## 論文 電磁波による鉄筋コンクリート中の塩分測定に関する一考察

溝淵 利明\*1・新井 淳一\*2・須田 久美子\*3・斎藤 健一\*4

要旨:鉄筋コンクリート中の塩分測定は,コンクリートからコアを採取して塩化物イオン濃 度を測定するのが一般的であるが,構造物を局所的ではあるが破壊することや同一部位での 時間経過を把握することができない等の課題を有している。本稿では,これらの課題に対し て鉄筋コンクリート構造物の塩分量を非破壊で評価することを目的として,電磁波を用いた 検討を行った。その結果,コンクリート中の塩分量の増減に伴い電磁波波形の振幅が変化す ることから,電磁波測定によってコンクリート中の塩分測定の可能性があることを示した。 キーワード:電磁波,非破壊試験,塩分量,比誘電率

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化要因のひとつ に塩害がある。塩害は、これまで海砂等の塩分 を含んだ材料の使用によってコンクリート中に 塩化物イオンが混入する場合や海に隣接する地 域での飛来塩分によってコンクリート表面から の浸透による場合が多かったが,最近では寒冷 地での融雪剤の散布によって,これまで塩害と は無縁であった山間部でも塩害の被害が生じる ようになってきている。塩害の場合,鉄筋が腐 食膨張して鉄筋に沿ったひび割れが生じるまで 鉄筋コンクリート構造物の表面には変状が見ら れず,早期に塩害による被害を評価するために は,構造物からコアを採取して深さ方向に一定 間隔でスライスした試験体の塩化物イオン濃度 を測定し<sup>1)</sup>,鉄筋近傍でのその時点での塩分量 を把握するとともに,塩化物イオン濃度の深さ 方向の分布から鉄筋近傍で鉄筋が腐食開始する 塩分量を推定するための予測解析を行う必要が ある。ただし、コアの採取は局所的ではあるが、 構造物に弱点部を生じさせる原因となる。また, 予測解析の場合中性化や凍結融解による表面劣 化などの複合劣化を生じるような場合には,評

価が難しい場合がある。

一方,非破壊試験は構造物に損傷を与えるこ となく,同一部位の時間経過に伴う変化を把握 することが可能な方法である。コンクリート構 造物内の塩化物イオン濃度を非破壊試験によっ て把握することが可能になれば,塩害による被 害を早期に発見することが可能となり,その対 策を講じることも早期にできることとなる。非 破壊試験には各種あるが,コンクリート内部の 状況を把握する方法に電磁波測定がある。

本稿では,この電磁波を用いてコンクリート 中の塩化物イオン濃度を把握することが可能か どうか検討するために,室内試験を実施した結 果について報告するものである。

## 2. 電磁波によるコンクリート内の塩分 測定について

2.1 電磁波の測定原理

電磁波は,探査対象との電気的性質の違いか ら発生する反射波の移り変わりを見るものであ る。したがって計測されたデータからその形状 や材質を判定することは難しい。しかしながら, 比較探査が可能であることから本手法は部材内

- \*1 法政大学講師 工学部土木工学科 工博 (正会員)
- \*2 リテックエンジニアリング(株) 技術第一部 (正会員)
- \*3 鹿島技術研究所土木技術研究部材料・LCE グループ 工博 (正会員)
- \*4 ピーシー橋梁(株)

部の材質の違いも推定可能である<sup>2)</sup>。

コンクリート用電磁波測定では,インパルス 状の電磁波をコンクリート内へ送信アンテナか ら放射すると,その電磁波がコンクリートと電 気的性質(比誘電率)の異なる物体(鉄筋等) との境界面で反射する。それを受信アンテナで 受信し,それにかかる往復の伝搬時間 T から反 射物体までの距離 D を計算するとその位置を 求めることができる<sup>2),3</sup>。

$$D=V \times T/2 (m)$$
 (1)

ここで,(1)式の V はコンクリート中の電磁 波の速度である。また,電磁波の速度と真空 中の電磁波速度とは(2)式に示す関係がある。

$$V = C \times \sqrt{\varepsilon_r} \tag{2}$$

C : 真空中での電磁波速度 3×10℃ m/s)

 $\varepsilon_r$ : コンクリートの比誘電率

2.2 コンクリート中の含水率及び塩分量と 比誘電率との関係

コンクリートの比誘電率は,一般にコンクリ ートの乾燥状態によって4~20まで大きく変化 するといわれている<sup>3),4)</sup>。また,真水と海水で は比誘電率は同じであるといわれている<sup>1)</sup>。本 研究では,図-1に示すように反射物体(鉄筋) までの距離を既知として,コンクリート表面か ら鉄筋間のコンクリート中の含水率の違いがコ ンクリートの比誘電率にどのような影響を与え るのか検討することとした。さらに,コンクリ



図 - 1 コンクリートの比誘電率測定の概要

ート中に塩分が含まれている場合に上記に示し たように比誘電率に変化がないかどうか確認す ることとした。

2.3 電磁波の受信波形と塩分量及び含水率 との関係

電磁波は,2.1 で示したように探査対象との 電気的性質の違いから発生する反射波の移り変 わりを見るものである。このことは,たとえば コンクリート中に塩分が存在している場合,コ ンクリート中に塩化ナトリウムのような電解質 が存在しており,塩分がない場合に対して電気 的性質が変化していると見ることができる。ま た,塩化物イオン濃度の違いによって電解質の 量が異なってくることとなり,コンクリート中 の含水率の変化によっても同様の傾向があるも のと思われる。この違いは,前述した真水と海 水の比誘電率が同じと仮定した場合, 伝播速度 にはほとんど影響を与えない代わりに,受信波 形に影響を与えるものと思われる。さらに、塩 化物イオン濃度や含水率の違いも受信波形に影 響すると考えられる。

そこで,本検討ではコンクリート中の塩化物 イオン濃度及び含水率と電磁波の受信波形との 関係について実験を行うこととした。

3. 検討方法

3.1 水溶液による実験

本検討では,塩化物イオン濃度と電磁波の受 信波形との関係について実験するために,塩化 物イオン濃度を 0%~10%まで変化させた水溶 液を作成し,図-2に示すような深さ 50mmのプ ラスティックの容器に各濃度の水溶液を満たし





て電磁波測定を行った。測定に際しては,容器 の下に鉄板を敷いて容器下面からの反射波を比 較することとした。

3.2 コンクリート供試体による実験

海洋構造物における飛沫帯や飛来塩分の影響 を受ける構造物,融雪剤散布による橋梁の床版 の場合,塩化物イオン濃度はコンクリート表面 に近いほど高くなっている。このような実構造 物での塩化物イオン濃度分布を模擬した供試体 を作製して,塩化物イオン濃度ごとの電磁波波 形を比較することとした。

供試体は,図-3に示すように幅 50cm,長さ 50cm,高さ3cmの層を7層重ねたもの(高さ 21cm)であり,塩化物イオンを含まないもの(供 試体 No.0),供試体内の各層間の塩化物イオン 量の差異が0.5kg/m<sup>3</sup>としたもの(供試体 No.1), 供試体内の各層間の塩化物イオン量の差異が 1.0 kg/m<sup>3</sup>としたもの(供試体 No.2)の3種類 を作製した。各供試体の各層での塩化物イオン 量を表-1に示す。

供試体の作製方法は,1 層打込んだ後,ブリ ーディングが終了した時点で表面のレイタンス を除去し,24 時間後に上面に十分水を含ませて 次層を打込み,これを繰り返し行った。

供試体に使用した材料及び配合を表 - 2 及び 表 - 3 に示す。ただし,コンクリートの配合条 件としては,設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup>(材齢 28 日), 目標スランプ 8cm,目標空気量 4.5%である。

電磁波測定は,当初図 - 3 に示す最も塩化物 イオン量が多い第7層の上面から実施する予定 であったが,各層に鉄筋を埋め込んだ場合,鉄 筋位置までの塩化物イオン量の平均値としてと らえることとなり,各層の塩化物イオン量を評 価することが難しいと判断した。そこで,各層 の塩化物イオン量を評価するために,図-4 に 示すように供試体作製硬化後各層が横方向にな るように立てて,供試体上面から100mmの位置 に深さ100mm,直径約6mmの孔をあけて,対象 とする層での塩分測定において孔に鉄筋を挿入 して行うこととした。鉄筋は対象とする層のみ



図-3 コンクリート供試体の概要

表 - 1 各供試体の各層の塩化物イオン量

供試体の層No.		初期塩化物イオン量(kg/m <sup>3</sup> )		
		供試体No.0	供試体No.1	供試体No.2
層No.	1	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.5	1.0
	3	0.0	1.0	2.0
	4	0.0	1.5	3.0
	5	0.0	2.0	4.0
	6	0.0	2.5	5.0
	7	0.0	3.0	6.0

表-2 使用材料

材料	摘要		
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度3.15g/cm <sup>3</sup>		
細骨材	新潟産川砂, 表乾密度2.63g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率2.46		
粗骨材	上野原産硬質砂岩,表乾密度2.66g/cm <sup>3</sup> ,粗粒率6.89		
混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物,密度1.25g/cm <sup>3</sup>	
	AE剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤	

コンクリート配合 表 - 3 水セメント比 細骨材率 単位量 (kg/m<sup>3</sup>) (%) (%) 水 セメント 細骨材 粗骨材 AE減水剤 AE剤 60 42 155 258 793 1108 0.81 0.388 1.5 A

挿入することとし,その他の孔については,ゴ ムキャップによって栓をした。また,同じ孔を 用いて各層の湿度を湿度計で測定した。

測定方法は,図-4 に示すように対象とする 層の鉄筋上面を通過するようにアンテナを移動 させて行った。受信波形から表面波の影響を除 いて,鉄筋からの反射波形のみを評価するため に,図-5 に示すように鉄筋直上での波形と鉄 筋の影響を受けない部位での波形を計測し,両 者の差異を求めることで図-6 に示すような鉄 筋の影響のみを評価した波形を求めることとし た。この波形において,鉄筋からの最初の反射



波の振幅を比較することで,コンクリート表面 と鉄筋間の含水率または塩化物イオン濃度が比 較評価できるものとして実験を行った。ここで, 振幅とは出力波形において図 - 6 に示すように 着目している波形の最大値と最小値との差とし ており,出力比とは,電磁波測定器の設定ゲイ ンに対する最大出力を 100%としたものである。

## 4. 実験結果及び考察

- 4.1 水溶液での電磁波測定結果及び考察
- (1) 塩化物イオン濃度と比誘電率との関係

各塩化物イオン濃度での比誘電率の算定結果 を図 - 7 に示す。比誘電率は,既往の文献<sup>4)</sup>に 示されているように塩化物イオン濃度の変化に 対してほとんど変化が見られなかった。

(2) 塩化物イオン濃度と波形振幅との関係

塩化物イオン濃度ごとの受信波波形の出力例 を図-8 に示す。測定では,塩化ナトリウム水 溶液を満たした容器上面にアンテナを直接載せ ているが,実際にはアンテナと容器上面及び容 器上面と水溶液の上面には僅かではあるが空気 層が存在する。それらの層の影響により,各波 形とも表面波が2波長表示されている。したが って,鉄板からの反射波は,3波長目にあたる こととなる。3波長目の振幅を各濃度で整理し た結果を図-9に示す。







図-8 水溶液での波形出力例

図 - 9 から,塩化物イオン濃度の増加に伴い 振幅が小さくなる結果となった。また,塩化物 イオン濃度が2%を超えると振幅の大きさにほ とんど差異が生じていない結果であった。さら に,塩化物イオン濃度が 1%以下の範囲では振幅が大きく変化しているのがわかる。鋼材腐食 発生限界濃度が 0.3kg/m<sup>3</sup>~2.4kg/m<sup>3</sup>(塩化物イ オン濃度で 0.03%~0.24%)であるといわれてい ることから,塩化物イオンの低濃度範囲で電磁 波出力振幅変化が大きいことは,コンクリート 中の塩化物イオン濃度を電磁波振幅で評価する 可能性を示すものである。

4.2 塩化物イオン濃度分布のあるコンクリ
 ート供試体での測定結果及び考察

塩化ナトリウムを添加していない供試体 No.0 及び塩化ナトリウムを添加した供試体 No.1において,湿度計を用いて測定した相対湿 度結果を基に,コンクリート中の含水率を算定 した含水率履歴を図-10に示す。図-10から, 供試体 No.0 の場合測定日数の経過とともに含 水率は各層とも徐々に低下する傾向にあった。 また,第1層と第7層は,他の層に比べて外気 と接する面が大きいため,低下の程度が他の層 よりも大きい結果となった。供試体 No.1におい ても供試体 No.0 と同様に第1,第7層が他の層 に比べて含水率低下が速い結果となった。

比誘電率は ,図 - 11 に示すように供試体 No.0 において,測定日数の経過とともに供試体内部 が僅かではあるが乾燥することから,若干低下 する傾向を示したものの,各層ともほぼ一定の 値を示した。塩化物イオン量が各層で 0.5kg/m<sup>3</sup> 異なる供試体 No.1 においても図 - 12 に示すよ うに供試体 No.0 と同様に各層での差異は見ら れず,ほぼ一定値を示す結果となった。

受信波形の振幅は,図-13に示すように材齢 の経過に伴い各層とも増加する傾向が見られた。 これは,含水率の低下に伴いコンクリート中の 電解質の量が減少したことに影響しているので はないかと思われる。測定日数ごとで同一層に おいてばらつきが見られるが,これは,隣接す る鉄筋の影響を避ける目的で測定ごとに鉄筋を 挿入する方法を用いたことより,孔と鉄筋が完 全に密着していないことが影響したものと思わ れる。



次に,計測開始後7日,28日及び91日での 塩化物イオン量と受信波の振幅との関係を図-14に示す。

図 - 14 から,試験開始からの経過日数ごとで

比較すると,ばらつきはあるものの水溶液の場 合と同様に塩化物含有量の増加に伴い振幅が減 少する傾向が見られた。また,日数の経過に伴 い塩分含有量の変化に対して振幅の大きさも増 加する傾向が見られた。これは,電磁波の受信 波形の鉄筋からの振幅がコンクリート中の塩化 物イオン量の影響を受けていると考えられるこ とから,電磁波を用いて塩化物イオン量を評価 できる可能性があることを示すものである。

5. まとめ

鉄筋コンクリート構造物の塩分量を非破壊で 評価することを目的として電磁波を用いた検討 を行った。塩化物イオン量が電磁波に及ぼす影 響を評価するために,塩化物イオン濃度の異な る水溶液で実験を行った結果,塩化物イオン量 の増加に伴い電磁波の受信波形の振幅が低減す る現象が見られた。また,コンクリート供試体 における実験においても,ばらつき及び低減量 が大きいものの,コンクリート中の塩化物イオ ン量の増加に伴い電磁波波形の振幅が小さくな る現象が見られたことから,電磁波測定によっ てコンクリート中の塩分測定の可能性があるこ とを示すことができた。

本検討では,電磁波による塩分測定の可能性 を示したものの,定量的に評価できるかどうか まで十分に検討を行うことができなかった。ま た,測定時のばらつきについても,コンクリー ト中の含水率の影響や測定方法を考慮する必要 があることから,今後これらの点も含めてさら に検討していく予定である。

## 参考文献

- 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
- 吉村明彦ほか:コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書,日本コンクリート工学協会,pp.132-142,2001
- 3) 森濱和正,笠井芳夫,湯浅昇:コンクリート内部



図 - 14 塩化物イオン量と振幅との関係

の含水状態と比誘電率の関係,日本非破壊検査協会平成11年春季大会講演概要集,pp.91-94,1999
4) 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