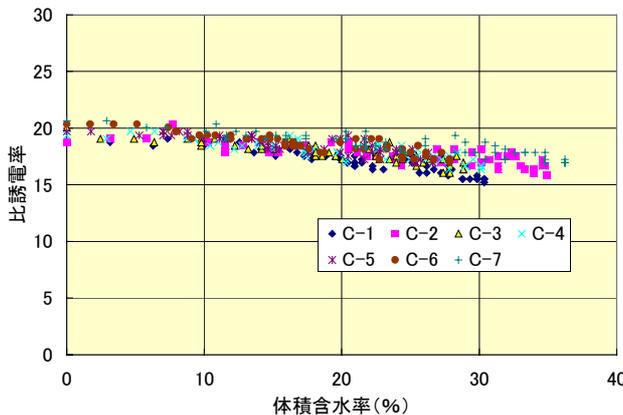


図 - 8 C 供試体の比誘電率と含水率の関係

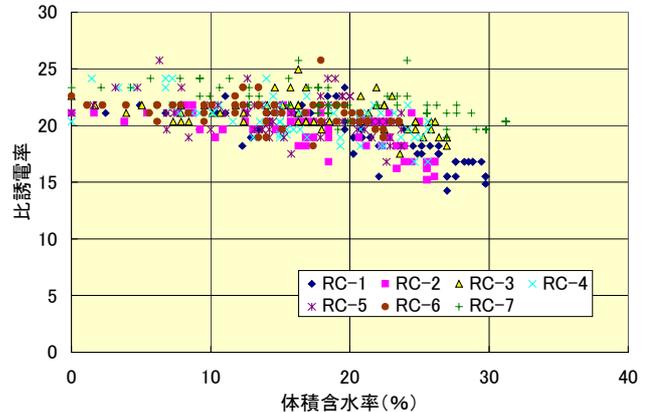


図 - 9 RC 供試体の比誘電率と含水率の関係

材齢 49 日における振幅量を塩分濃度の異なる供試体が比較できるように重ねて示す。それぞれ鋼板または鉄筋からの反射波に着目して見ると、振幅量が塩分濃度に応じて変化している(供試体番号の昇順に塩分濃度が高くなる)のが分かる。

図 - 1 4 および図 - 1 5 に材齢 34 日、74 日、123 日における反射波の振幅量を塩化物含有量ごとに示す。塩分含有量が増加するに伴い、振幅量は減少する傾向が見られる。回帰式のから振幅量と塩分含有量の相関を検証すると、C 供

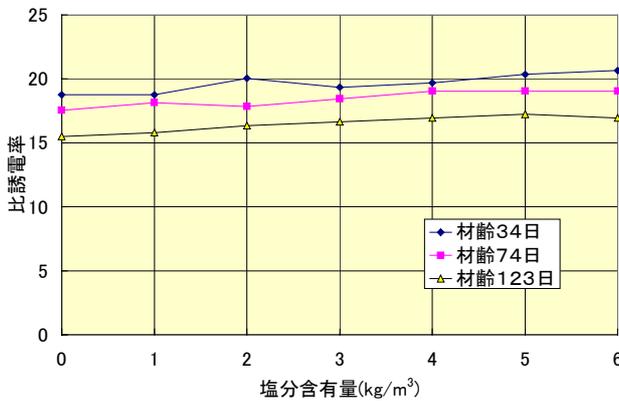


図 - 1 0 C 供試体の比誘電率と塩分含有量の関係

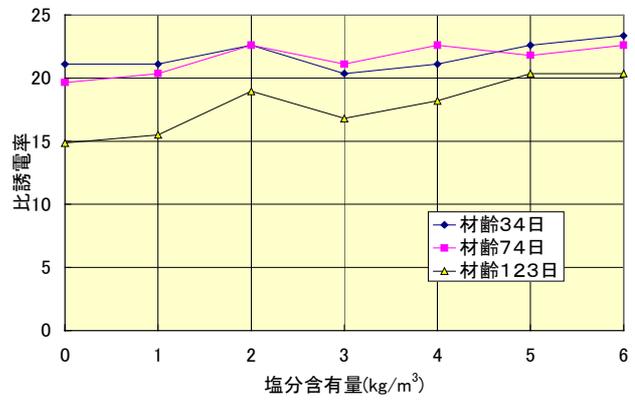


図 - 1 1 RC 供試体の比誘電率と塩分含有量の関係

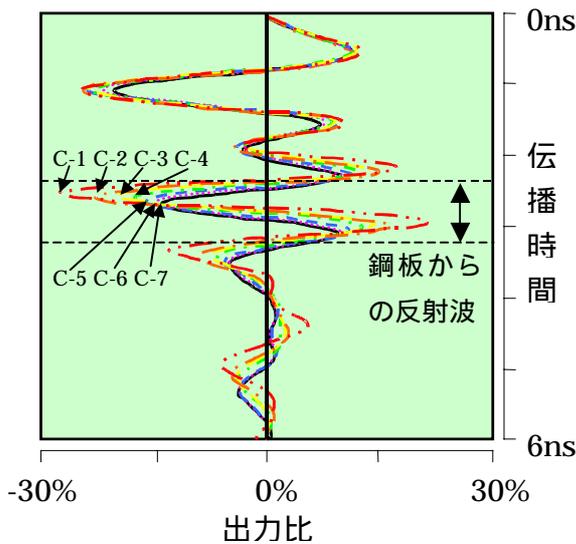


図 - 1 2 C 供試体の反射波形出力例

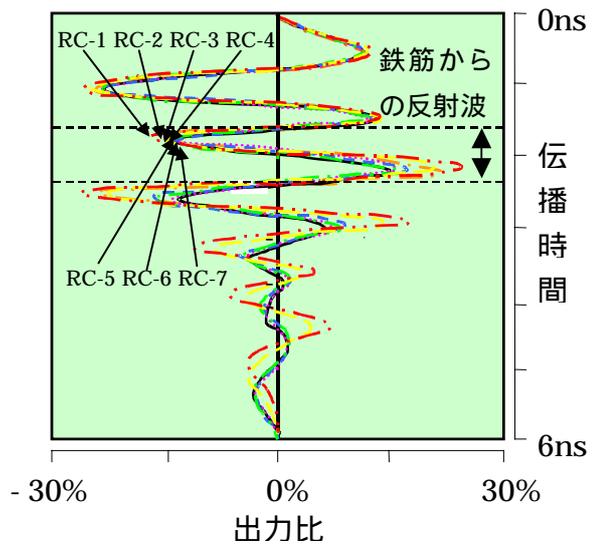


図 - 1 3 RC 供試体の反射波形出力例

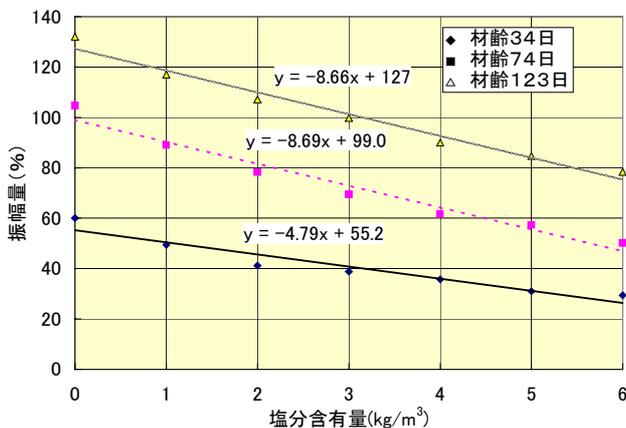


図 - 1 4 C 供試体の振幅量と塩分含有量の関係

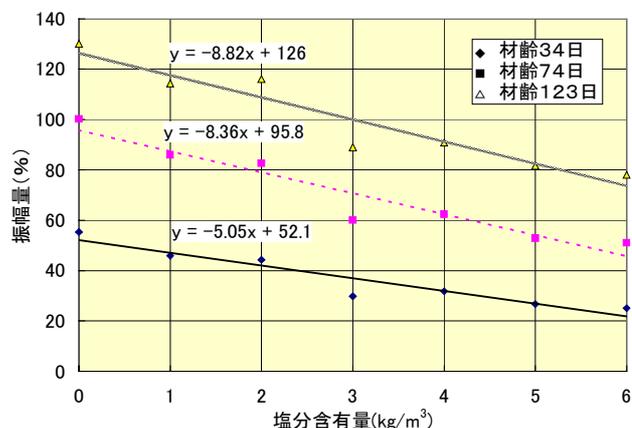


図 - 1 5 RC 供試体の振幅量と塩分含有量の関係

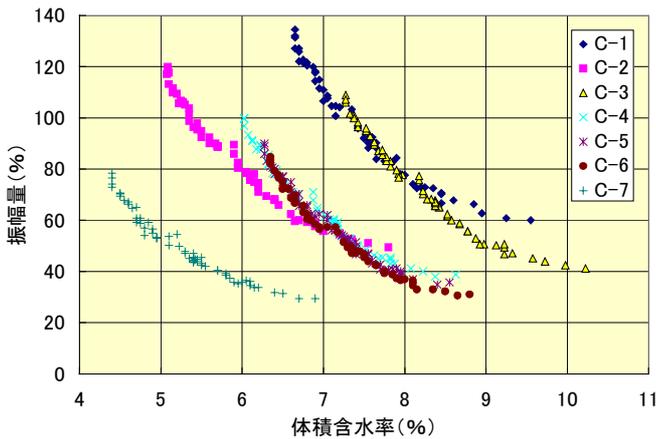


図 - 16 C 供試体の振幅量と含水率の関係
 試体と RC 供試体における差異はほとんど確認されず、材齢 34 日の回帰係数は-5 前後、材齢 74 および 123 日の回帰係数は-8.5 前後となった。また、経時変化に伴って回帰式の定数が大きくなる傾向が見られる。このことから、振幅量と塩分含有量は相関関係にあり、含水率の影響を受けて回帰定数が変化すると考えられる。ただし、含水率が極端に高いコンクリートはこの限りではない。

4.5 振幅量と含水率の関係

図 - 16 および図 - 17 に振幅量と含水率の関係を示す。いずれの供試体も含水率が低下するにしたがって振幅量は指数的に増加する傾向が見られる。

式(2)に示したように、電磁波が伝播する際の減衰特性は導電率 と比例関係にあり、比誘電率の平方根に反比例の関係にあることが分かっている。また、図 - 8 および図 - 9 に示したように比誘電率と含水率は相関あることが確認されたことから、比誘電率を測定することで振幅量に対する含水率の影響を評価することができる可能性があるのではないと思われる。

5. まとめ

鉄筋コンクリート中の塩分測定への電磁波法の適用を検討するために、塩分濃度を变化させたコンクリートおよび鉄筋コンクリート供試体を用いた実験的検討を行った結果、電磁波の反射波振幅量は、コンクリート中の塩分含有量が

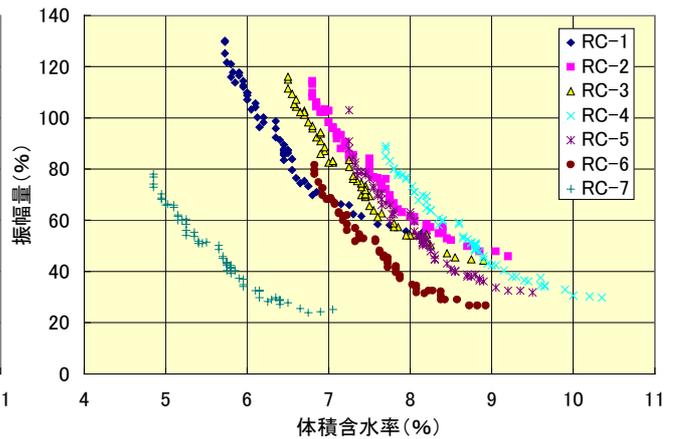


図 - 17 RC 供試体の振幅量と含水率の関係
 増加すると小さくなり、含水率が減少すると指数的な増加傾向を示すことが明らかとなった。これは、電磁波法による塩分測定の可能性を示唆するものであり、劣化調査の合理化が期待できると考えられる。

今後は、RC 供試体における鉄筋かぶりコンクリートの含水率の影響、コンクリートの配合、電磁波の周波数などの影響も考慮する必要があり、今後は実用化に向けた研究開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 腐食防食研究委員会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準（案）、日本コンクリート工学協会、pp.57-58、1987
- 2) 吉村明彦ほか：コンクリート、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9、No.2、pp.175-180、1987.6
- 3) 物理探査学会：物理探査ハンドブック 手法編、1998.
- 4) 細野敏夫：電磁波工学の基礎、昭晃堂
- 5) 吉村明彦：鉄筋位置測定のための非破壊試験 - 電磁波法 -、非破壊検査、Vol.47、No.10、pp.713-714、1998