

論文 電磁波レーダーを利用したセメント硬化体中の塩分量推定の検討

胡桃澤 清文^{*1}・名和 豊春^{*2}

要旨：コンクリート構造物の耐久性を評価する上で、コンクリートの劣化の程度を測定することは重要である。特に鉄筋の腐食を考慮したとき、その劣化を促進する塩化ナトリウム含有量を正確に測定することが求められる。そこで本研究では、塩化ナトリウム含有量を非破壊で測定することができる方法の1つとして電磁波レーダーに着目して検討を行った。その結果、電磁波レーダーの受信波形を周波数解析することにより塩化ナトリウム含有量の推定は可能であることを示した。また、FDTD法(Finite-difference time-domain)を用いて、いくつかの条件下での電磁波の伝播特性について検討を行い、その特性を明らかにした。

キーワード：非破壊検査，電磁波レーダー，塩化ナトリウム，周波数解析，FDTD法

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える。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、コンクリート中の含有塩分量を正確に測定することが必要である。そこで本研究では、コンクリート中に含まれる塩分量を測定する方法として電磁波レーダーの適用を検討した。既往の研究で、電磁波レーダー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)~8)}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。そのため本研究では、受信波形の周波数解析を行い、セメント硬化体中の塩分量の推定方法について検討を行った。

2. 電磁波レーダー測定原理

電磁波は以下に示す原理によりその媒質の電磁波透過特性が定められる。基本方程式である

Maxwellの電磁方程式から、

$$\varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H} - \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{E} \quad (2)$$

ここで $\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$ はそれぞれ電界および磁界を表し、 ε は誘電率、 μ_0 は透磁率、 t は時間 (s) を示す。 $\mathbf{J}$ は電流密度を表し、

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

また、 σ は導電率 (S/m) を表し、(1)式に(3)式を入れると、

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \nabla \times \mathbf{H} - \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \mathbf{E} \quad (4)$$

ここで、

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (5)$$

ε_0 は真空中の誘電率、 ε_r は比誘電率である。また、本研究では、1次元のみの電磁波を考慮するため、

$$\frac{\partial E_x(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \cdot \frac{\partial H_y(t)}{\partial z} - \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} E_x(t)$$

(6)

となる。ここで、以下のように透磁率および誘電率の関係を整理すると、

*1 北海道大学大学院 工学研究科 COE 研究員 工博 (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

$$\tilde{E} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E \quad (7)$$

(1) および (2) 式は次式で表される。

$$\frac{\partial \tilde{E}_x(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon_r \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{\partial H_y(t)}{\partial z} - \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r} \tilde{E}_x(t) \quad (8)$$

$$\frac{\partial H_y(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{\partial \tilde{E}_x(t)}{\partial z} \quad (9)$$

以上の (8) 及び (9) 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およびモルタルを使用した。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、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

表 1 試験体

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

Curing in air after 3days in sealed

表 2 電磁波レーダーの仕様

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

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 (D 16) 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。試験体の概要を表 1 に示す。

3.2 測定方法

表 2 に本研究で使用した電磁波レーダーの仕様を示す。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 1 に電磁波レー

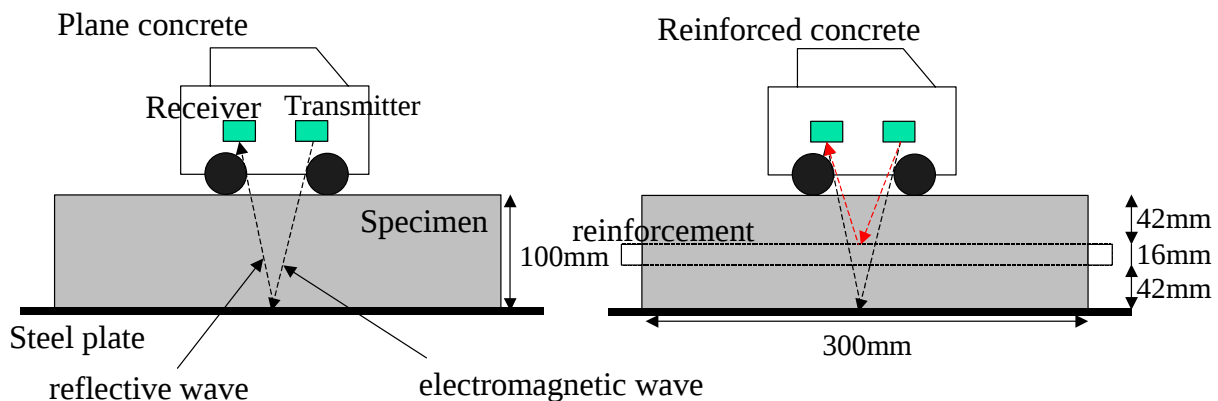


図 1 電磁波レーダーによる測定法

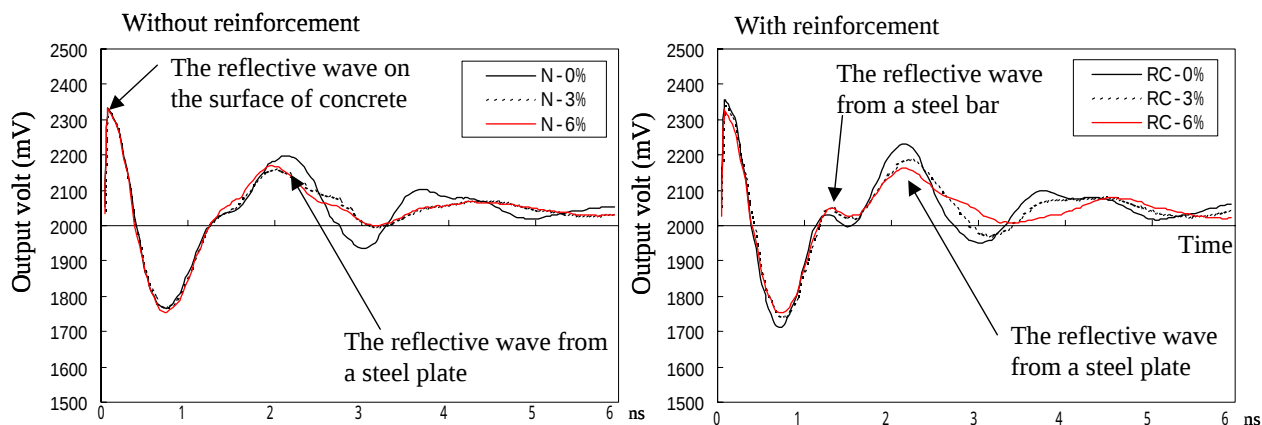


図2 電磁波レーダーによる測定結果
(硬化セメントペースト、材齢 28 日)

ダーによる測定概要を示す。電磁波レーダーは、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

4. 1 硬化セメントペースト測定結果

(1) 反射波形測定結果

図2に電磁波レーダーによる硬化セメントペーストの材齢 28 日の測定結果を示す。縦軸は測定された電圧を示し、横軸は経過時間を示す。左図は無鉄筋の測定結果を示し、右図は鉄筋有りの測定結果を示す。どちらも最初のピークは、試験体表面からの反射波を測定したものである。鉄筋有りの試験体において、2 番目のピークは鉄筋からの反射波を測定したものであるが、鉄筋なしの試験体の 2 番目のピークは、鉄板からの反射波を測定したものである。実線、破線及び灰色の線は、それぞれ塩化ナトリウム含有量が 0, 3, 6% の測定結果を示している。

鉄筋なしの測定波形を見ると、鉄板からの反射波の振幅がもっとも大きいのは、塩化ナトリウムを含んでいない試験体であり、塩化ナトリ

ウムを多く含んでいる試験体ほど振幅が小さくなる傾向を示した。また、その後の反射波形を見ても塩化ナトリウムを多く含む試験体ほど振幅の減衰が大きい結果となった。

他方、鉄筋ありの試験体では、鉄板からの反射波の振幅の大きさを比較すると、鉄筋なしと同様に塩化ナトリウムを含まない試験体の方が大きい結果となり、塩化ナトリウム含有量の比較が可能であると考えられる。しかし、鉄筋からの反射波形は塩化ナトリウム含有量によって大きな差が見られない結果となった。これは、鉄筋の形状が円形であるため、鉄板からの反射波に比べ、その振幅が小さく識別が困難であったと考えられるが、底面の鉄板からの反射波形により塩化ナトリウム含有量の違いを識別することは可能であった。

(2) 周波数解析結果

次に測定された反射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 256 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。その結果から 10GHz 以下の低周波成分のみを取り出した結果を図3に示す。図2と同様に左図が鉄筋なし、右図が鉄筋有りの測定結果を示している。左から塩化ナトリウム含有量 0, 3, 6% の解析結果を示している。鉄筋なし及び鉄筋有りの測定結果から本研究で使用した試験体では、周波数 3 及び 5 GHz において、塩化ナトリ

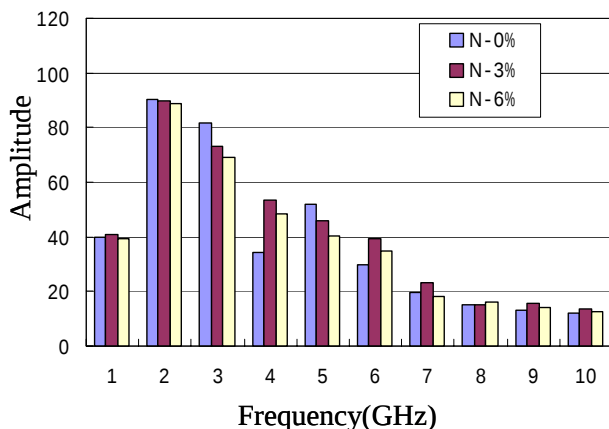


図3 周波数解析結果

ウム含有量とよい相関が得られ、塩化ナトリウム量の少ない試験体のスペクトルが大きい結果となった。つまり、本研究で使用した試験体の塩化ナトリウム含有量の違いを示す特徴的な周波数は、3 および 5GHz であること示す。ただし、これは本研究で使用した試験体形状のみの結果であり、形状が変化した場合は、その周波数は異なると考えられる。

4.2 モルタル測定結果

(1) 反射波形測定結果

図4に材齢28日の鉄筋ありのモルタルの電磁波反射波形を測定した結果を示す。図2と同様に実線、破線及び灰色の線は、それぞれ塩化ナトリウム含有量が0,3,6%の測定結果を示している。硬化セメントペーストの結果と比較すると、試験体表面からの反射波形の振幅は大きくは変わらないが、鉄筋及び鉄板からの反射波形は大きく異なる結果となった。鉄筋からの反射波形は、測定電圧2000mV以上では観察されず、鉄板からの反射波の振幅は、硬化セメントペーストの場合に比べ大きくなることが観察された。

塩化ナトリウム量の違いによる振幅量の違いは、硬化セメントペーストと同様に鉄筋からの反射波形では識別が困難であるが、鉄板からの反射波形を比較すると塩化ナトリウム含有量の大きい試験体の振幅が大きい結果となった。

(2) 周波数解析結果

硬化セメントペーストと同様にモルタル試験体の周波数解析を行った結果を図5に示す。多

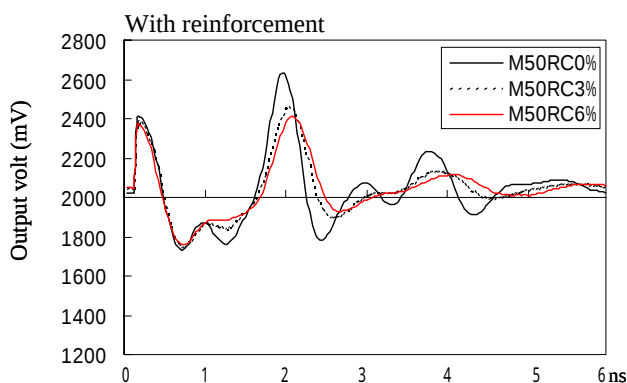
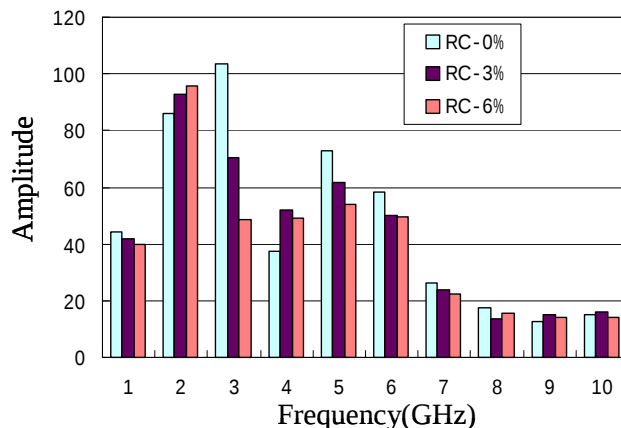


図4 モルタルの測定結果（材齢28日）

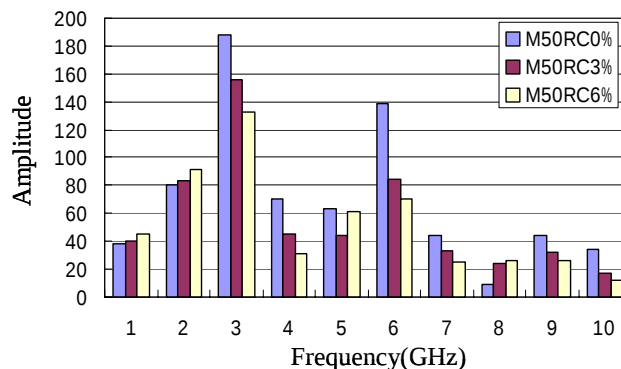


図5 モルタルの周波数解析結果(材齢28日)

くの周波数で硬化セメントペーストのスペクトルよりも大きな値を示した。3 GHz の周波数では、硬化セメントペーストと同様に塩化ナトリウム含有量の違いによって振幅の大きさが異なった。しかし、そのほかの成分では6 GHz でその傾向が見られ、5 GHz でその傾向が見られた硬化セメントペーストとは異なる結果となった。つまり、本研究で測定した試験体においては、硬化セメントペースト及びモルタルに関わらず、

電磁波の反射波形の 3 GHz の周波数成分を比較することにより塩化ナトリウム含有量を推定が可能であると考えられる。

5. 考察

5.1 反射波形による塩化ナトリウム量の推定

前章では、3 GHz の周波数成分を比較することにより塩化ナトリウム量の比較が可能であることを示したが、試験体形状等によりその傾向は異なることが予想される。このため、次に反射波形の減衰の違いから塩化ナトリウム量の違いを比較することを試みた。塩化ナトリウム含有量が多いほど電磁波の減衰が大きくなり個々の周波数成分が小さくなるため、周波数成分の総和の違いによってその減衰量の違いが表れると考え試験体ごとにその計算を行った。それぞれの試験体の材齢 91 日におけるその計算結果を図 6 に示す。硬化セメントペースト及びモルタルのスペクトルの総和は、塩化ナトリウム含有量の違いにより変化し、塩化ナトリウム含有量が多くなるほどその値は低く、少ないほど大きい値を示した。そのため、この方法により塩化ナトリウム含有量の測定は可能であると考えられる。

5.2 FDTD 法による電磁波の波形の検討

波形の特性を詳細に検討するために FDTD (Finite-difference time-domain) 法⁹⁾により電磁波の波形の解析を行った。FDTD 法は式(7)及び式(8)を差分法によって数値計算し電界及び磁界の変化を求める手法である。なお、ここでは単純化するために電磁波が媒質に入射する際の損失は考慮していない。

(1) 誘電率の違いの検討

はじめに、異なる誘電率でどのような波形が観察されるかを試算した結果を図 7 に示す。導電率は 0.04、入射波はガウス波で周波数 1 GHz と仮定した。誘電率を 5 及び 8 と変化させ比較した結果、媒質の誘電率の違いは、振幅の大きさにほとんど影響を及ぼさず、最大振幅時の位相のずれに大きく影響を与えることを示した。

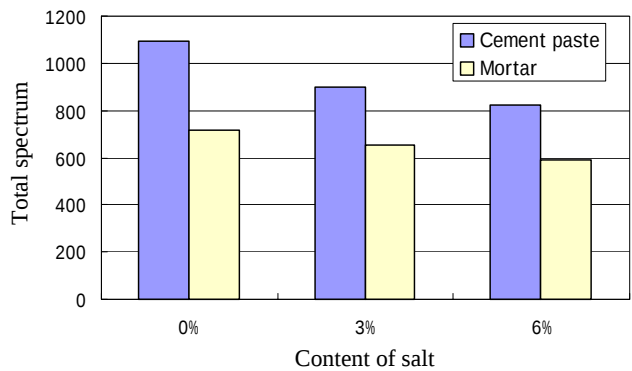


図 6 塩分量の異なる試験体のスペクトルの総和

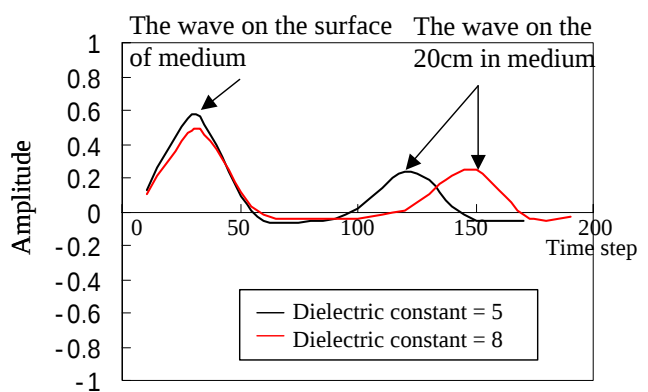


図 7 FDTD 法による試算結果
(周波数 1 GHz、導電率 0.04)

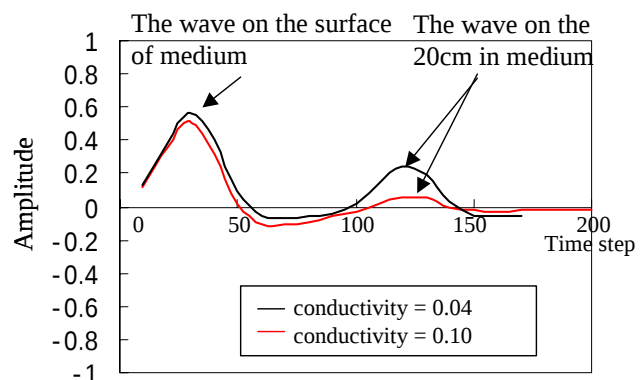


図 8 FDTD 法による試算結果
(周波数 1 GHz、誘電率 5)

(2) 導電率の違いの検討

図 8 に導電率の異なる場合における電磁波の伝播の試算結果を示す。ここでは入射をガウス波で周波数 1 GHz とし、誘電率は 5 とした。導電率を 0.04 及び 0.1 と変化させ比較した結果、導電率は振幅の大きさに影響を及ぼし、導電率

の高い方が振幅の大きさが小さくなることをしめした。なお、導電率を変えた場合は、誘電率を変えた場合と異なり、最大振幅時の位相のずれはほとんど見られなかった。

以上の試算結果から誘電率の違いは位相のずれに大きく寄与し、導電率の違いは振幅の大きさに影響を与えることが明らかとなった。

本実験で得られた波形は図 2, 4 に示すように位相のずれがほとんど見られないため、誘電率の違いはほとんどないと考えられる。これは誘電率に及ぼす塩類の効果に関する既往の研究結果⁶⁾と一致する。また、振幅の大きさの違いが塩化ナトリウム含有量の違いによって生じる現象は、上述の FDTD 法の解析結果より、試験体の導電率が異なることにより生じると推論される。塩類の添加によって導電率が変化することは既知の事実であり、これからも電磁波レーダーの反射波の差異は、塩濃度の変化に伴う導電率の変化に起因するものと判断される。

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) 硬化セメントペースト及びモルタルを透過する電磁波の特性は、それぞれの誘電率及び導電率に依存することを明らかにした。

(2) 電磁波レーダーの反射波形を周波数解析することにより、硬化体中の塩化ナトリウム含有量の違いを測定することは可能であることを示した。

今後、コンクリートについても本研究で提案した手法が、適用可能であるか検討を行う予定である。

参考文献

- 1) ACI Committee 228: Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structure, 1998
- 2) 太田資郎, 藤原鉄朗, 松山公年, 金本康宏: レーダー法によるコンクリート版厚計測に

おける最適周波数とコンクリート強度推定法の研究, 土木学会論文集, No.676, V-51, pp.89-103, 2001

- 3) Udaya B. Halabe, Arash Sotoodehnia, Kenneth R. Maser and Eduardo A. Kausel: Modeling the Electromagnetic Properties of Concrete, ACI Material Journal, Vol.90, No.6, pp.552-563, 1993
- 4) 溝渕利明, 林大介, 須田久美子, 横関康祐: 電磁波レーダー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
- 5) 神谷武智, 須田久美子, 坂田昇, 溝渕利明: 電磁波レーダー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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) Dennis M. Sullivan: Electromagnetic simulation using the FDTD method, New York IEEE Press, 2000