

論文 電磁波レーダによるコンクリート中の塩分量推定の検討

胡桃澤 清文^{*1}・名和 豊春^{*2}

要旨：電磁波レーダは，その特性からコンクリート中に含まれる塩化ナトリウム量の測定にも利用可能であることが報告されている。筆者らは，既報において電磁波レーダにより硬化セメントペースト及びモルタルでその検討を行ったが，本報ではコンクリートにその手法を適用した。その結果，既報と同様に電磁波レーダによって得られた波形を周波数解析することによりコンクリート中の塩化ナトリウム量の違いを明らかにすることができた。また，1%の塩化ナトリウムが表層部の1cmの厚さに含まれている場合においても周波数解析を受信波形に行うことによってその違いを明らかにすることができた。

キーワード：電磁波レーダ，塩化ナトリウム量，周波数解析，塩化ナトリウム含有深さ

1. はじめに

コンクリートの耐久性を向上させるために，適切な劣化程度の判断や補修時期の選定が必要不可欠である。そのためにコア抜き等の検査を行うよりも，非破壊検査¹⁾によりその程度を測定するほうが簡便に行うことができる。鉄筋コンクリート構造物の場合，その鉄筋の腐食が耐久性をさらに低下させる。この要因としてコンクリート内部に浸透する塩分があげられる。塩分の浸透により鉄筋の腐食速度は早まり，早期劣化の原因となる。そのため，コンクリート中に含まれている塩分量を正確に測定することが必要である。既往の研究で，電磁波レーダによる塩分量の推定は可能であることが報告されている。^{2)~6)}しかし，それらは受信波形の振幅の大きさのみに着目した研究であるため詳細な波形の解析がなされていない。そこで，筆者らは既報⁷⁾においてセメントペースト及びモルタルの受信波形の周波数解析を行い，セメント硬化体中の塩化ナトリウム量の推定方法について検討を行ったが，コンクリートについての検討は行っていない。そこで本研究では，コンクリートについても受信波形の周波数解析を行うことにより塩化ナトリウム量の違いを明らかにする

ことが可能であるか，また表面からの塩化ナトリウムの含有深さの影響について検討を行った。

2. 電磁波レーダの理論的背景

既報で FDTD 法⁸⁾を用いることにより反射波形の振幅の大きさは，その物質の導電率に強く依存していることを示した。この一例を図1に示す。これは以下の式を用いることにより計算される。

$$\frac{\partial \tilde{E}_x(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon_r \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{\partial H_y(t)}{\partial z} - \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r} \tilde{E}_x(t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_y(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{\partial \tilde{E}_x(t)}{\partial z} \quad (2)$$

ここで， $\tilde{E} = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} E$ ， $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

また， ϵ は誘電率， μ_0 は透磁率， t は時間 (s)， σ は導電率 (S/m)， ϵ_0 は真空中の誘電率， ϵ_r は比誘電率を示す。以上の(1)及び(2)式により電界は，媒質の誘電率および導電率により変化することがわかる。コンクリート中では，誘電率は水分量に依存し，導電率は内部の塩化ナトリ

*1 北海道大学大学院 工学研究科環境循環システム専攻 学術研究員 工博 (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科環境循環システム専攻 教授 工博 (正会員)

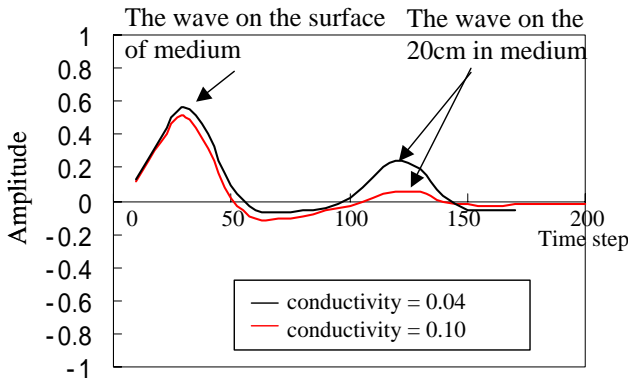


図-1 FDTD法による試算結果
(周波数 1GHz, 誘電率 5)

ウム量により変化すると報告⁶⁾されている。そのため、塩化ナトリウム量の変化は、導電率の違いにより測定することが可能であると考えられる。

3. 測定概要

3.1 試験体

本研究での試験体は、水セメント比 50%のセメントペースト、モルタル及びコンクリートを使用した。セメントは普通ポルトランドセメント、練り混ぜ水は、純水を使用した。また、セメントペースト及びモルタルに混入した塩化ナトリウム量は、セメント質量に対して 0, 3, 6%の3水準とし、練り混ぜ水にあらかじめ溶解させて使用した。試験体作成に当たっては、強制式ミキサーを使用した。モルタル試験体は、セメント質量 1 に対して砂を 3 の割合で配合を行った。試験体の概要を表 1 に示す。コンクリ

表 1 試験体

	W/C	NaCl contents(C × %)
Cement paste	50%	0%
Mortar(C:S=1:3)		3%
		6%

Curing in air after 3days in sealed

表 2 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a	Unit weight(kg/m ³)			
		Water	Cement	Sand	Coarse aggregate
50	0.45	176	351	790	966

表 3 電磁波レーダの仕様

Item	Specification
Antenna frequency	1.0GHz
Measurement mode	Time measurement
Transmitter	Impulse system
Dispatch voltage	17 Vp-p (50)
Resolution of space between reinforcements	80mm

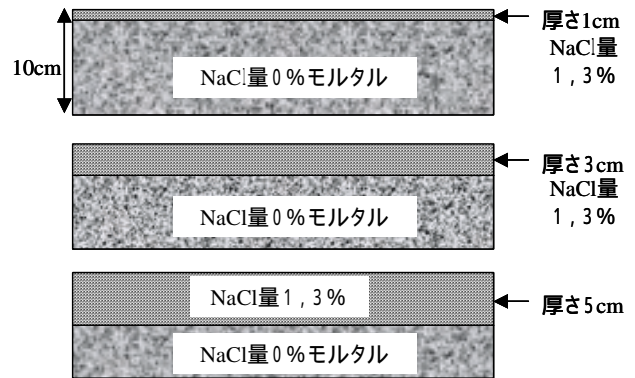


図 2 塩化ナトリウム含有モルタルの深さの異なる試験体

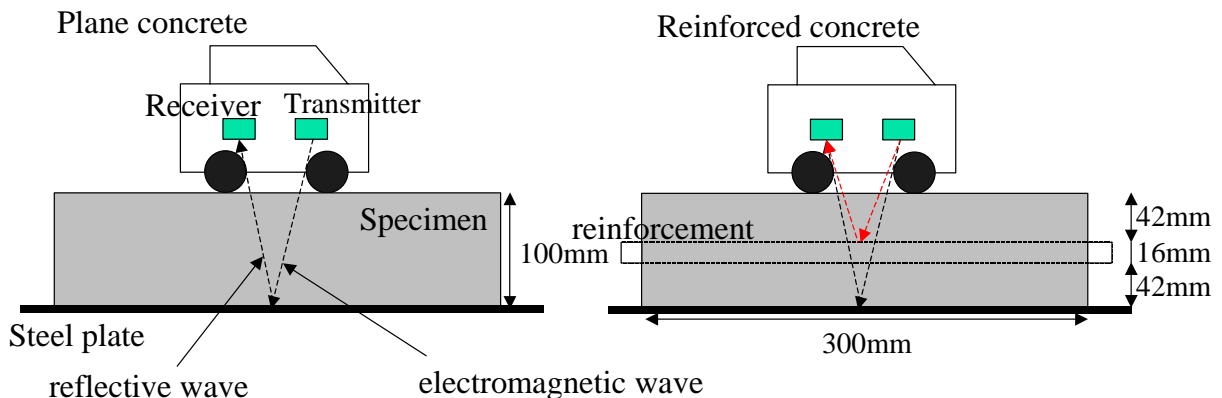


図 3 電磁波レーダによる測定法

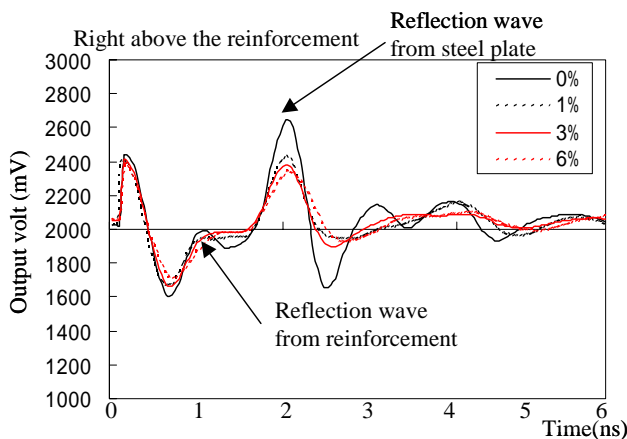


図 4 コンクリート試験体受信波形 材齢 3 日

ート試験体は、セメント質量に対して塩化ナトリウム量を 0, 1, 3, 6% の 4 水準とした。調合を表 2 に示す。なお、細骨材及び粗骨材の表乾密度はそれぞれ 2.64, 2.70 であった。

すべての試験体の大きさは、100 × 100 × 400 mm の型枠の両サイドに 50 mm ずつ異形鉄筋 (D16) を埋め込むための枠を入れたため、100 × 100 × 300 mm である。試験体は打ち込み後 72 時間後に脱型を行った。その後、気中にて養生を行い、所定の材齢において測定を行った。

また、実際には厚さ 10cm のコンクリートに塩分がすべて含まれていることは考えられないため、ベースのモルタルには塩分をまったく含まないものを使用し、そのベースモルタルの上に塩分量が 1% 及び 3% のモルタルを 1, 3, 5cm の厚さで打ち込んだ試験体も使用した。その試験体の概要を図 2 に示す。この試験体は鉄筋を埋設しなかったため大きさは 100 × 100 × 400mm である。

3.2 測定方法

表 3 に本研究で使用した電磁波レーダの仕様を示す。測定方法は時間計測と距離計測があるが本実験では時間計測を行った。各試験体において 3 点を測定点とし、1 点あたり 5 秒以上の静止測定を行った。また、図 3 に電磁波レーダによる測定概要を示す。電磁波レーダは、送信部から電磁波を送信し、受信部で物体から反射してくる反射波を受信する仕組みで 50ms ごとに電磁波を送信する。本実験では反射波を

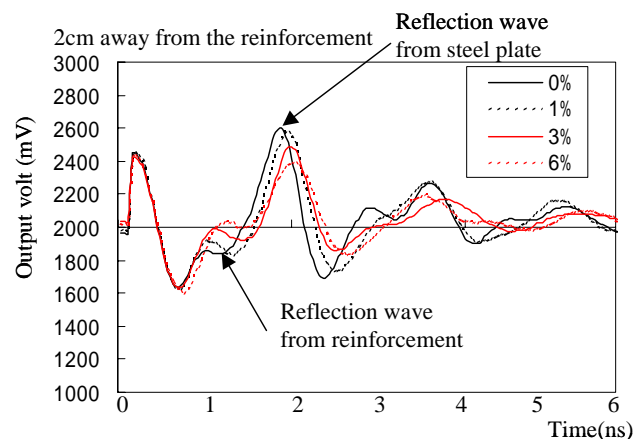
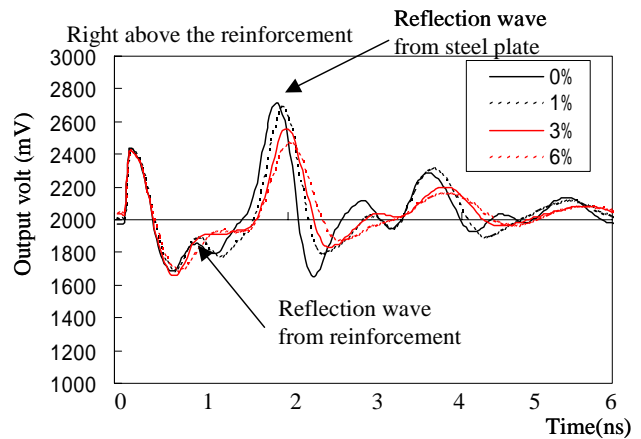


図 5 コンクリート試験体受信波形 材齢 56 日

よりよく測定するために試験体の底面に厚さ 1cm の鉄板を敷いた。また、鉄筋無しの場合は、左図に示すように試験体表面と鉄板からの反射波だけであるが、鉄筋有りの試験体は右図に示すように鉄筋からの反射波も測定される。

4. 測定結果と考察

4.1 コンクリート試験結果

(1) 受信波形測定結果

図 4 に材齢 3 日のコンクリートを使用した際に得られた受信波形の結果を示す。最初のピークは試験体表面からの受信波形を示し、2 番目のピークは鉄筋から、3 番目は下に敷いた鉄板からの受信波形を示している。塩化ナトリウム量が 0% の波形は、振幅が大きくその他の塩化ナトリウムを含んだ試験体は振幅が小さい結果となった。また、塩化ナトリウムを含んだ試験体の塩化ナトリウム量の差異は、その受信波形の振幅に大きく影響を及ぼさなかった。

図 5 に同じ試験体の材齢 56 日の測定結果を示す。上図が鉄筋の真上で測定をした結果で、下図が鉄筋の真上から 2cm ずらして測定した結果である。図 4 の材齢 3 日の結果と比較すると、明らかに鉄板からの反射波形の振幅が大きくなり塩化ナトリウム含有量の違いにより波形が大きく異なった。これは含まれている水分量と微細構造の違いによるものであると考えられる。また、鉄筋からの反射波形は、2cm 真上からずらした位置で測定した場合に振幅が大きく検出されている。これは、鉄筋の曲面全体からの反射ではなく鉄筋の一部からの反射波形が検出されたため干渉が少なくなり振幅が大きく検出されたと考えられる。しかし、鉄板からの反射波形をみると鉄筋の直上で測定した方の振幅が大きくなっている。これは鉄筋からの反射波が鉄板からの反射波に重なりあったために振幅が大きくなったと考えられる。また、本研究で用いた電磁波レーダの測定可能な鉄筋のピッチが 80 mm であるために 100 mm の大きさの試験体内部ではその内部の物質の干渉を受けていることが考えられる。

(2) 周波数解析結果

次に受信波形の詳細を検討するために測定された波形の周波数解析を行った。周波数解析には高速フーリエ変換を用いて、それぞれの波形から 128 点を抽出し、市販のソフトウェアによって周波数のスペクトルを計算した。その結果、高周波数の部分はほぼどの試験体も同様であったため、10GHz 以下の低周波成分のみを取り出した結果を図 6 に示す。ほとんどの周波数においても 0% の試験体のスペクトルが大きい傾向を示しており、塩化ナトリウム量が少なくなるほどその大きさは小さくなる傾向にある。しかし、2GHz の値を見るとまったく逆の傾向を示しており、単純に周波数ごとのスペクトルの大きさにより比較することはできない。そこで既報⁷⁾で示したように受信波形の減衰の程度はスペクトルの総和の違いに表れると仮定し、低周波数におけるスペクトルの総和を計算した結果

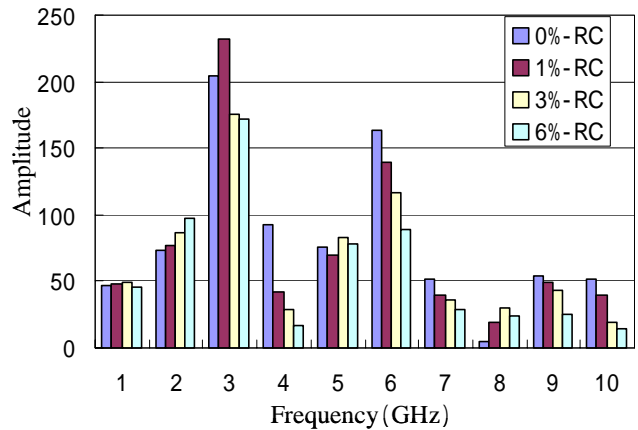


図 6 コンクリート試験体周波数解析結果

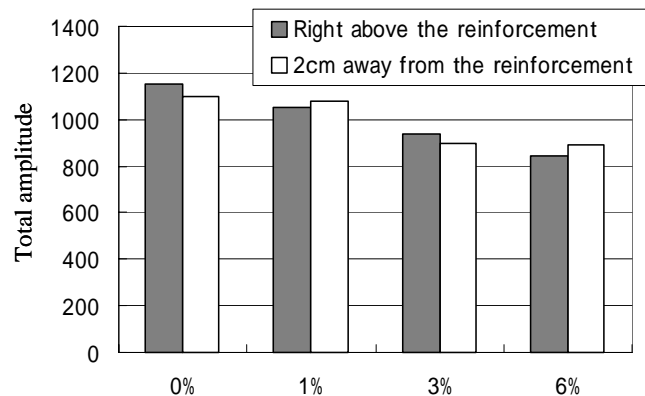


図 7 塩化ナトリウム量の違いが総和スペクトルに及ぼす影響

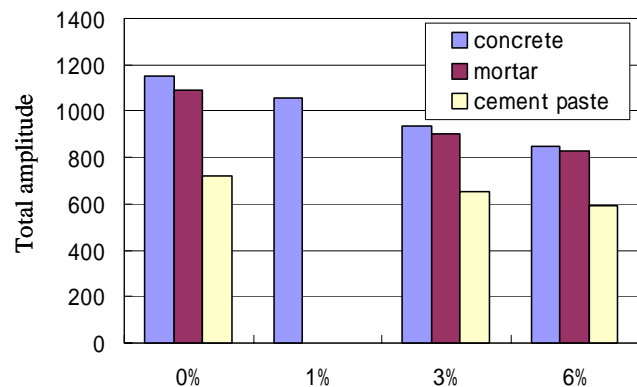


図 8 セメント硬化体の違いが総和スペクトルに及ぼす影響

を図 7 に示す。総和スペクトルは、鉄筋の直上で測定した結果と 2cm ずらした位置で測定した結果を比較すると塩化ナトリウム含有量ごとにほぼ同様の値であった。つまり、総和スペクトルは、塩化ナトリウムの含有量の多さに比例して低くなる傾向を示し、この手法によりコンクリート中に含まれている塩化ナトリウム量の違いを測定することは可能であると考えられる。

また、図 8 に材齢 56 日のセメントペースト、モルタル及びコンクリートの総和スペクトル量の結果を示す。総和スペクトルの大きさは、コンクリート、モルタル、セメントペーストの順に小さくなる。また、図 9 に塩化ナトリウム量の違いが総和スペクトルに及ぼす影響を示す。含まれている塩化ナトリウム量が多いほど総和スペクトルが減少している。しかし、含有量が $0\text{kg}/\text{cm}^3$ のペースト試験体は、モルタル及びコンクリートと大きく異なる値を示した。この違いは、ペースト中の細孔には各種イオンが多く存在するために導電率が高くなり、ペースト量が少ないモルタルとコンクリートでは逆に導電率が低くなりこの差が生じたと考えられる。しかし、塩化ナトリウム量が多いペーストの場合は、細孔中の塩化ナトリウムの影響が大きいため、コンクリートやモルタルとそれほど差が生じなかったと考えられる。

4.2 塩化ナトリウム含有層厚さの影響

図 10 に塩化ナトリウム量 1% で、その打ち込み厚さを変えた試験体（材齢 28 日）の電磁波レーダ受信波形の結果を示す。ここでは前章においてコンクリートとモルタルで受信波形に大きな差異が生じないことを確認したのでモルタルを用いて測定を行った。鉄板からの反射波形の振幅の大きさを比べると、振幅の大きさの違いはかなり小さいが、塩化ナトリウムを含む層が厚くなるほど振幅の大きさが小さくなっていく傾向にあった。ただし、その受信波形は、どの

試験体においてもほとんど同じピークをもつ波形形状であった。この傾向は、塩化ナトリウム含有量 3% の試験体でも同様の結果であった。

次にこの受信波形を周波数解析した結果を図 11 に示す。左図が塩化ナトリウム量 1% の層を打ち込んだ結果で、右図が 3% の結果である。ど

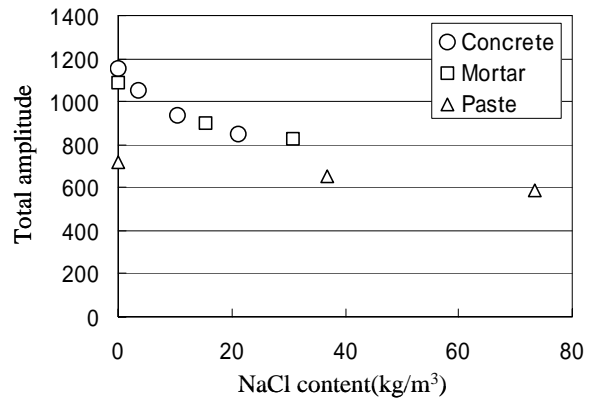


図 9 塩化ナトリウム量の違いが総和スペクトルに及ぼす影響

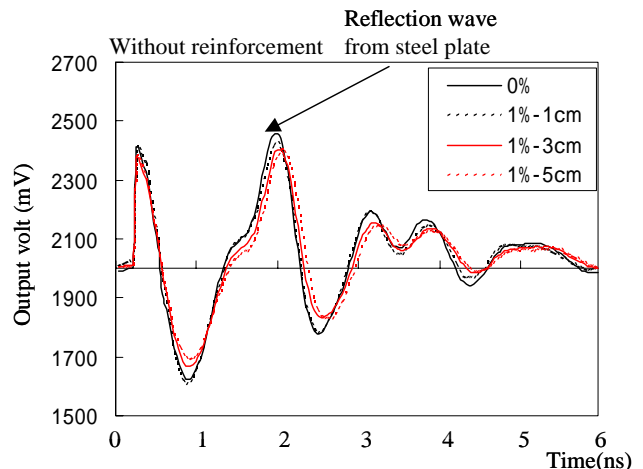


図 10 受信波形に及ぼす塩化ナトリウム含有深さの影響（材齢 28 日）

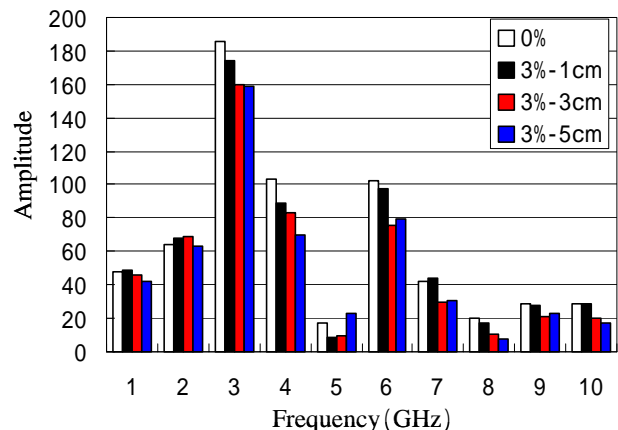
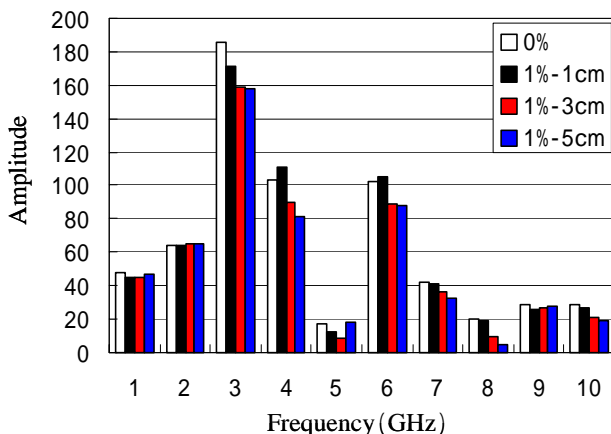


図 11 周波数解析結果（左図：塩化ナトリウム量 1%，右図：塩化ナトリウム量 3%）

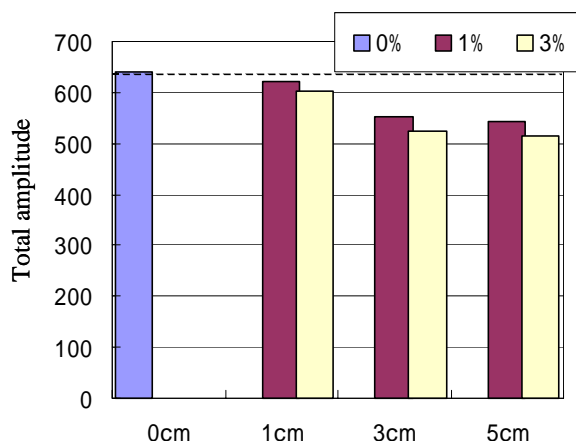


図 12 塩化ナトリウム含有深さの違いが総和スペクトルに及ぼす影響

これらの結果もほぼ同様のスペクトルの分布を示しており、塩化ナトリウムを含む層が薄いほどほとんどの周波数において高いスペクトルを示した。

最後にコンクリートの解析と同様に総和スペクトルの大きさを計算した結果を図 12 に示す。塩化ナトリウムの層がまったくない 0cm の総和スペクトルの大きさに比べて、1%の塩化ナトリウムを含む層が 1cm ある場合にはその大きさは減少した。また、その厚さが厚いほど、塩化ナトリウム含有量が多いほどその大きさは減少する結果を示し、つまり、この手法により塩化ナトリウムが表層にしか含まれていない場合においてもその違いを検出することは可能であることが示唆された。ただし、本測定法においては試験体全体の塩化ナトリウム量の違いは明らかにすることができたが、塩化ナトリウムが表層に存在しているか内部全体に存在しているかの識別はできなかった。

5. まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) コンクリートから得られた電磁波レーダの受信波形を周波数解析しその周波数のスペクトルの総和を計算することにより、そこに含まれる塩化ナトリウム量の違いを明らかにすることができた。また、コンクリートの総和スペクトルは、硬化セメントペースト及びモルタルの

受信波形の総和スペクトル量よりも高い値を示した。

(2) 1%の塩化ナトリウム量を含む層が 1 cm であっても、その塩化ナトリウム含有量の違いを周波数解析によって測定することが可能であり、表層部分にのみ塩化ナトリウムが含まれている場合にも本研究で提案した手法が適用できることが示唆された。

参考文献

- 1) ACI Committee 228: Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structure, 1998
- 2) 溝渕利明, 林大介, 須田久美子, 横関康祐: 電磁波レーダによる鉄筋コンクリート中の塩分測定法の実構造物への適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1869-1874, 2004
- 3) 神谷武智, 須田久美子, 坂田昇, 溝渕利明: 電磁波レーダを用いた鉄筋コンクリート中の塩化物量評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1673-1678, 2003
- 4) 新井淳一, 溝渕利明, 坂田昇, 須田久美子: 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
- 5) 溝渕利明, 新井淳一, 須田久美子, 坂田昇: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1509-1514, 2002
- 6) 藤本恭一, 新井淳一, 須田久美子, 溝渕利明: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1667-1672, 2003
- 7) 胡桃澤清文, 名和豊春: 電磁波レーダを利用したセメント硬化体中の塩分量推定の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1771-1776, 2005
- 8) Dennis M. Sullivan: Electromagnetic simulation using the FDTD method, New York IEEE Press, 2000