論文 電磁波による鉄筋コンクリート中の塩分測定方法における影響要因に関 する一考察

藤本 恭一*1・新井 淳一*2・須田 久美子*3・溝渕 利明*4

要旨:電磁波により鉄筋コンクリート中の塩分量を非破壊で測定する際に,セメントの種類が塩分 量推定に与える影響について検討した。また,含水率を一定とした供試体での測定も行った。さら に,これまでの研究成果から,時間計測は比較的精度よく塩分量を推定できたことから,距離計測 の適用を目的とし,時間計測と距離計測の比較検討を行った結果,距離計測は時間計測と同程度の 塩分量推定精度を示した。

キーワード:非破壊試験,電磁波,塩分量,比誘電率,振幅

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物内に塩分が存在する 場合,鋼材の腐食によりコンクリートのひび割 れや剥離を引き起こし,構造物の劣化を促進す るため,鉄筋コンクリート構造物内の塩分量を 把握することは重要な課題といえる。これまで の研究成果において,電磁波により鉄筋コンク リート中の塩分量を非破壊で測定する可能性が あり,電磁波の減衰特性が塩分の影響を大きく 受けることから,比誘電率と導電率が塩分量推 定精度に大きく影響を与えることが報告されて いる¹⁾²⁾。

そこで,本検討はこれらの影響要因が,コン クリート中のイオン物質,水分量等により決定 されることから,セメントの種類,コンクリー ト中の含水率,測定方法の違いに着目して塩分 量推定精度について検討したものである。



図 - 1 電磁波測定原理

2. 電磁波測定方法

電磁波測定は,表-1に示す仕様器材を用い て行うこととした。図-1に示すように,コン クリート内にインパルス状の電磁波をアンテナ から送信すると,電気的性質の異なる物体(鉄筋 および鉄板)で反射し,電磁波を受信するまでに 要する往復の伝播時間から反射物体までの距離 を求めることができる³⁾⁴⁾。そこで,本検討で は反射物体(鉄筋および鉄板)までの距離を既知

表 - 1 電磁波測定装置仕様

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



*1 法政大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (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 鹿島建設(株)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 法政大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

とすることにより,比誘電率を求めることとし た。また,図-1 に示すように,鉄筋コンクリ ート供試体においては,鉄筋からの反射波に表 面波および鉄板からの反射波が影響するため, それらを除去する必要がある。そこで,本検討 では鉄筋直上での出力波形と同供試体の鉄筋の 影響を受けにくい位置での出力波形の差異から 鉄筋からの反射波形を取得することとした。図 -2 に鉄筋からの反射波形を取得することとした。図 -2 に鉄筋からの反射波形を取得することとした。図 -2 に鉄筋からの反射波形を取得することとした。図 したものである。

3. 検討項目

3.1 セメントの種類の違いによる精度検討 本検討では,4種類のセメント(普通ポルトラ ンドセメント(N),高炉セメント B 種(BB),フ ライアッシュセメント B 種(FB),低熱ポルトラ ンドセメント(L))を用いた場合の電磁波測定を 行った。

使用材料およびコンクリート配合を表 - 2 お よび表 - 3 に示す。ここで,コンクリートの配 合条件は,粗骨材最大寸法 20mm,水セメント 比 50%,スランプ 12cm,空気量 4%である。

供試体は,10×10×40cm(小型供試体)とした。 また,4 水準の塩分(0.0,1.0,2.0,3.0kg/m³)を 練混ぜ時に添加した。コンクリートを打込み後, 材齢7日まで湿布養生した後脱型し,電磁波測 定を開始した。また,脱型後は気乾養生とした。

電磁波測定は,時間計測により比誘電率およ び振幅を算出した。また,電磁波測定に併せて 供試体質量,アンテナ内部温度および外気温の 測定も行った。

3.2 含水率の違いによる精度検討

コンクリート中の含水率の変化は,比誘電率 および振幅に影響を与えるといわれていること から¹⁾²⁾,本検討では,含水率を一定とした絶 乾および湿潤状態とした場合の電磁波測定を行 った。

使用材料およびコンクリート配合は,普通ポ

ルトランドセメントを用いたものと同様である。

供試体は,10×10×40cmとし,塩分含有量は セメントの種類を変えた場合と同様である。絶 乾状態とした供試体は,コンクリートを打込み 後,材齢7日まで湿布養生した後脱型し,材齢 28日まで気乾養生した後,乾燥炉に入れ質量変 化が見られなくなった時点で電磁波測定を開始 した。湿潤状態とした供試体は,コンクリート を打込み後,材齢7日まで湿布養生した後脱型 し,材齢28日までコンクリート中と同じ塩分濃 度の水溶液に浸漬し,水中養生させた後電磁波 測定を開始した。

電磁波測定は,時間計測により比誘電率およ び振幅を算出した。測定時には,絶乾および湿 潤状態とした供試体をそれぞれ乾燥炉および水 溶液から取り出し,湿潤状態とした供試体は表 面の水分を十分に拭き取った。また,電磁波測 定に併せて供試体質量,アンテナ内部温度およ び外気温の測定も行った。

3.3 測定方法の違いによる精度検討

電磁波による測定方法は,同一箇所で経時的 に送受信時間を計測する時間計測とアンテナを 移動させながら送受信時間を計測する距離計測 に分類される。時間計測は波形が安定して取得 できるものの,測定場所によっては塩分量が不 連続に変化している場合も考えられ,形状的に 困難な場合がある。一方,距離計測はアンテナ を移動させて計測を行うため,実構造物におい

表-2 使用材料(小型供試体)

		100		- 1.	~/ '.	11.1.1	J	17 / 1-1	rt·)	
		普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm ³)								
		高炉セメントB種(密度 3.04g/cm ³)								
ビスノロ		フライアッシュセメントB種(密度 2.95g/cm ³)								
	ĺ	低熱ポルトランドセメント(密度 3.24g/cm ³)								
細骨材		鬼怒川産川砂(表乾密度 2.52g/cm ³ , 粗粒率 2.73)								
粗骨材		岩瀬産砕石(表乾密度 2.64g/cm ³ ,粗粒率 6.66)								
旧和刘		AE減水剤 リグ								
混和剤 AE剤			変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤							
表 - 3 コンクリート配合(小型供試体)										
オメント	水	セメン	細骨	材率			単位量	≧(kg /m³)	
ビハノト	۲	比(%)	('	%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤
Ν			4	14	174	348	750	999	1.088	-
BB FB	50		43	168	336	738	1025	1.050	4A	
		50		43	172	344	728	1010	1.075	4A
L			4	46	166	332	802	986	1.038	0.5A

ては, 広範囲を短時間で計測できることから, 時間計測よりも距離計測の適用が望まれるとい えるものの,既往の研究¹⁾²⁾においては,時間 計測よりも距離計測の塩分量推定精度が低いと いう報告がある。そこで,本検討では実構造物 に対する距離計測の適用を目的とし,塩分含有 量の異なった供試体を重ね合わせることで,実 構造物を考慮した塩分分布のある場合の供試体 を用いて,時間計測と距離計測の電磁波測定の 比較検討を行った。

使用材料およびコンクリート配合を表 - 4 お よび表 - 5 に示す。ここで,コンクリートの配 合条件は水セメント比 60%,設計基準強度 24N/mm²(材齢 28日),スランプ8cm 空気量 4.5% である。

供試体は,図-3 に示すように,50×50× 21cm(大型供試体)で3cm 厚の層を7層重ねて2 体作製した。また,各層には,表-6 に示す塩 分を練混ぜ時に添加した。供試体作製後に小口 径コアボーリングにより深さ14cmまで削孔し, D19の異形鉄筋を挿入した。

電磁波測定において図-4 に示すように,時 間計測は、表面波および鉄板からの反射波の影 響を除去するため、鉄筋直上でアンテナを設置 し受信した波形と鉄筋の影響を受けにくい供試 体中央部でアンテナを設置し受信した波形の差 異から各層の鉄筋からの反射波による比誘電率 および振幅を算出した。距離計測は,表面波お よび鉄板からの反射波の影響を除去するため、 鉄筋直上断面(図 - 3 の A-A 断面および B-B 断 面)にアンテナを移動させて受信した波形と鉄 筋の影響を受けにくい供試体中央部でアンテナ を移動させて受信した波形の差異から各層の鉄 筋からの反射波による比誘電率および振幅を算 出した。また,電磁波測定に併せて各層に設け た深さ 10cm 直径 6mm の孔に湿度計を挿入し, 各層の供試体内部の相対湿度および温度の測定 を行った。

4. 測定結果および考察

表-4 使用材料(大型供試体)

 セメント 普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³)					
細骨材	材 新潟産川砂(表乾密度 2.63g/cm ³ ,粗粒率 2.46)				
粗骨材	上野原産硬質砂岩(表乾密度 2.66g/cm ³ ,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 ³)			
	AE剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤			

表-5 コンクリート配合(大型供試体)

水セメント比	細骨材率	単位量(kg/m ³)					
(%)	(%)	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	1.5A

作い今右黒

主の

园NI-	塩分含有量(kg/m ³)				
層NO.	供試体No.1	供試体No.2			
1	0.0	0.0			
2	0.5	1.0			
3	1.0	2.0			
4	1.5	3.0			
5	2.0	4.0			
6	2.5	5.0			
7	3.0	6.0			



図-3 供試体概要図(大型供試体)



4.1 セメントの種類の違いによる測定結果 および考察

図 - 5 に塩分含有量 2.0kg/m³の場合における 比誘電率の経時変化を示す。各セメントともば らつきはあるものの,材齢の経過に伴い比誘電 率は小さくなる傾向にあった。これは,水分の 逸散に伴って比誘電率が小さくなるためである と考えられる¹⁾²⁾。

図 - 6 に材齢 90 日での比誘電率とセメントの 種類との関係を示す。塩分含有量 0.0kg/m³の場 合,比誘電率のセメントの種類による影響はほ とんど見られず,ほぼ同様の値を示した。塩分 含有量 2.0kg/m³の場合,各セメントともわずか ではあるが大きくなる傾向にあった。

図 - 7 に塩分含有量 2.0kg/m³の場合における 振幅の経時変化を示す。各セメントともばらつ きはあるものの,材齢の経過に伴い大きくなる 傾向にあった。また,N,L はほぼ同様の増加 傾向を示し,混合セメントである BB FB は N, L よりも大きな値でほぼ同様の増加傾向を示し た。

図 - 8に材齢90日での振幅とセメントの種類 との関係を示す。BB,FBの振幅に対し,N,L の振幅は小さくなる傾向にあった。また,各セ メントとも塩分量の増加に伴い,振幅は小さく なる傾向を示した。

図 - 9 に材齢 90 日での各セメントの重回帰分 析による塩分推定量を示す。ここで,重回帰分 析を行うにあたり,単回帰分析を行った結果, 説明変数同士の相互作用の影響が小さいことか ら,独立変数として重回帰分析を行った。説明 変数は比誘電率,振幅,質量減少率,アンテナ 内部温度および外気温とした。また,質量減少 率は測定開始時の供試体質量に対する測定開始 からの供試体質量減少量の比から算出した。

図 - 9 から FB の場合,比較的精度よく塩分量 を推定することができた。一方,N,BB,Lに おいては,塩分含有量 2.0kg/m³までは比較的精 度よく塩分量を推定できたものの,塩分含有量 3.0kg/m³の場合,塩分量を低く推定する傾向に



図-8 振幅とセメントの種類との関係

-1670-

あった。

4.2 含水率の違いによる測定結果および考 察

図 - 10 に絶乾および湿潤状態とした供試体 における比誘電率の経時変化を示す。コンクリ ートの比誘電率は一般に乾燥状態で4~12 程度, 湿潤状態で4~20 程度といわれている³⁾。本検 討での絶乾および湿潤状態とした供試体の比誘 電率もほぼ同範囲内の値を示していることを確 認した。また,絶乾,湿潤状態ともに比誘電率 は塩分量に関係なく,ほぼ同様の値を示す傾向 にあった。

図 - 11 に絶乾および湿潤状態とした供試体 における振幅の経時変化を示す。絶乾状態とし た供試体は塩分量の増加に伴い,わずかではあ るが振幅が減少する傾向にあった。また 絶乾, 湿潤状態ともに材齢の経過に伴い,わずかでは あるが振幅が増加する傾向にあった。絶乾状態 とした供試体の振幅と湿潤状態とした供試体の 振幅に大きな差異があることから,含水率は振 幅に大きな影響を与えるものと考えられる。

図 - 12 に絶乾および湿潤状態とした供試体 の材齢 100 日での重回帰分析による塩分推定量 を示す。ここで,説明変数はセメントの種類を 変えた場合と同様である。ここでは,質量減少 率を含水率とした。含水率は供試体の絶乾状態 を含水率 0%とし,絶乾質量に対する測定時の コンクリート中の水分量の比から算出した。

図 - 12 から湿潤状態とした供試体の塩分量 推定精度は比較的高い結果となった。一方,絶 乾状態とした供試体の塩分量推定精度は湿潤状 態とした供試体と比較して低い結果となった。 これは,コンクリート中で塩化ナトリウムがど の程度溶解しているのかということに影響して いるものと思われる。この点に関しては,今後 さらに検討していく必要がある。

4.3 測定方法の違いによる測定結果および考察

図 - 13 に供試体 No.1 の各層における比誘電 率の経時変化を示す。比誘電率は塩分量の増加



図 - 12 絶乾状態と湿潤状態の塩分推定量

に伴い減少する傾向を示したものの,既往の研究¹⁾²⁾では塩分量が比誘電率にほとんど影響を 与えないといわれていることから,測定深度が 比誘電率に影響を与えるのではないかと思われ る。

図 - 14 に供試体 No.1 の各層における振幅の 経時変化を示す。振幅は材齢の経過に伴い,ば らつきはあるものの,わずかではあるが増加す る傾向を示した。

図 - 15 に供試体 No.1, No.2 の各層における測 定開始 120 日後での重回帰分析による塩分推定 量を示す。ここで,説明変数は比誘電率,振幅, 含水率および供試体内温度とした。また,含水 率は湿度計により測定した相対湿度から算出し た。本検討においては目的変数である塩分含有 量は,各層までの含有量の平均値とした。

図 - 15 から時間計測,距離計測ともに全体と して塩分含有量に対し比較的高い塩分推定量を 示した。これは,含水率を湿度計により推定し ていることが影響しているのではないかと思わ れる。また,時間計測と距離計測はほぼ同様の 塩分量推定精度を示す結果となった。

5. まとめ

電磁波法による塩分測定において,セメント の種類の違い,含水率の違いが塩分量推定精度 に大きく影響することが確認できた。また,時 間計測と距離計測がほぼ同様の塩分量推定精度 を示したことから,実構造物に対する距離計測 の適用の可能性があると思われる。

今後は, さらに実用化に向けた検討を行って いく予定である。

参考文献

- 新井淳一ほか: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,コンクリート 工学年次論文集,Vol.24,No.1,pp.1515-1520, 2002
- 2) 溝淵利明ほか: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,コンクリー



図 - 15 時間計測と距離計測の塩分推定量

ト工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1509-1514, 2002

- 3) 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.712-716, 1998
- 4) 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