

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。

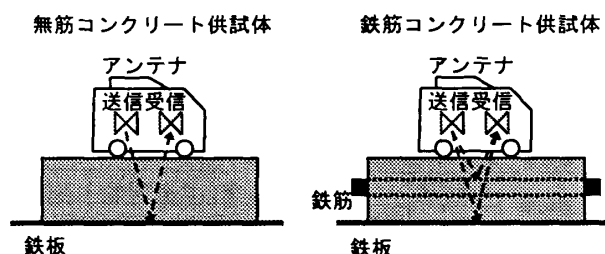


図-1 電磁波測定原理

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 (50Ω負荷時)
水平分解能	80mm

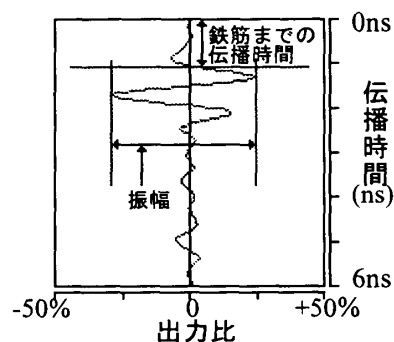


図-2 鉄筋からの反射波形

*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示す。ここで、振幅とは鉄筋位置での最大値と最小値の差であり、出力比は出力比率に対する最大出力を 100%としたものである。

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)

セメント	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)	
	フライアッシュセメントB種(密度 2.95g/cm ³)	
	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	岩瀬産碎石(表乾密度 2.64g/cm ³ , 粗粒率 6.66)	
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-3 コンクリート配合(小型供試体)

セメント	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
N	50	44	174	348	750	999	1.088	-
BB		43	168	336	738	1025	1.050	4A
FB		43	172	344	728	1010	1.075	4A
L		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と比較検討を行った。

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/mm^2 (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、 $50 \times 50 \times 21\text{cm}$ (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/cm^3)		
細骨材	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

表-6 塩分含有量

層No.	塩分含有量 (kg/m^3)	
	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

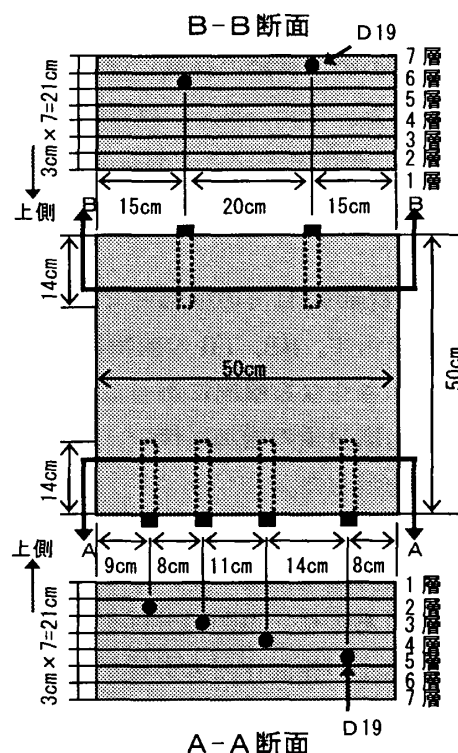


図-3 供試体概要図 (大型供試体)

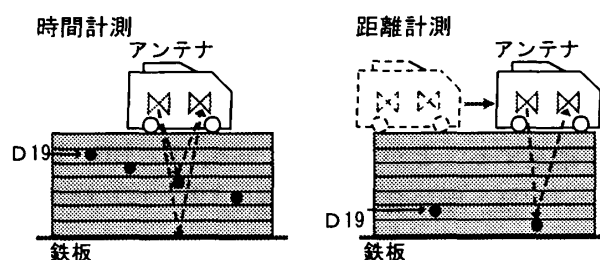


図-4 電磁波測定概要図

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/m^3 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/m^3 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/m^3 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/m^3 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/m^3 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/m^3 の場合、塩分量を低く推定する傾向に

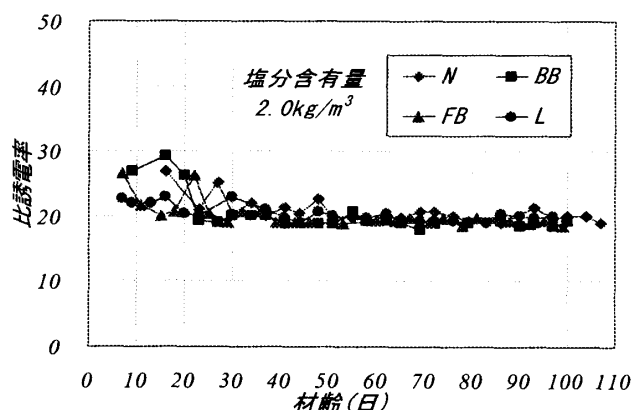


図-5 各セメントにおける比誘電率

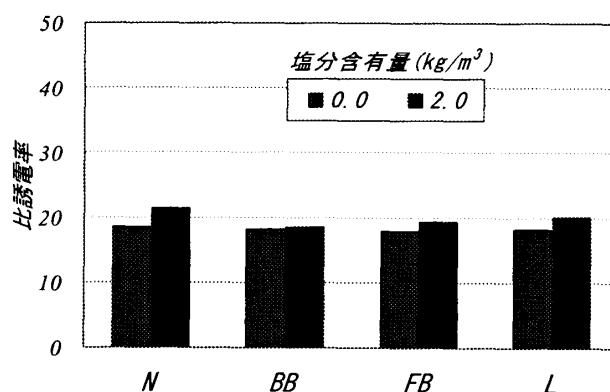


図-6 比誘電率とセメントの種類との関係

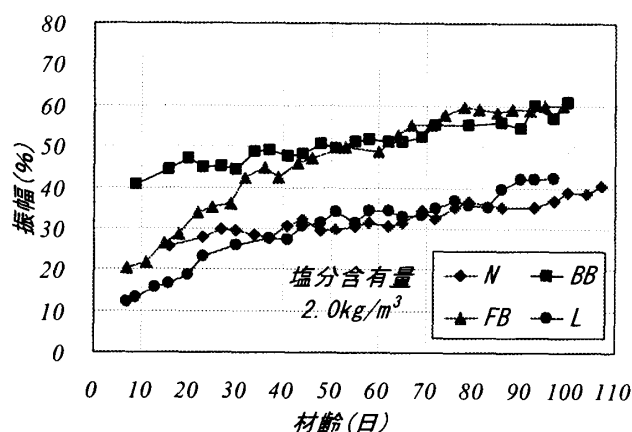


図-7 各セメントにおける振幅

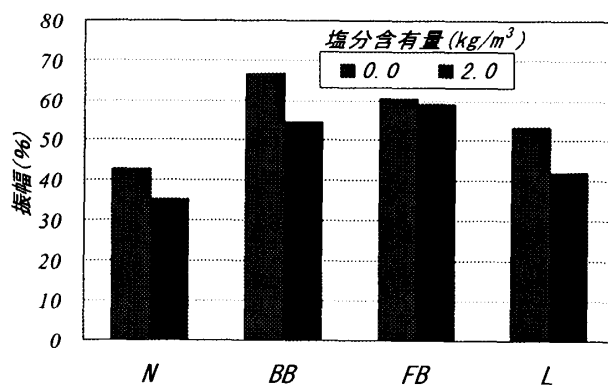


図-8 振幅とセメントの種類との関係

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

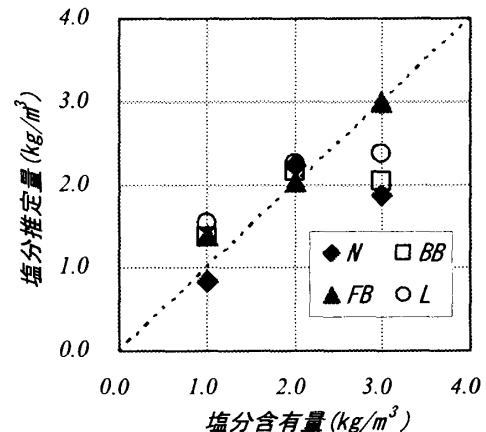


図-9 各セメントの塩分推定量

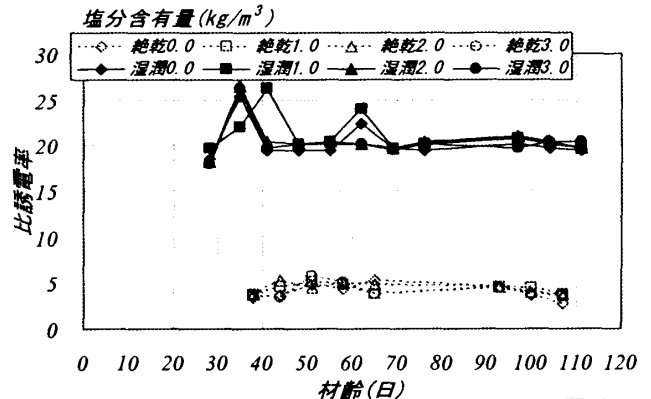


図-10 絶乾状態と湿潤状態における比誘電率

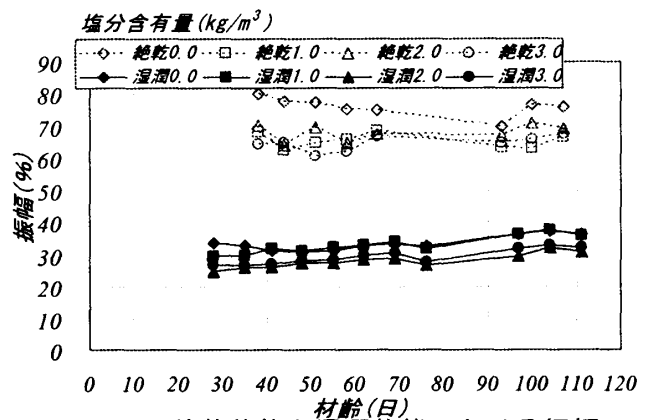


図-11 絶乾状態と湿潤状態における振幅

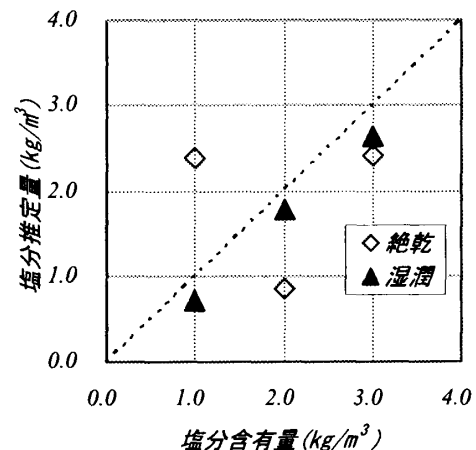


図-12 絶乾状態と湿潤状態の塩分推定量

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、わずかながら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

- 1) 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，コンクリート

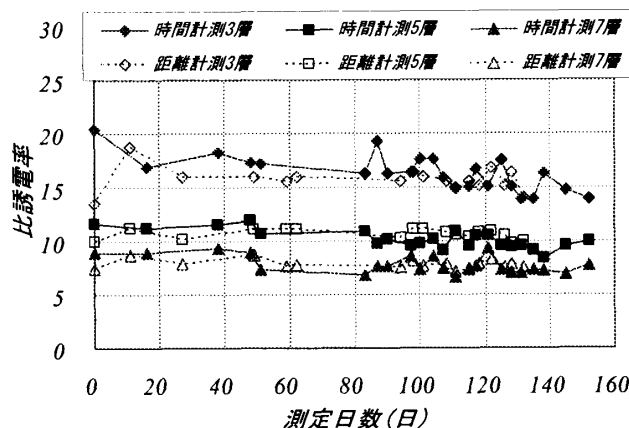


図-13 供試体 NO.1 の各層における比誘電率

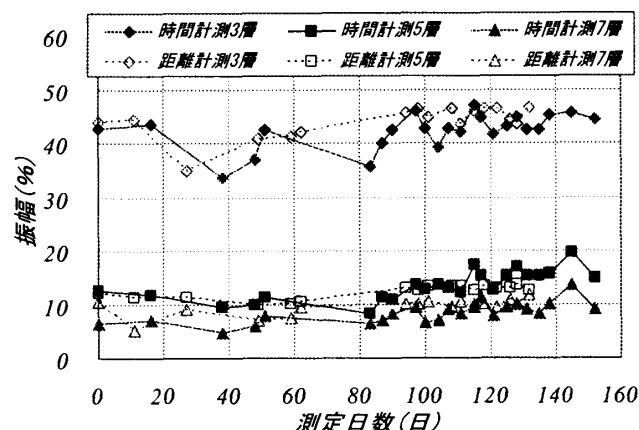


図-14 供試体 NO.1 の各層における振幅

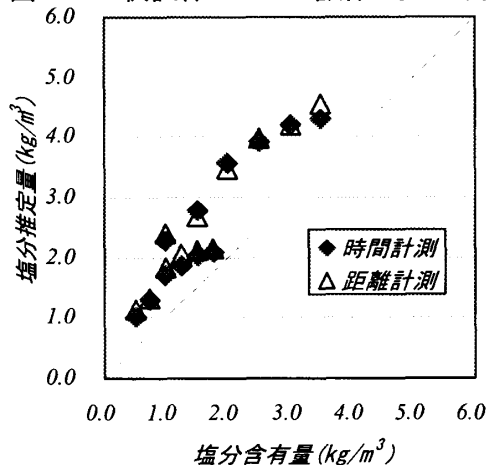


図-15 時間計測と距離計測の塩分推定量

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