

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-07-27

電磁波を用いた鉄筋コンクリートの塩分量推定における実構造物への適用性に関する検討

田中, 峻 / TANAKA, Shun

(発行年 / Year)

2011-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2011-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2010 年度 修士論文

電磁波を用いた鉄筋コンクリートの塩分量推定における
実構造物への適用性に関する検討

法政大学大学院 工学研究科
建設工学専攻 修士課程

09R5115 タナカ シュン
田中 峻
(指導教員：溝渕 利明教授)

電磁波を用いた鉄筋コンクリートの塩分量推定における 実構造物への適用性に関する検討

法政大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 修士課程
09R5115 田中 峻

2011年2月19日

概要

鉄筋コンクリートの劣化の原因の一つに塩害がある。これまでの研究より、電磁波法とインピーダンス法を用いてコンクリート内部の塩分量を推定する可能性が見出されている。コンクリート構造物内の塩分量を非破壊試験によって把握することが可能になれば、定期的な試験を実施していくことにより、塩害による被害を早期に発見することが可能となり、損傷の程度に合わせた対策を早い段階で講じることができるようになる。本研究では、室内実験における電磁波法の面的測定とインピーダンス法の点的測定との実験データを組み合わせてコンクリート内部の塩分量の分布の算出が可能であるかを比較・検討した。また実構造物における電磁波法の実験データとコア採取データとの比較・検討を行った。

その結果、水セメント比、かぶり深さ、塩分濃度および塩水種類が電磁波法及びインピーダンス法による実験値に及ぼす影響が明らかになった。また、両試験法から塩分量の推定分布を把握することができることを確認することができた。さらに、施工条件や環境条件が異なり塩分含有量の異なる実構造物においても、電磁波を用いて平均塩化物量を推定することが可能であるということが確認できた。

APPLICABILITY OF ESTIMATION PRESUMPTION OF DISTRIBUTION OF SALINITY
IN CONCRETE STRUCTURES USING ELECTROMAGNETIC WAVE

By
09R5115 Shun TANAKA

Graduate Course of Civil and Environmental Engineering , Hosei University,

19th February, 2010

ABSTRACT

There is salt damage in one of the causes of the deterioration of ferroconcrete. The possibility of presuming the amount of salinity in concrete by using the electromagnetic radiation method and the impedance method from a current research is found. If understanding the amount of salinity in a concrete structure by the nondestructive testing becomes possible, finding damage due to the salt damage at the early stage becomes possible by executing a regular examination, and it comes to be able to consider measures to match to the level of damage at an early stage. In this research, the experiment data of the electromagnetic radiation method in a comparison, an examination, and a real structure and the core collection data were compared and whether the distribution of the amount of salinity in concrete was able to be calculated by combining the experiment data with a point measurement of a respect measurement of the electromagnetic radiation method in the laboratory experiment and the impedance method was examined.

The influence that the putting on depth compared with the wash cement and the density of salinity and sort of salt water exerted on the experiment value by the electromagnetic radiation method and the impedance method was clarified iron as a result. Moreover, the possibility that the presumption distribution of the amount of salinity was able to be made from both examination method was able to be found.

目次

第1章 緒論	1
1.1 背景	1
1.2 目的	2
第2章 既往の研究	3
2.1 電磁波の特性	3
2.2 電磁波レーダーの測定原理	4
2.3 深さ方向の位置測定法	7
2.4 コンクリートの電気特性	7
2.5 塩化物イオン濃度が電磁波に及ぼす影響に関する実験	9
2.6 異なった配合条件が電磁波に及ぼす影響に関する実験	11
2.7 湿度条件を固定した場合の電磁波による塩化物イオン量の測定	19
2.8 埋設電極を用いた交流インピーダンス法の提案	20
第3章 使用材料・配合条件	28
3.1 使用材料	28
3.2 配合条件	30
第4章 実験方法	31
4.1 研究方法	31
4.2 電磁波法	32
4.3 インピーダンス法	36
4.4 電位差滴定法	38
第5章 電磁波法の試験結果（比誘電率）	40
5.1 かぶり別による比較	40
5.2 水セメント比別による比較	42
5.3 浸漬水の濃度別による比較	44
5.4 考察	46
第6章 電磁波法の試験結果（振幅値）	47
6.1 かぶり別による比較	47
6.2 水セメント比別による比較	49
6.3 浸漬水の濃度別による比較	51
6.4 浸漬水の種類別による比較	54
6.5 考察	56
第7章 インピーダンス法の試験結果（浸漬水による比較）	57
7.1 塩水および真水浸漬による実行値の比較	57
7.2 考察	61
第8章 インピーダンス法の試験結果（各条件別の比較）	62
8.1 水セメント比毎の影響	63
8.2 深さ方向の最大実効値の変化	67
8.3 塩分浸漬と真水浸漬の比較	68
8.4 考察	80
第9章 実際の塩化物量の測定	81
9.1 目的	81
9.2 測定結果	82
9.3 考察	90
第10章 推定値と実測値の比較	91
10.1 目的	91
10.2 電磁波法のデータによる推定	91
10.3 インピーダンス法のデータによる塩分曲線の推定	94

10.4	インピーダンス法と電磁波法から求められる塩分推定曲線	96
10.5	考察	99
第 11 章	電磁波法による塩分量推定の実構造物への適用	100
11.1	磯子火力発電所における経年調査結果.....	100
11.2	高砂火力発電所.....	113
11.3	石川火力発電所.....	119
11.4	複数現場での推定	125
第 12 章	結論	129
12.1	電磁波法の結果.....	129
12.2	インピーダンス法の結果	129
12.3	電磁波法およびインピーダンス法による推定	129
12.4	実構造物への適用	129
参考文献	107
謝辞	108

第1章 緒論

1.1 背景

アルカリ骨材反応や鉄筋の塩分腐食などに起因するコンクリート構造物の早期劣化が、わが国においても全国的な規模で発生していることが明らかにされている。それら鉄筋コンクリート構造物の劣化原因の一つに塩害がある。コンクリート中の鉄筋は、不動態皮膜で保護されているが、この皮膜はコンクリート中に塩化物イオンがある一定値以上存在すると破壊され鉄筋の腐食が始まる。腐食の進行に伴い鉄筋が膨張しコンクリート表面にひび割れ、剥離が生じ、さらに鉄筋の腐食しやすい環境が作られる。これが塩害による鉄筋コンクリートの劣化である。塩化物イオンが存在する原因には「初期塩分」と「飛来塩分」の2つがある。初期塩分は、かつてセメントの硬化促進剤として使用されていた塩化ナトリウムや、海砂の不純物として混入したものである。飛来塩分は、潮風などによって供給され、コンクリートの表面から浸透したものである。飛来塩分で問題となるのは、時間が経つにつれて塩化物イオンの供給量が増え、コンクリート中の濃度がさらに高くなることである。塩害の場合、鉄筋コンクリート構造物に発生する損傷は、鉄筋腐食による鉄筋の断面欠損であり、それにより耐荷力の低下やかぶりコンクリートの剥離などである。塩害は、進展期において、直接目視できないコンクリート内部で発生、進行していく現象である。したがって、構造物の健全度を適切に診断するためには、コンクリート内部の損傷状況を正確に把握することが必要である。

塩害による被害を早期に評価するためには、構造物からコアを採取し、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量を測定し、鉄筋近傍でのその時点における塩分量を把握する。また、塩化物イオン量の深さ方向の測定分布から、鉄筋近傍での鉄筋において腐食限界に達する塩化物イオン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ってしまう。また、同一部位での塩化物イオン量を測定する際も、経時的に行うことも困難である。さらに、予測解析を行う際に他の劣化である中性化、凍結融解などとの複合劣化となっている場合もあり、評価を行うのは困難となる。

1.2 目的

本研究では、電磁波法で得られたコンクリート表面から鉄筋位置までの塩化物イオン量の平均値およびインピーダンス法によって測定されたコンクリート表面での塩化物イオン量をもとに、コンクリート内部の塩化物イオン量の分布状態を非破壊で推定することの可能性について検討を行う。さらに、純水、3%塩水および人工海水を用いて、コンクリート内部に浸透したイオンが電磁波測定にどのような影響を与えるのかについても検討を行う。また、電磁波法の実構造物への適用を目的とする。

電磁波反射法について、これまでの研究より、コンクリート構造物中に含まれる塩化物イオン量を推定する可能性が見出されており、これは構造物に損傷を与えることなく、容易に同一部位の時間経過に伴う変化を把握することが可能である。鉄筋コンクリート構造物内の塩化物イオン量を非破壊試験によって把握することが可能になれば、定期的な試験を実施していくことにより、塩害による被害を早期に発見することが可能となり、損傷の程度に合わせ対策を早い段階で講じることができるようになる。そこで、本研究では構造物への損傷もなく同一箇所における経時測定が可能で、塩害の評価方法としての可能性を見出されている非破壊試験の電磁波法の実構造物への適用を目指す。

インピーダンス法については、既往の研究を参考にコンクリート構造物内部の水分及び、塩化物イオンの移動を、インピーダンス実験によりコンクリート表面付近の水分及び、塩化物イオンの点的にデータを読み取る事を実験的に行い、抵抗値や周波数の変化から電磁波反射法と同様に塩化物イオン量を推定する可能性が見出されている。

本研究より電磁波反射法の面的測定とインピーダンス法の点的測定との実験データから非破壊試験でのコンクリート構造物内部の塩化物イオン量の深さ方向及び、平面方向の分布を算出できる可能性が出てくる。

第 2 章 既往の研究

2.1 電磁波の特性

電磁波は一般的に、均質で一様な物質中を伝播する場合その物質固有の伝播速度で伝播し、物質固有の減衰率で減衰する。この 2 つの特性が物質中での電波伝播に大きな影響を与える。伝播速度と減衰率は、電磁波の伝播を数式化して扱うには不便であり、複素誘電率をパラメータとして、物質中の電波伝播特性を評価する方法が行われている。複素誘電率は複素数であるため、実数部と虚数部の 2 つの実数パラメータであるとしている。定義された複素誘電率を以下の式に示す。

$$\epsilon_r = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (2.1)$$

ここで、 ϵ' = 複素数誘電率（誘電定数）の実数部分
 ϵ'' = 複素数誘電率（損失要因）の虚数部分

$$i = \sqrt{-1}$$

レーダー測定法は、放射された電磁波が調査対象物により反射して得られた電磁波を利用して計測する手段である。これにより、コンクリートの電気特性である電磁波伝播速度と電磁波減衰率を測定することができる。標準的なコンクリートの場合、表 2-1-1 に示すような主要因があり、電磁波伝播速度ではコンクリートの含水率、電磁波減衰率はコンクリートの空隙率、塩分、骨材率である。つまり、電磁波レーダーによりコンクリートの電気特性である電磁波伝播速度と電磁波減衰率を計測することでコンクリートの強度や塩分量を推定することが可能である。

表 2-1-1 コンクリートの電気特性とその主要因

電気特性	電磁波伝播度	電磁波減衰率
対応する誘電率	ϵ' (実数部)	ϵ'' (虚数部)
測定方法	直接波法	測定が難しい
主要因	含水率	空隙率, 塩分, 骨材率

電磁波測定の計測データにおける変動要因の 1 つである比誘電率は、物質の電気的特性を示すパラメータであり、これによって物質中の電磁波の伝播速度が定まる。比誘電率は、電場に感応しやすい程度を表す物理量として用いられる。一般的な物質の比誘電率を表 2-1-2 に示す。

コンクリートはセメントペースト、骨材、空隙で構成されており、これらの中で比誘電率の最も高いものは水分を含むセメントペーストで、次は骨材である。電磁波の減衰率は誘電率に比例するため、水分の無い空隙の場合は比誘電率は 1 と考えられるので、空隙の多いコンクリートほど電磁波の減衰率は小さくなる。しかし、水分で満ちた空隙の場合、水

の比誘電率は81で、セメントペーストよりも大きいので、コンクリート中の空隙率が大きいほど電磁波の減衰率は大きくなる。

つまり、体積水分率が大きい場合、空隙率が大きくなるにつれて伝播減少率は大きくなる。逆に、体積水分率が小さい場合、空隙率が大きくなるにつれて伝播減少率は小さくなる。コンクリート中の体積水分率は、電磁波伝播速度と強い相関関係があるので、コンクリート中の電磁波減衰率大きな影響を与える。したがって、電磁波減衰率に塩分、骨材率が影響を与える事から、適用するコンクリート構造物または調査項目を整理し、適用限界を明らかにすることによってレーダー法によってコンクリート強度推定やコンクリート中の塩化物量の調査が可能になる。

表 2-1-2 物質の比誘電率

材質	比誘電率	材質	比誘電率
真空	1	空気	1
清水	81	海水	81
清水氷	4	海水氷	6
雪塊	1.4		
土(乾燥)	2~6	土(湿潤)	10~30
石灰岩(乾燥)	7	石灰岩(湿潤)	8
頁岩(湿潤)	7	砂岩(湿潤)	6
砂(乾燥)	3~6	砂(乾燥)	10~25
碎石	5~9		
コンクリート(乾燥)	4~12	コンクリート(湿潤)	8~20

2.2 電磁波レーダーの測定原理

電磁波法は、コンクリート構造物内に埋設されている鉄筋、鉄骨、埋設管等の位置調査として利用されている探査方法の1つで、測定機器の取り扱いが容易であり、短時間で広範囲の調査が可能である。本実験において使用した電磁波レーダーの測定原理を以下に示す。

コンクリート用電磁波レーダーは、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し、放射された電磁波がコンクリートと電氣的性質（比誘電率、導電率）の異なる物体（鉄筋、鉄骨、埋設管など）との境界面で反射し、受信アンテナで受信する。つまり、電磁波法は鉄筋、鉄骨、埋設管等からの反射波を受信アンテナで受信し、電磁波の放射から受信に要した伝播時間から反射物体までの距離を求めることで、その埋設物までの距離を求める方法である。コンクリート中の電磁波の速度と反射物体までの距離は以下の式で示される。

コンクリート中の電磁波の速度 V

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

ここで、 C ; 真空中での電磁波の速度 3.0×10^8 [m/s], ϵ_r ; コンクリートの比誘電率
反射物体までの距離 D

$$D = \frac{VT}{2} \quad (2.3)$$

ここで、 T ; 電磁波を送信してからの受信するまでの往復伝播時間

上記の手順に対して探査対象物までの距離が既知であれば、手順を逆ることにより表面から探査対象物までの区間の比誘電率を求めることが可能である。これまでの地中レーダーは送信、受信アンテナ間の距離が短く、測定すべき到達時間が数 n sec 程度と非常に短い事から、精度良く測定することが困難であった。現在では、さらに測定精度向上のために新たに地中レーダー装置が開発された。地中レーダーの模式図を図 2-2-1 に示す。送信器で生成されたインパルス状の電気エネルギーは、電力分配器で分岐され、その一部は長さ $(2L - \Delta L)$ の同軸ケーブルを通して電力合成器に至り、残りの大部分は長さ L の同軸ケーブルを通して送信アンテナに送られ、そこで電波エネルギーに変換されて地中放射される。放射された電波エネルギーの一部は直接受信アンテナで受信され（直接波）、また一部は地中の異物などに反射して受信アンテナで受信される（反射波）。これらの波形は受信アンテナで再び電気エネルギーに変換され電力合成器に送られ、そこで電力分配器で分岐された波形と合成される。

次に、モデル化した受信波形を図 2-2-2 に示す。始めに、長さ $(2L - \Delta L)$ の同軸ケーブルを通ってきた基準波が現れ、次に直接波が現れる。その後、さらに反射波が現れる。媒質中の（本研究ではコンクリート）の伝播速度を推定するためには、図 2-2-2 の $(T_1 - T_0)$ を推定する必要がある。ここで、 $(T_r - T_0)$ は同軸ケーブルの長さの違い ΔL を同軸ケーブル中の電磁波伝播速度 V_c で割ることにより求められるとしている。また、 T_r , T_1 はともに実際に受信される波形から測定できることから、時間軸の変動（原点位置のずれ）が生じても $(T_r - T_1)$ は変化しない。求めた各時間を基に、式 (2.4) によって媒質中の電磁波伝播速度 V_g を推定することができ、電子回路系の温度変動等の影響を受けることがほとんどないことから、精度の良い推定が可能となる。

$$\begin{aligned} V_g &= D / \{ (T_1 - T_r) - (T_0 - T_r) \} \\ &= D / \{ (T_1 - T_r) - (\Delta L / V_c) \} \quad (2.4) \end{aligned}$$

ここで、 D は送受信アンテナ間距離を示す。

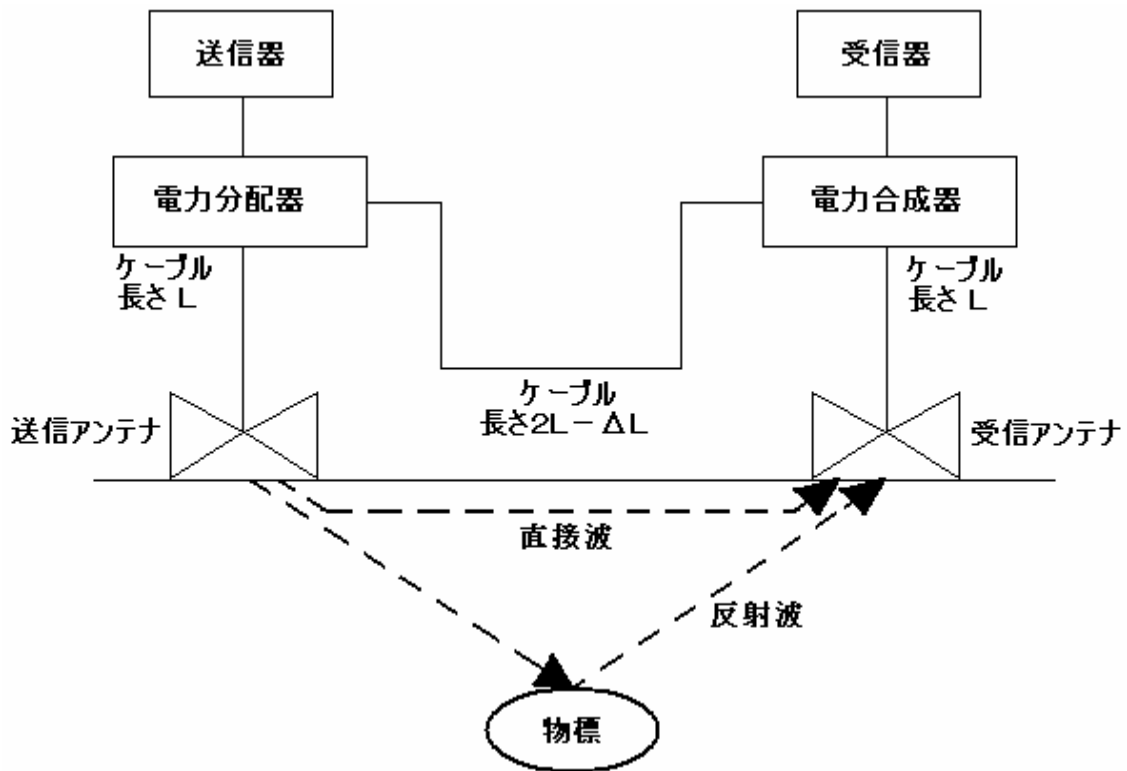


図 2-2-1 電磁波レーダーの概要

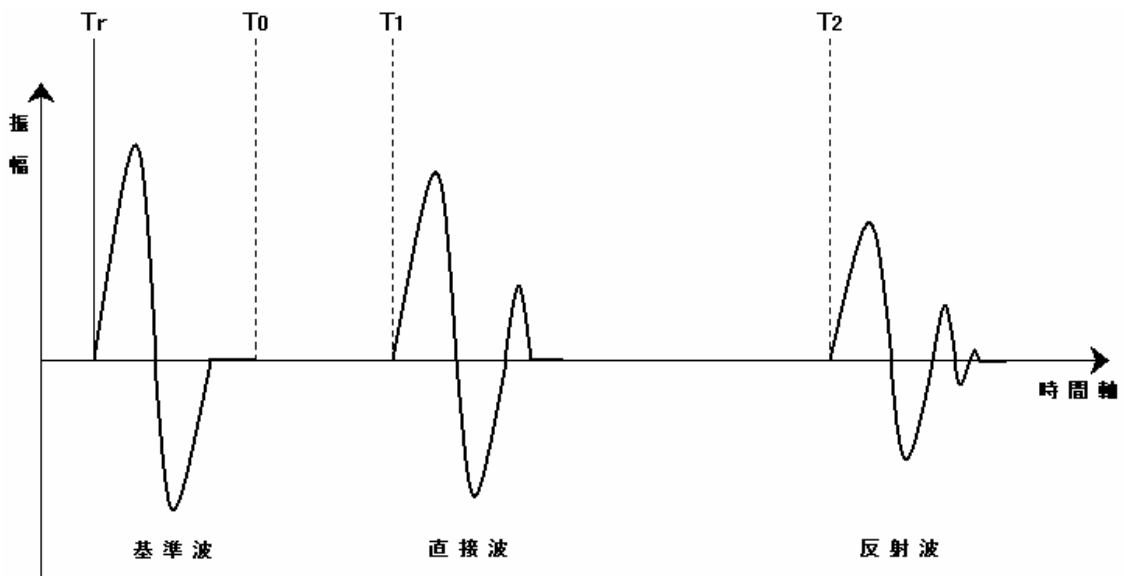


図 2-2-2 モデル化受信波形

2.3 深さ方向の位置測定法

電磁波法の測定法は、深さ方向については時間経過に伴う測定位置の内部状況の変化の測定を行う、時間計測機能を利用し、推定される電磁波の伝播速度で計算される。その測定精度は伝播速度の推定値に依存する。電磁波の伝播速度は、比誘電率によって決定され、比誘電率は主な以下の推定方法によって決定される。

(1) 微破壊検証法

ドリル等で実際の埋設物まで深さを部分的に計測し比誘電率を推定する方法である。最も正確ではあるが、ドリル等の使用機材により、躯体に大きな損傷を与える可能性がある。

(2) ワイドアングル法

反射対象物に対しての計測で、アンテナ間隔を変えて複数計算しその誘電率を推定する方法である。完全非破壊で実施できるが、計測時間やアンテナ費用がかかる。

(3) カーブフィッティング法・三角法

反射物体からの信号を距離計測する事によって得られる反射波形の集合体が二次曲線になることを利用し、その形状を評価しピタゴラスの定理より、比誘電率を推定する方法である。明瞭な二次曲線が計測された場合は有効であるが、配筋ピッチが狭い場合など映像が複雑になる場合、精度は作業者の技量に依存する。

(4) 直接法

アンテナ間の正確な距離とアンテナ間の伝播時間からコンクリートの表面波の比誘電率を推定する方法である。無筋状態のコンクリートに有効であるが、アンテナをコンクリートに密着させる必要があり、現場状況に左右される。

2.4 コンクリートの電気特性

種々の含水率が、コンクリートの電気特性に及ぼす影響を把握する事を目的に、供試体を自然乾燥させた状態で、約1年間の長期計測を行った実験が行われている。

空気量が一定の場合の複素誘電率（実数部と虚数部）と体積水分率場合では、コンクリートの電気特性を表わす複素誘電率の実数部と虚数部は、体積水分率の変化に対して線形的に変化し、セメント量の違いによる影響が小さい。すなわち、コンクリートの体積水分率が一定であれば、複素誘電率は配合（単位セメント量）に関わらず、ほぼ一定である。空気量を変化させた場合、圧縮強度 18N/mm^2 において、複素誘電率の実数部と体積水分率の関係はほぼ線形であり、その傾きはコンクリートの空気量の変化によって異なるが、その変化は小さい。

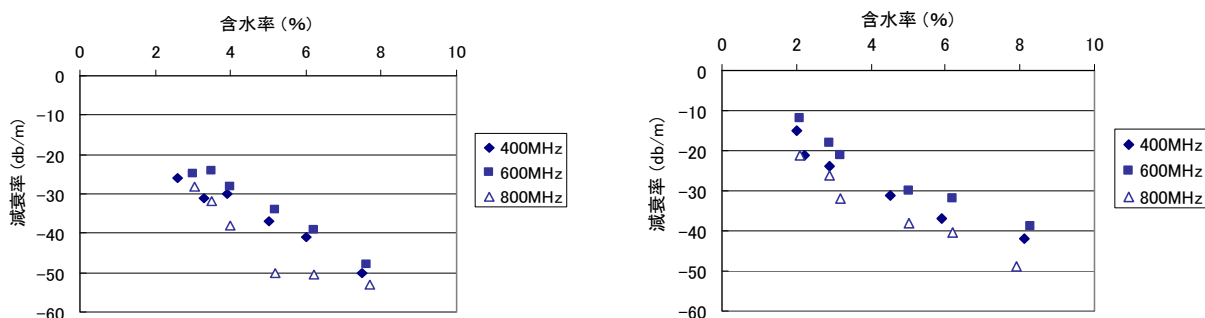
一方、複素誘電率の虚数部と体積水分率の傾きは、コンクリートの空気量と体積水分率の変化によって大きく異なる。すなわち、複素誘電率の実数部がコンクリートの体積水分率に影響し、虚数部がコンクリートの有効間隙率に影響する。

以上より、電磁波レーダー計測からコンクリートの強度を推定するために必要な含水率

及びコンクリート中の空隙率は、電磁波計測で得られた誘電率（実数部，虚数部）で評価することが可能であり，コンクリートの強度と誘電率（実数部，虚数部）との関係を式 (2.5) で示すことができる。

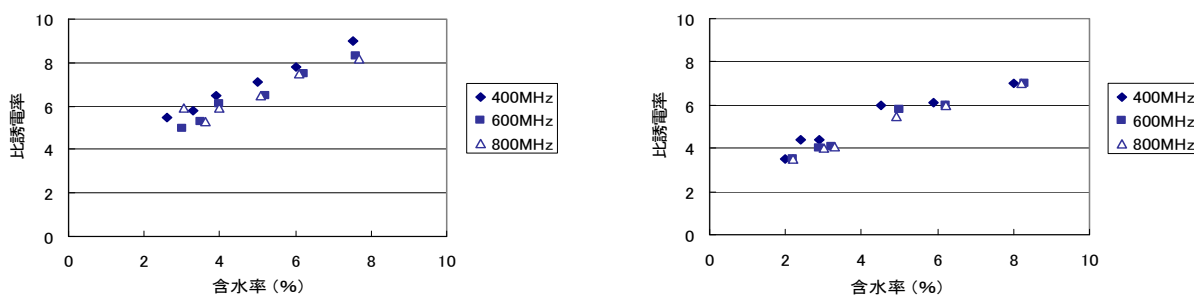
$$\text{コンクリート強度}[\text{N/mm}^2]=0.5 \times (\text{実数部}) + 1.7 \times (\text{虚数部}) + 1.0 \quad (2.5)$$

また，3種類の異なる周波数（400，600，800MHz）について実験を行った．含水率と減衰率との関係，含水率と比誘電率との関係を図 2-4-1 と図 2-4-2 に示す．含水率が高くなると減衰率および誘電率はどれも増加する傾向にあるが，周波数の違いによる大きな差は認められないため，今回使用した周波数の範囲では周波数の違いによる影響は小さいことを示している。



(a) 供試体（強度 15 N/mm²，空気量 5%） (b) 供試体（強度 21 N/mm²，空気量 20%）

図 2-4-1 異なる周波数の場合の含水率と減衰率の関係



(a) 供試体（強度 15 N/mm²，空気量 5%） (b) 供試体（強度 21 N/mm²，空気量 20%）

図 2-4-2 異なる周波数の場合の含水率と比誘電率の関係

2.5 塩化物イオン濃度が電磁波に及ぼす影響に関する実験

溝渕らは、コンクリート中に含まれる塩化物イオンが電磁波に及ぼす影響を評価する目的として、塩化物ナトリウムの濃度を変化させた水溶液を用いた実験を行っている。実験は、12種類(0%~10%)の異なる塩化物イオン濃度の水溶液を用い、深さ5mmのアクリル容器に各濃度の水溶液を満たして、反射対象物として鉄板をアクリル容器の下に敷き、電磁波測定を行った。

実験の結果、比誘電率は塩化物イオン濃度の変化に対して多少のばらつきが見られたが、平均値は80であり、既往の文献に示されている値とほぼ同様であるとしている。一方、振幅値は図2-5-1に示すように、塩化物イオン濃度の増加するにつれ、振幅が小さくなる。特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するが、2%を超えると振幅の大きさにほとんど差異が生じないという結果である。つまり、塩化物イオンが低濃度の範囲ならば、電磁波の出力振幅に変化が大きいことを示し、塩化物イオン濃度を電磁波の振幅で評価できる可能性があるといえる。

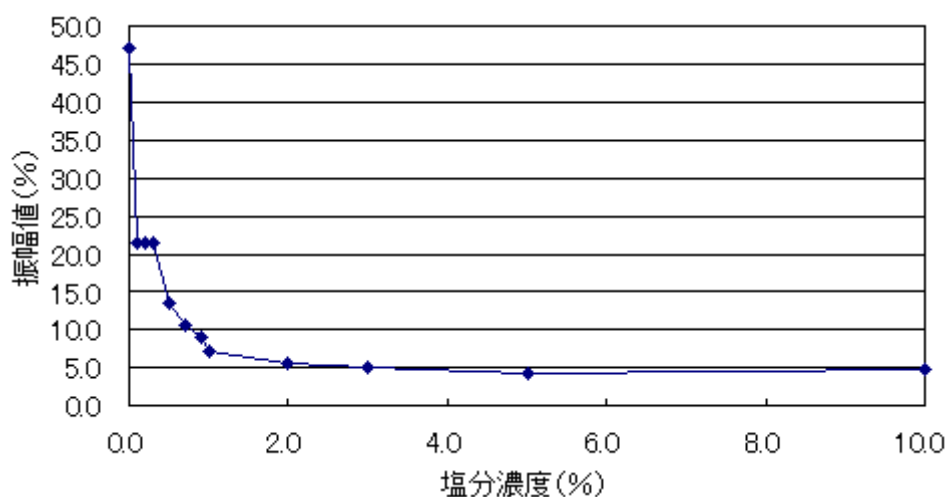


図 2-5-1 塩化物イオン濃度-振幅値との関係

また、コンクリート供試体を用いた塩分含有量及び含水率の電磁波測定を行った。塩化物イオン濃度は比誘電率に及ぼす影響が少ないが、振幅に対しては低濃度の範囲で大きく影響することが明らかで、塩化物イオン濃度による電磁波の振幅評価を行える可能性がある。そこで、溝渕らは塩化物イオン濃度を変化させた供試体を用いて経時的に電磁波測定を行い、異なる塩化物イオン濃度と電磁波測定結果を比較し、電磁波による塩化物イオン濃度の評価について以下の実験を行っている^{5) 6)}。

実験に用いるコンクリート供試体は、100×100×400mmの無筋コンクリート供試体（以下C供試体）と鉄筋コンクリート供試体（以下RC供試体）の2種類とし、塩分含有量は7水準（0kg/m³~6kg/m³）とした。鉄筋は、D-16を用い、鉄筋かぶりを50mmとした。また、

各供試体はコンクリートの練り混ぜ時に所定の塩分を添加して作製している。

供試体は、コンクリート打込み後、材齢 1 日で脱型し、その後塩分を含んだ供試体に水が浸透しないようにビニール袋で密封状態として 7 日間水中養生を行い、測定開始前に表面の水分を拭き取り、実験を行っている。同時に、供試体の質量測定を行い、測定期間終了後も供試体を乾燥炉に入れて絶乾状態とし、絶乾にした状態の重量を測定し、含水率を 0% とした。

重量の経時変化を評価する場合、鉄筋の有無による質量差が生じる事を考慮し、水分逸散率を用いた式 (2.6) により整理を行っている。

$$\text{水分逸散率(\%)} = \frac{\text{測定開始時の供試体質量} - \text{測定時の供試体質量}}{\text{測定開始時の供試体質量} - \text{絶乾質量}} \times 100 \quad (2.6)$$

実験の結果、鉄筋の有無に関係なく、経時変化に伴い水分逸散率、振幅値は増加する傾向にある。つまり、塩化物イオン量の推定を行う際には、比誘電率、振幅値に加えてコンクリート中の水分量が必要であるとしている。また、コンクリート中の水分だけではなく、実験室内の温度の経時変化にも塩化物イオン量の推定値に影響を示していたことから、説明変数に外気温を加えて重回帰分析を行っている。その結果を図 2-5-2 に示す。図 2-5-2 に示すように、外気温を説明変数に加えることで重相関係数は 0.94 となり、様々な説明変数の組み合わせの中でも最も高い値を示し、電磁波測定を用いて塩化物イオン量の推定を高い精度で行うことが可能であるといえる。電磁波測定では、外気温、コンクリート中の水分といった水分量が大きな影響与えている。

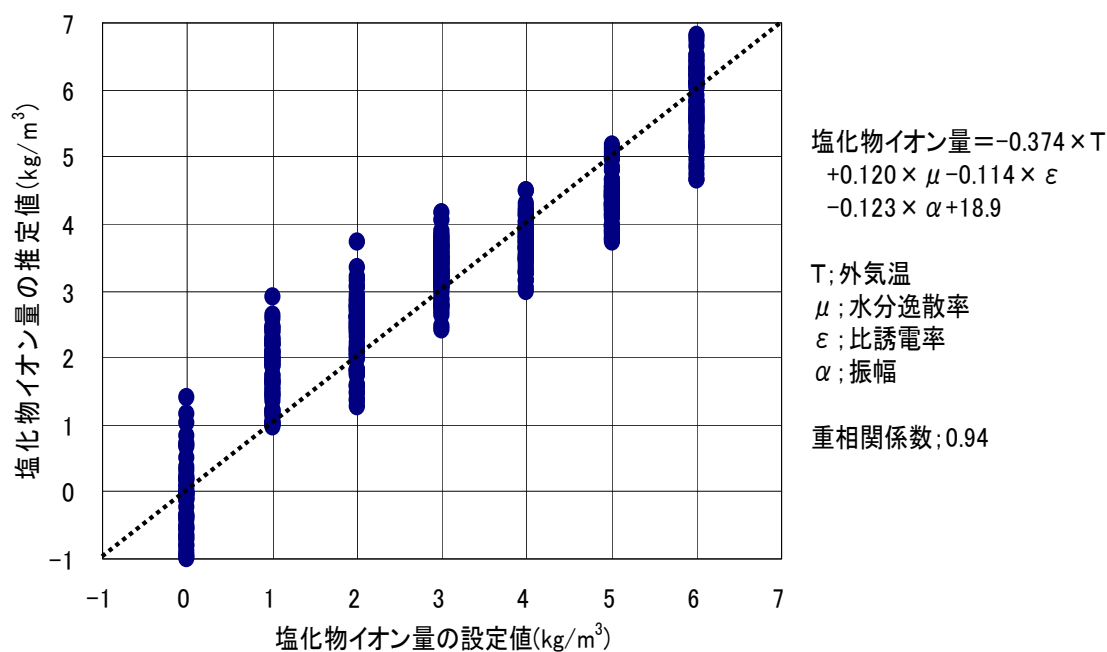


図 2-5-2 塩化物イオン量に関する重回帰分析の結果

以上の結果から、電磁波測定により塩化物イオン量を測定することが可能であることがいえる。また、塩化物イオン量の推定を行う際には、電磁波測定から得られた比誘電率、振幅値及びコンクリート中の水分量及び外気温が必要である。溝渕らは塩化物イオン量、比誘電率、振幅値、コンクリート中の水分量及び外気温との関係を式(2.7)で示すことができるとしている。

$$\text{塩化物イオン量} = a_1 \times \text{外気温} + a_2 \times \text{コンクリートの水分量} + a_3 \times \text{比誘電率} + a_4 \times \text{振幅値} + \text{定数項} \quad (2.7)$$

ここで、 $a_1 \sim a_4$ は各係数の偏回帰係数である。

2.6 異なった配合条件が電磁波に及ぼす影響に関する実験

溝渕らは、実構造物への適用を考慮し、セメントの種類、使用骨材、水セメント比、スランプ、空気量などの材料及び配合条件が変化した場合に、コンクリート中に含まれる塩化物イオン濃度が電磁波に及ぼす影響を評価する目的として、様々な配合条件のコンクリート供試体を用いた実験を行っている。供試体は、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の無筋コンクリート供試体と鉄筋コンクリート供試体の2種類とし、表2-6-1に示すように、17種類の配合にそれぞれ $0 \sim 3 \text{kg/m}^3$ の塩化ナトリウムを添加して、コンクリートの練混ぜを行った。

表 2-6-1 各供試体の配合条件

セメントの種類	骨材	スランプ(cm)	空気量(%)	水セメント比(%)
普通ポルトランド	砕石	12	2	50
			6	
			4	
		18	40	
			30	
			50	
	人口軽量	40	30	
	高炉B種	砕石	12	4
40				
30				
フライアッシュB種	18		12	50
			18	
低熱ポルトランド	12		12	
		18		

注) それぞれに、塩分含有量 0~3kg/m³ を添加する。

供試体はコンクリート打込み後 1 週間で脱型し、それまで供試体上面を湿潤状態に保つために湿布養生を行い、脱型後直ちに供試体質量を測定し、その後実験室内で 1 週間気乾養生を行った。その後は、週に 2 回程度時間計測による電磁波測定を行い、同時に供試体の質量、室内温度の測定を行う。電磁波測定を行う際には、供試体の下面に反射対象物となる鉄板を敷いて測定を行い、それぞれ 3 ヶ月間測定を行った。測定終了後には、各供試体を乾燥炉に入れて絶乾状態にし、この状態を含水率 0% として整理する。コンクリート中の水分変化に関する測定果として、式(2.8)、式(2.9)に示す質量減少率及び含水率から質量変化の算定を行った。

$$\text{質量減少率(\%)} = \frac{\text{測定開始時の供試体質量} - \text{測定時の供試体質量}}{\text{測定開始時の供試体質量}} \times 100 \quad (2.8)$$

$$\text{含水率(\%)} = \frac{\text{測定時の供試体質量} - \text{絶乾質量}}{\text{絶乾質量}} \times 100 \quad (2.9)$$

質量減少率の経時変化を図 2-6-1 に示す。セメントの種類に関わらず、同様な減少傾向が見られる。測定期間内では、0.2%～4.9%の減少率となり、どの検討ケースにおいても測定開始から2週間前後で、質量減少率全体の45%～50%となる。また、塩分含有量が質量減少率へ与える影響は、塩分含有量1～3kg/m³の場合、それぞれの経時変化を比較しても差はほとんどなく、塩分含有量が0kg/m³に比べて減少率が小さくなる傾向が見られる。

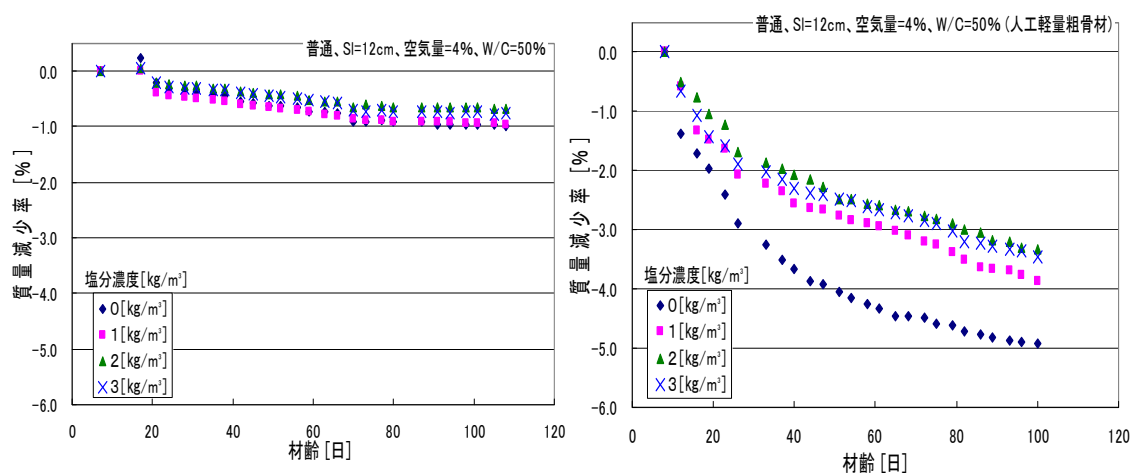


図 2-6-1 質量減少率の経時変化

次に、電磁波測定から得られた比誘電率の経時変化を図 2-6-2 に示す。セメントの種類に関わらず、同様な減少傾向が見られた。測定期間での比誘電率の低下は、0.11～10.7 の値を示しており、質量減少率と比誘電率を比べてみると同様な曲線を示しているため、比誘電率はコンクリート中の水分量に影響を受ける事が明らかである。また、塩分含有量が比誘電率へ与える影響は、含有量0～3kg/m³の場合でも、それぞれの経時変化を比較してもほとんど差が見られなかった。さらに、スランプ別に比誘電率を比べてみると、差がほとんど見られず、水分量が比誘電率に与える影響は、練り混ぜ時よりもコンクリート中の水分変化が大きいといえる。

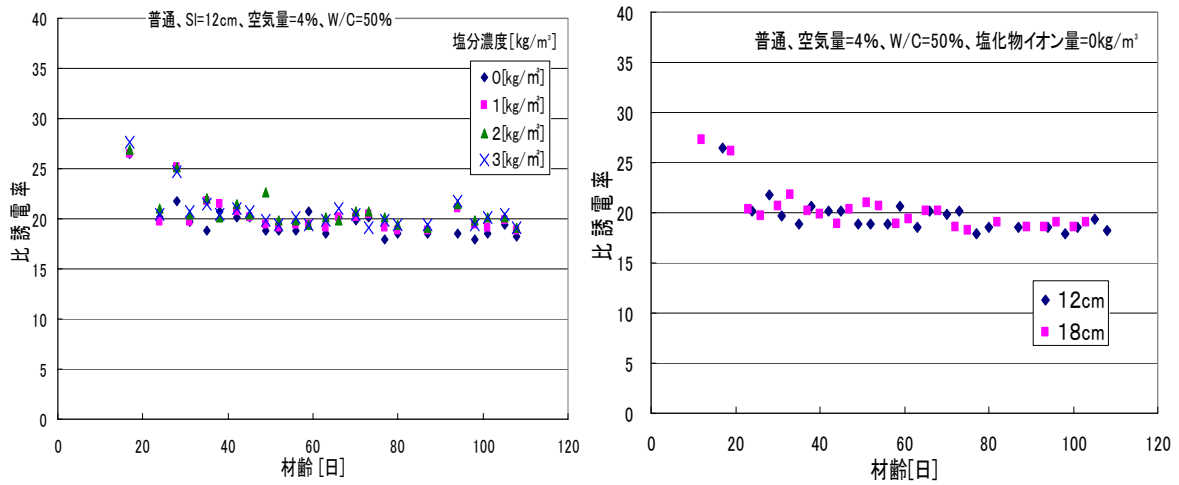


図 2-6-2 比誘電率の経時変化

また、電磁波測定から得られた振幅値のセメント種類別の経時変化を図 2-6-3 に示す。セメントの種類に関わらず経時変化に伴い、増加する傾向が見られる。セメント種類別に見ると、振幅値の経時変化は塩分含有量の違いによって変化を示している。全体的に見ると、高炉セメントB種の場合塩分含有量に関わらず大きな値を示している。

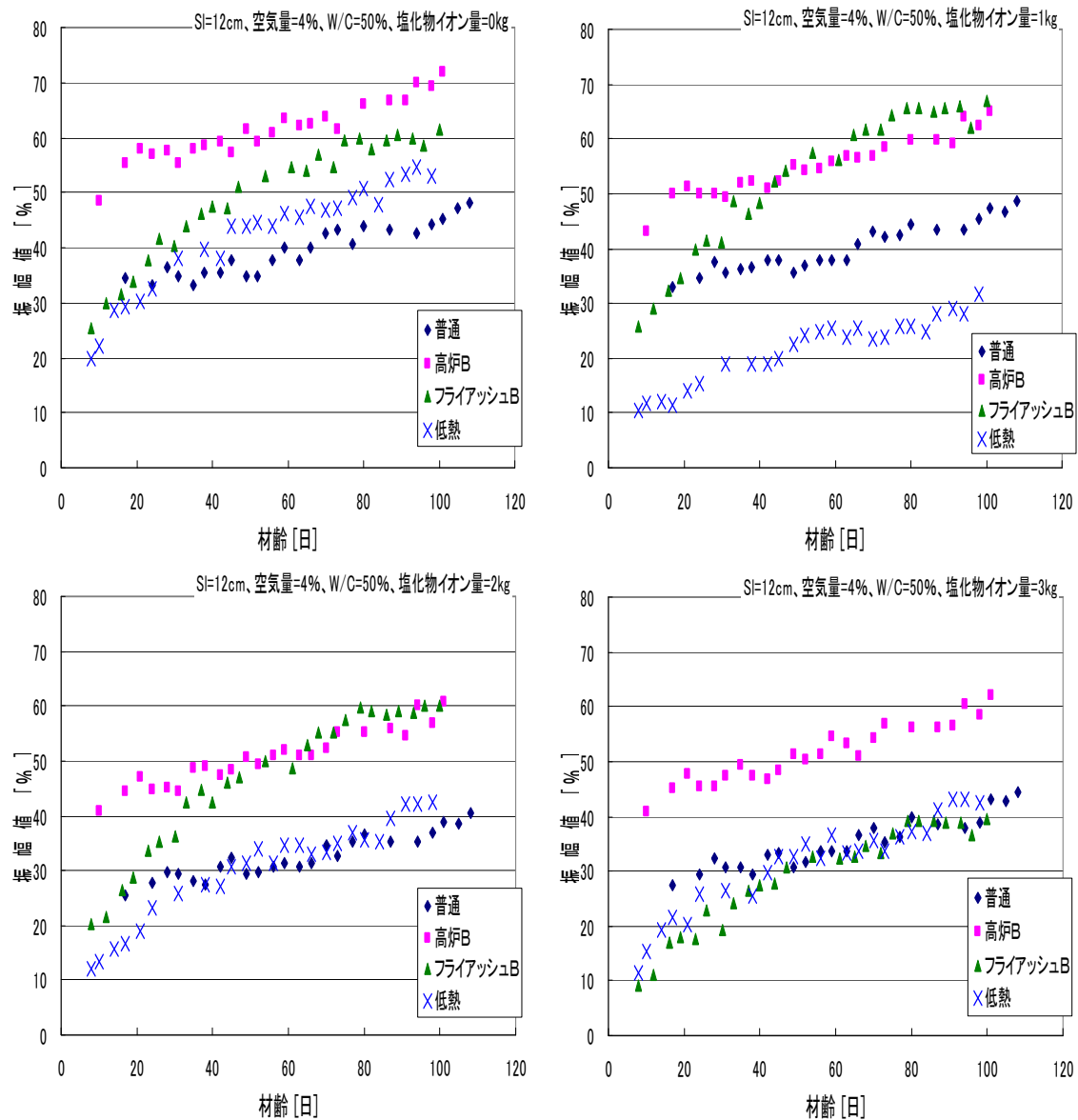


図 2-6-3 セメント種類別の振幅値の経時変化

次に、電磁波測定から得られた振幅値の水セメント別の経時変化を図 2-6-4 に示す。水セメント比別に見ても、振幅値は増加傾向が見られる。普通ポルトランドセメントにおいては、水セメント比 30%の場合大きな値を示しており、セメント量の影響があるといえる。高炉セメント B 種においては、水セメント比の違いでは変化が見られず、既往の研究成果でいわれているように、セメント量の影響が少ないといえる。

さらに、空気量が振幅値に与える影響について比較を行った。振幅値の経時変化から空気量に伴う振幅値の変化が若干見られたが、空気量が振幅値に与える影響は、小さいといえる。

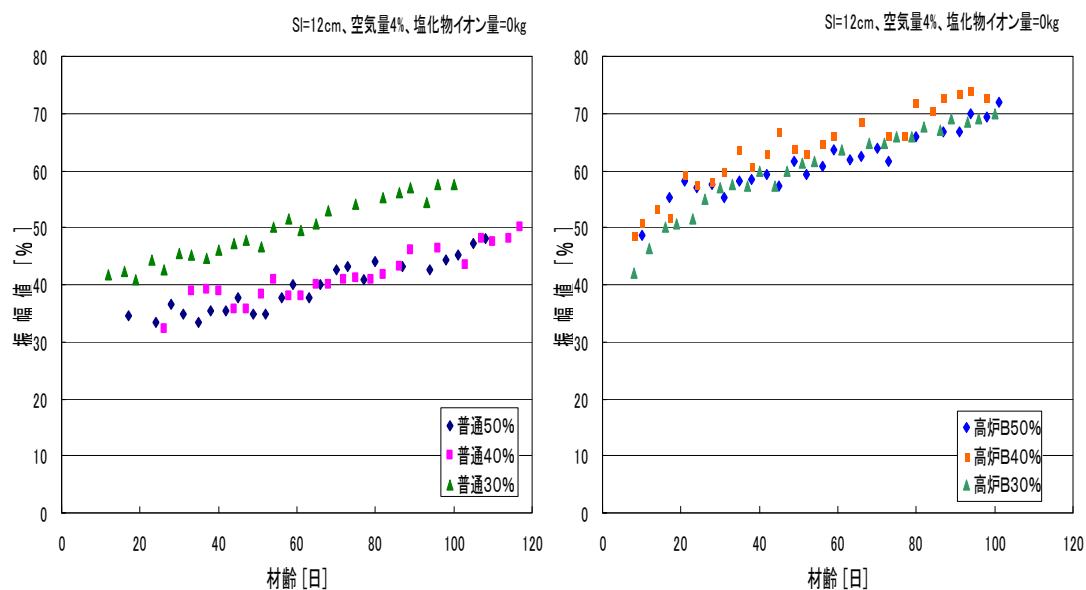


図 2-6-4 水セメント比別の振幅値の経時変化

さらに、これまでの研究結果から、電磁波測定で得られる比誘電率及び振幅値にコンクリート中の水分量及び外気温等を考慮することで、高い精度で塩化物イオン量を推定できることが示されている。さらに、この結果から電磁波測定に及ぼす材料及び配合による特性が得られた事から、塩化物イオン量の推定に及ぼす影響について、重回帰分析を行う。重回帰分析の結果を普通ポルトランドセメントについて、外気温+質量減少率を考慮した場合を図 2-6-5、外気温+質量減少率+空気量+水セメント比+スランプを考慮した場合を図 2-6-6 に示し、低熱ポルトランドセメントについて、気温+質量減少率+空気量+水セメント比+スランプを考慮した場合を図 2-6-7 に示す。

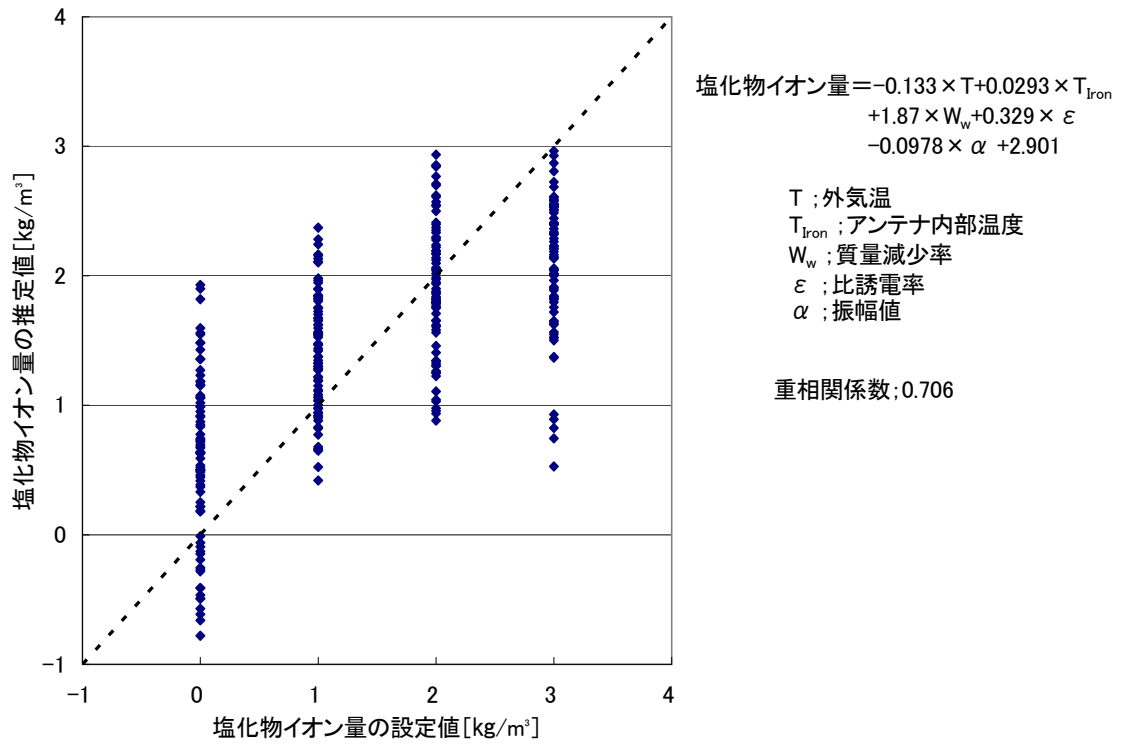


図 2-6-5 塩化物イオン量に関する重回帰分析結果（配合を考慮せず）

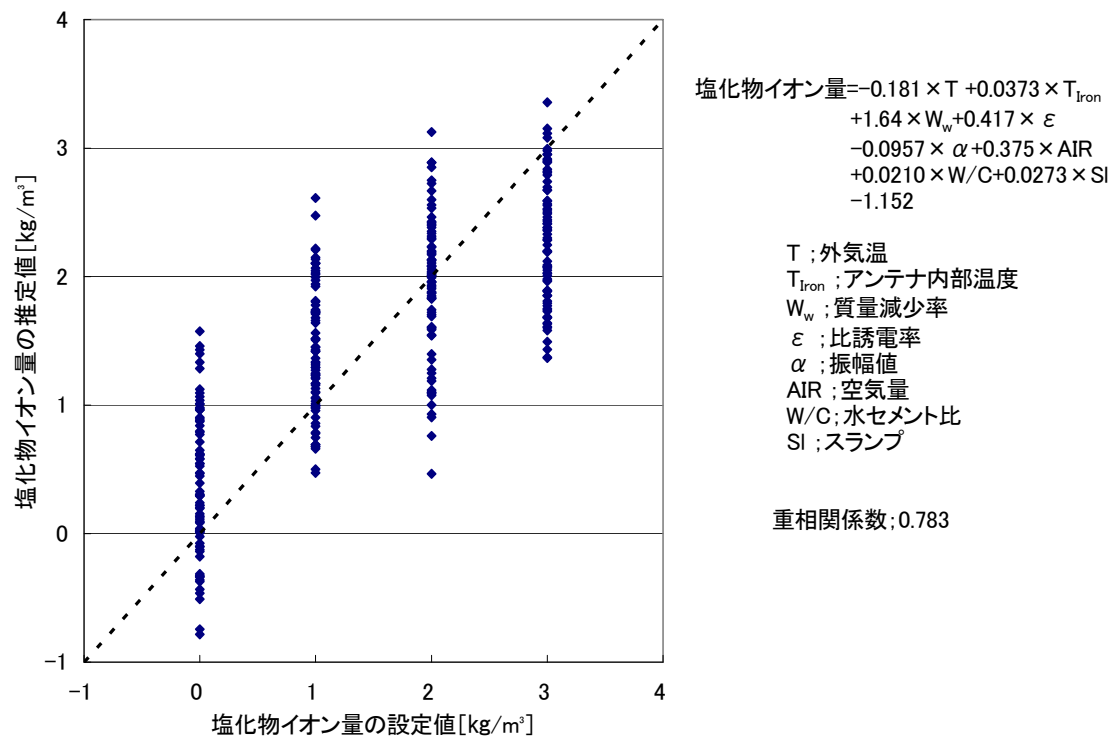


図 2-6-6 塩化物イオン量に関する重回帰分析結果（すべての配合を考慮）

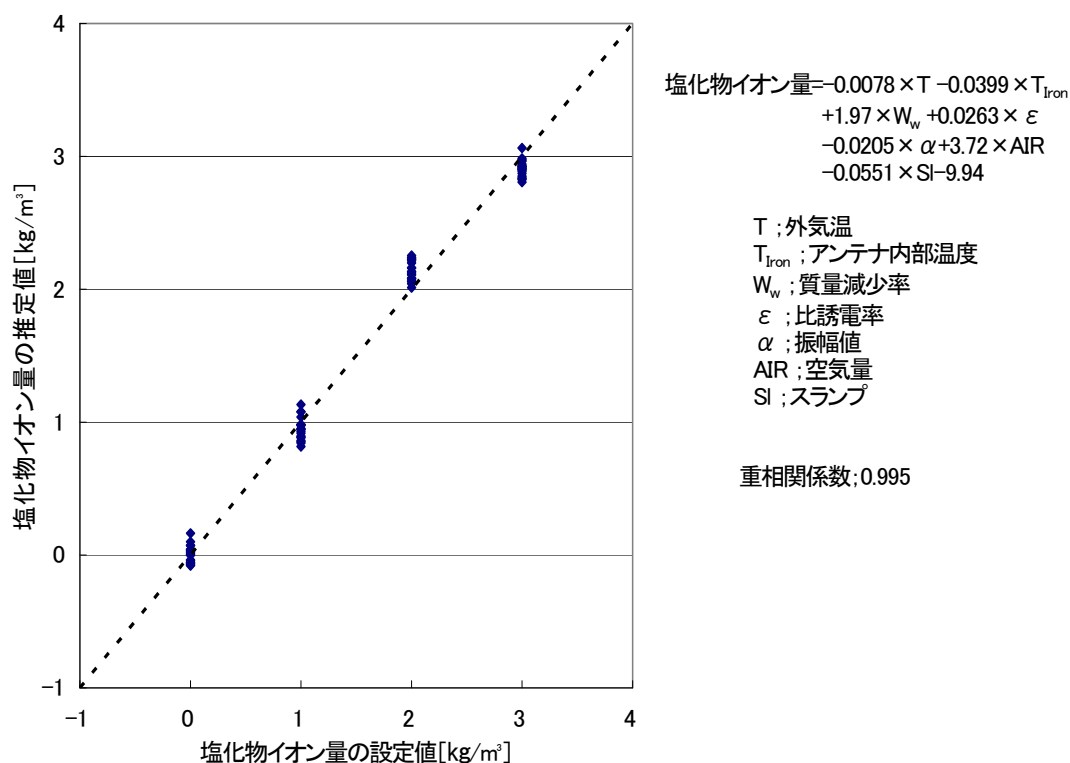


図 2-6-7 塩化物イオン量に関する重回帰分析結果（すべての配合を考慮）

図 2-6-5, 図 2-6-6 を比べた場合, スランプ, 空気量, 水セメント比といった説明変数を加えると相関係数が高い値を示し, 精度が高いものとなる. これは各セメントにおいても同様な結果が得られた. コンクリート中に関わる水分量が影響を与えているといえる. また, 図 2-6-5, 図 2-6-7 を比べた場合, セメントによって相関係数の値が変化している. 最も, 高い値を示したのが低熱ポルトランドセメントであり, 普通ポルトランドセメントが低い値を示した. 同一の説明変数で, セメントの種類別に見ると, セメントの種類が塩分量推定において, 影響を与えるといえる.

以上の結果より, 材料及び配合が電磁波測定に影響を及ぼすことが明らかといえる. 比誘電率は, 既往の研究で得られている結果のとおり, セメントの種類及び配合の影響を受けず, コンクリート中の質量変化や実験室内の外気温などの水分量に影響を受けることが明らかである. 振幅値は, 各材料及び配合からの影響を受けており, 塩化物量推定を行う際には, 各材料及び配合を考慮する事で, 精度高いものとなることが明らかである.

2.7 湿度条件を固定した場合の電磁波による塩化物イオン量の測定

溝渕らは、コンクリート中の水分変化が、比誘電率や振幅値に影響を与えることから、絶乾状態、湿潤状態という湿度条件を一定にした場合に、コンクリート中に含まれる塩化物イオン濃度が、電磁波に及ぼす影響を検討した。供試体は、同一配合で、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の無筋コンクリート供試体を用い、 $0 \sim 3 \text{kg/m}^3$ の塩化ナトリウムを添加したものである。その供試体を気乾養生・水中養生・絶乾養生を行い、質量変化が見られなくなるまで電磁波測定を行った。

実験の結果、比誘電率の経時変化では、気乾養生、水中養生では、同じような変化を示したが、絶乾養生では比誘電率の値が小さな値を示していた。振幅値の経時変化では、比誘電率と同様に、気乾養生、水中養生では同じような変化を示したが、絶乾養生では、振幅値の値が大きな値を示していた。このことから、比誘電率、振幅値はコンクリートの水分量に大きな影響を受けており、コンクリートの含水率が大きい場合は比誘電率は大きくなり、振幅値は小さくなる傾向がみられる。

ここに、重回帰分析を行い、コンクリート中の水分量が塩分推定に与える影響について検討を行う。重回帰分析の結果を図 2-7-1 に示す。

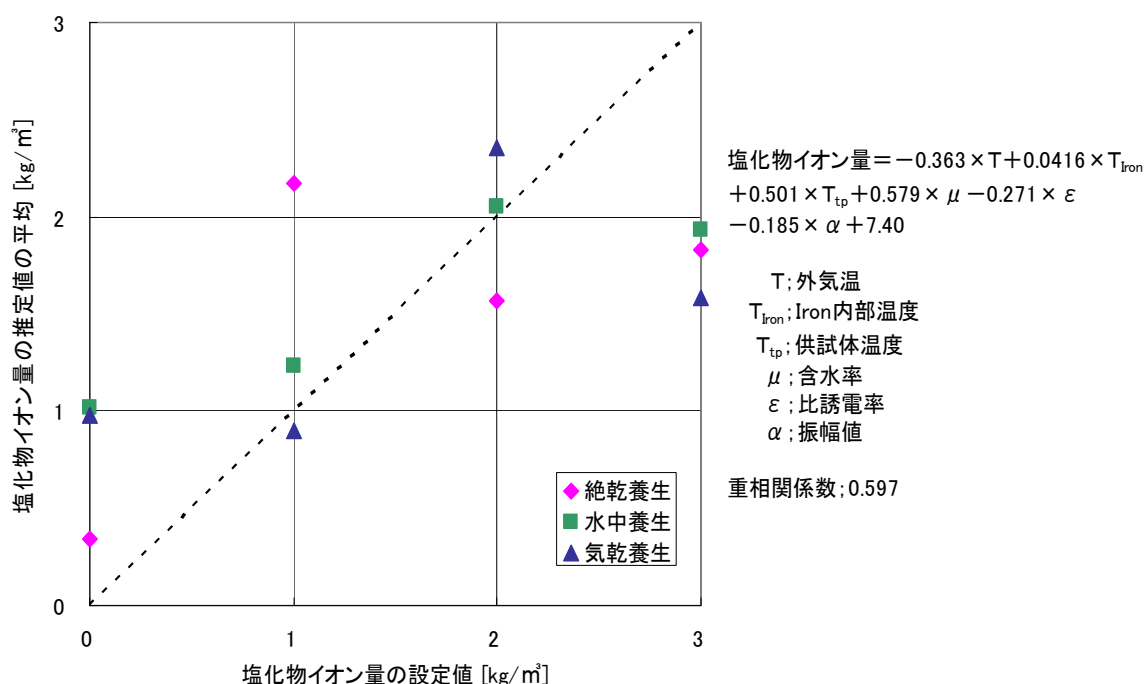


図 2-7-1 塩化物イオン量に関する重回帰分析結果

図 2-7-1 より、塩分推定量には、コンクリート中の水分量が大きな影響を示しており、塩化物イオンのイオン化が影響を与えていると推測できる。以上から、比誘電率は、塩化物イオン量に影響を受けず、振幅値は塩化物イオン量に影響を受ける。また、コンクリート中の塩分量推定は、塩化物イオンのイオン化が影響を与えている。

2.8 埋設電極を用いた交流インピーダンス法の提案

2.8.1 検討の目的

交流インピーダンス法はコンクリート表面に電極を設置し、鉄筋と電極の間に微小な交流電流を印加し、鉄筋の腐食速度に関する抵抗値（分極抵抗）を測定する方法である。この方法では、電極に近い鉄筋表面に電流が多く流れるため、測定値にはコンクリート表面に近い鉄筋表面の情報が偏って含まれている可能性がある。また、腐食速度に関する測定値が低い周波数により得られるため、精度の高い測定を行うためには通常 1 時間以上の時間を要し、環境条件によっては電極とコンクリート間の接触液が乾燥し、測定値に影響を与える可能性がある。

この研究では実験により腐食速度を把握することを目的とするため、まず、精度良く環境条件に左右されず腐食速度を測定できる方法として、コンクリート中に鉄筋を囲むように電極を埋設する方法を考案した。

2.8.2 交流インピーダンス法の概要

交流インピーダンス法の測定は、通常、図 2-8-1 に示すように、測定対象である鉄筋のほかに、電位を測定するための(参照電極)、電流を流すための電極(対極)を使用する。参照電極で鉄筋の電位を測定し、この電位を変化させるように対極と鉄筋間に電流を流しインピーダンスを測定する。測定されたインピーダンスを複素平面上に周波数を変数として描くと、様々な形状の軌跡がえられるが、概念的には概ね図 2-8-2 のような軌跡（Cole-Cole プロット）が得られる。低周波数側に現れる半円状の軌跡の直径が腐食速度と関係する分極抵抗である。しかし、完全な半円が測定されることは稀であり、得られた軌跡から外挿して分極抵抗を求めることが多い。また、最も高周波数側でインピーダンスの虚数成分が最小となる点におけるインピーダンスの実数成分は、コンクリート抵抗を表している。

分極抵抗 (R_p) の逆数は、腐食反応に伴い流れる電流（腐食電流, I_{corr} ）と次式の関係がある。

$$I_{corr} = k \cdot (1/R_p) \quad (2-8-1)$$

ここに、 I_{corr} : 腐食電流 (A/cm^2)

k : 換算係数 (V)

R_p : 分極抵抗 ($\Omega \cdot cm^2$)

ここで、定数 k は金属の種類と環境条件により異なる定数であり、コンクリート中の鉄筋の値についてはこれまでに 0.0017~0.050 (V) の範囲の値が報告されているが、十分に明らかにされているとはいえない。

式(2-8-1)は腐食電流の値であるので、電流が全て $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ の反応によると仮定すると、式(2-8-2)に示すファラデーの法則により式(2-8-3)を用いて分極抵抗から腐食速度を算出することができる。

$$I_{corr} / Fa = V_{corr} / (M / 2) \quad (2-8-2)$$

ここに、 Fa : ファラデー定数 (96500 クーロン)

M : Fe の原子量 (55.8)

V_{corr} : 腐食速度 ($g/cm^2/sec$)

$$V_{corr} = \alpha (1/Rp) \quad (2-8-3)$$
$$\alpha = (M/2)(k/Fa) \quad (\Omega \cdot g/sec)$$

この研究では、定数 α を実験により求め、この値を用いて、式(2-8-3)により腐食速度を算出することとした。腐食速度、分極抵抗はそれぞれ時間の関数であると考え、式(2-8-3)の両辺を時間で積分すると、腐食量と分極抵抗の逆数の時間積分値の間には式(2-8-4)の関係が導かれ、定数 α を実験的に求めることができる。

$$G = \alpha \int (1/Rp) dt \quad (2-8-4)$$

ここに、 G : 腐食量 (腐食減量) (g/cm^2)

2.8.3 埋設型電極の提案

交流インピーダンス法で、使用する電極を、全て埋設するように、図 2-8-3 に示す埋設電極を考案した。対極は 4 本のステンレス製の線材 (SUS316, $\phi 4mm$) を 2 本の同材質のステンレス製の線材で接続した形状である。電流が鉄筋表面に均等に流れるように、鉄筋を囲む位置に平行に配置し、鉄筋の長さに対応する部分以外は電流が流れないように絶縁テープで被覆した。参照電極は白金の線材 ($\phi 0.5mm$) を用い、鉄筋近傍に配置した。

2.8.4 実験の概要

(1) 実験の要因と条件

実験の要因は表 2-8-1 に示すように、試験体に予め混入する塩化物イオン量、かぶりおよび相対湿度とした。塩化物イオン量は、海洋環境にあるコンクリート構造物の調査結果などを参考に、 $10kg/m^3$ を最大値とした。かぶりは、土木学会コンクリート標準示方書設計編を参考に 10cm までとした。相対湿度は、我が国の各地の月別年平均相対湿度(1961 年～1990 年の平均値)の年平均が 64%～80%であることを参考に、相対湿度 60%および 80%の 2 種類に設定した。

実験の温度は 40°C 一定とした。我が国の各地の月別平均気温 (1961 年～1990 年の平均値) は 5.7°C (釧路) から 22.4°C (那覇) までの範囲で分布している。一方、日射を受けるコンクリートの温度は気温だけでなく日照量などの影響を受け、気温よりも 10°C～15°C 程度高いことが報告されている。腐食反応は温度が高いほうが速く進むことから、この研究では、最も気温の高い那覇の年平均気温を参考にし、コンクリートの温度が気温よりも高くなることを考慮し、実験の温度を 40°C に設定した。

(2) 試験体

実験に用いた試験体は、図 2-8-3 に示すように、かぶりをそれぞれ 2cm, 5cm, 10cm とした 3 種類である。同一試験要因について試験体は 3 体とし、この内 1 体の試験体を交流インピーダンス測定用とし、鉄筋と電極を埋め込んだものとしている。他の 2 体は電極を埋め込まず、電極を埋め込んだことによる腐食への影響を把握するための試験体としている。試験体は 1 面のみを開放面とし、他の 5 面をタールエポキシ(JIS K 5664 タールエポキシ樹脂塗料 I 種適合品)でシールした。

実験に用いた試験体のコンクリートの配合は、表 2-8-2 に示す通りである。所定の塩化物イオン量に対応した NaCl (3.3, 6.6, 9.9, 13.2, 16.5kg/m³) を混入した塩水を、練混ぜ水として使用した。既往の研究では、鉄筋の腐食速度に対するコンクリートの水セメント比の影響は大きいことが知られている。しかし、コンクリート標準示方書施工編「海洋コンクリート」の環境区分に応じた水セメント比の最大値を参考に、水セメント比は 55%の 1 種類とした。単位セメント量は、同じく規定されている最小のセメント量である 330kg/m³ を選定した。

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材は利根川鹿島産の川砂(比重: 2.69, 吸水率: 0.98%)を用いた。混和剤は AE 減水剤を使用し、セメント重量に対して 0.25% 混入した。

試験体は打設 1 日後に脱型し、室内で 1 ヶ月間の湿空養生を行い、その後解放面以外の面のタールエポキシ塗布を 3 回行い(この期間 20 日間)、試験に供した。

試験終了後(材齢 18 ヶ月, 相対湿度 80%)のコンクリートの圧縮強度は、塩化物イオン濃度 2, 4, 6, 8, 10kg/m³のものが、それぞれ 35.3, 38.7, 38.5, 41.8, 41.2MPa であった。

(3) 実験の工程

実験の工程を図 2-8-4 に示す。養生後の試験体を恒温恒湿槽(気温: 40°C, 相対湿度 60% および 80%)内に静置し、交流インピーダンス法による測定を所定の間隔で行い、429 日後に解体して鉄筋の腐食減量を測定している。ただし、交流インピーダンス法による測定後毎に、試験体のひび割れ状況を観察し、ひび割れの総延長が鉄筋長(20cm)の 1/2 になった試験体は随時解体し腐食減量を測定している。

交流インピーダンス法による分極抵抗および鉄筋と対極間のコンクリート抵抗(以降、コンクリート抵抗と称する)の測定は、測定周波数 0.1mHz~10kHz の範囲を基本とし、印加電圧を自然電位±50mVで行っている。測定は、2 週間~4 週間の間隔で行い、装置はポテンショスタット、周波数応答解析器を用いた。

腐食量の測定は、日本コンクリート工学協会「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)コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」を参考に、60°Cの 10%クエン酸二アンモニウム溶液に 24 時間浸漬した後、腐食生成物を除去した鉄筋の重量を測定し、腐食前の重量との差を腐食量とした。このとき非腐食部分の黒皮が除去された

ため、別に健全な鉄筋を用いて上記と同じ方法により重量減少量を測定し、腐食による重量減少量から差し引いた値を腐食量とした。

(4) 埋設電極を用いた交流インピーダンス法の適用性の検証

測定されたインピーダンスの Cole-Cole プロットの例を図 2-8-5 に示す。低周波数側に半円状の軌跡が現れており、インピーダンスを良好に測定できていると判断できる。低周波数側の軌跡を半円として近似し、円が実数軸と交わる 2 点の距離を求め分極抵抗とした。

測定された分極抵抗の逆数の時間積分値を式(2-8-5)により計算し、腐食減量の実測値と比較した。結果を図 2-8-6 に示す。図より両者の間には線形関係が認められ、本研究で提案した交流インピーダンス法により分極抵抗を精度よく測定できることが確認できた。この近似直線の傾き 0.0337 を用いて、式(2-8-6)により分極抵抗から腐食速度を算出できる。

$$S = \sum \Delta S_n \quad (n=1 \cdot \cdot \cdot N) \quad (2-8-5)$$

$$\Delta S_n = (1/Rt_n + 1/Rt_{n-1})(t_n - t_{n-1})/2$$

ここに、 S : 分極抵抗の逆数の時間積分値(sec/ Ω/cm^2)

ΔS_n : 時刻 t_{n-1} から時刻 t_n までの間の分極抵抗
の逆数の時間積分値(sec/ Ω/cm^2)

Rt_n : 時刻 t_n に測定された分極抵抗($\Omega \cdot cm^2$)

t_n : n 回目の測定時刻 (sec)

N : 最大測定回数

$$V_{corr} = 0.0337(1/R_p) \quad (2-8-6)$$

ここに、 V_{corr} : 腐食速度 (mg/ cm^2 /sec)

R_p : 分極抵抗 ($\Omega \cdot cm^2$)

ここで、得られた比例定数 α の値は 0.0337 であり、この値は筆者らがこれまで報告した値 0.0111 と比較すると大きな値である。これは、埋設電極を用いたことにより、鉄筋周方向の情報より均一に得られたためと考えられる。これまでの報告では、コンクリート表面側の分極抵抗(これは鉄筋の平均的な分極抵抗よりも小さい)が主に測定されていたため、ある一定の腐食速度(すなわち V_{corr}) に対してその係数 α も小さく評価されていたものと考えられる。

以上のことから、埋設電極をもちいたインピーダンス法の適用性は良好であり、同手法により鉄筋の腐食速度を精度良く測定できると考えられる。

(5) 結果

海岸近くの大気中に位置する鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食進行の予測手法を提案することを目的として、予め塩分を混入した試験体を用いた鉄筋腐食速度評価実験を行った。実験では埋設電極を用いた交流インピーダンス法を考察し腐食速度を測定した。

この研究で得られた主な結果を纏めると次の通りである。

- 提案した埋設電極を用いた交流インピーダンス法により、腐食速度を比較的精度よく測定できることが確認できた。
- コンクリート中の塩化物イオン濃度が腐食速度に及ぼす影響は非常に大きく、塩化物イオン濃度が増大すると腐食速度は著しく増大する。しかし、塩化物イオン濃度が 6kg/m^3 程度を超えると腐食速度はあまり増大しなくなる。
- 定温定湿度環境では、コンクリート中の鉄筋の腐食速度は、塩化物イオン濃度が一定でも経時的に減少する傾向があり、一方、鉄筋近傍のコンクリートの電気抵抗（コンクリート抵抗）は経時的に増大する傾向がある。コンクリート抵抗の増大により腐食反応が生じにくくなるためと考えられ、ある程度乾燥したコンクリート中の鉄筋の腐食速度は、塩化物イオン濃度の他にコンクリート抵抗にも関係していると考えられる。
- コンクリート抵抗が経時的に増大する傾向は、かぶりが小さいほど、湿度が低いほど顕著である。このため、コンクリートが経時的に乾燥することによる含水量の低下が、コンクリート抵抗の増大の主な原因と考えられる。

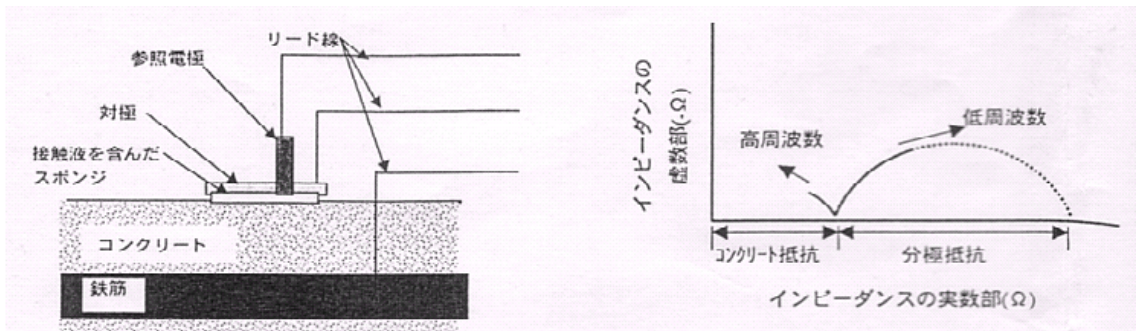


図 2-8-1 通常の交流インピーダンス法の測定方法 図 2-8-2 インピーダンス軌跡の形状

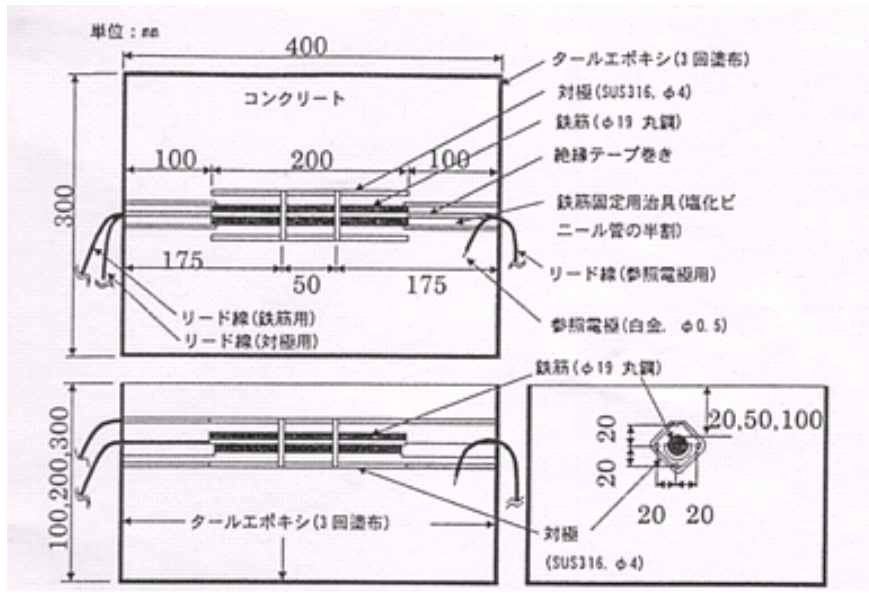


図 2-8-3 埋設電極を使用した試験体の形状

表 2-8-1 腐食速度評価実験の要因

要因	水準
混入塩化物イオン量 (kg/m ³)	2, 4, 6, 8, 10
かぶり(cm)	2, 5, 10
相対湿度(%)	60, 80

*)混入塩化物イオン量はかぶり2cmの場合6kg/m³, かぶり5cmの場合8kg/m³を上限とした.

表 2-8-2 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント 比 (%)	単位量(kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 C×0.25%
13	12±2.5	4±1	55	179	330	737	1038	0.825

*)混和剤はAE減水剤

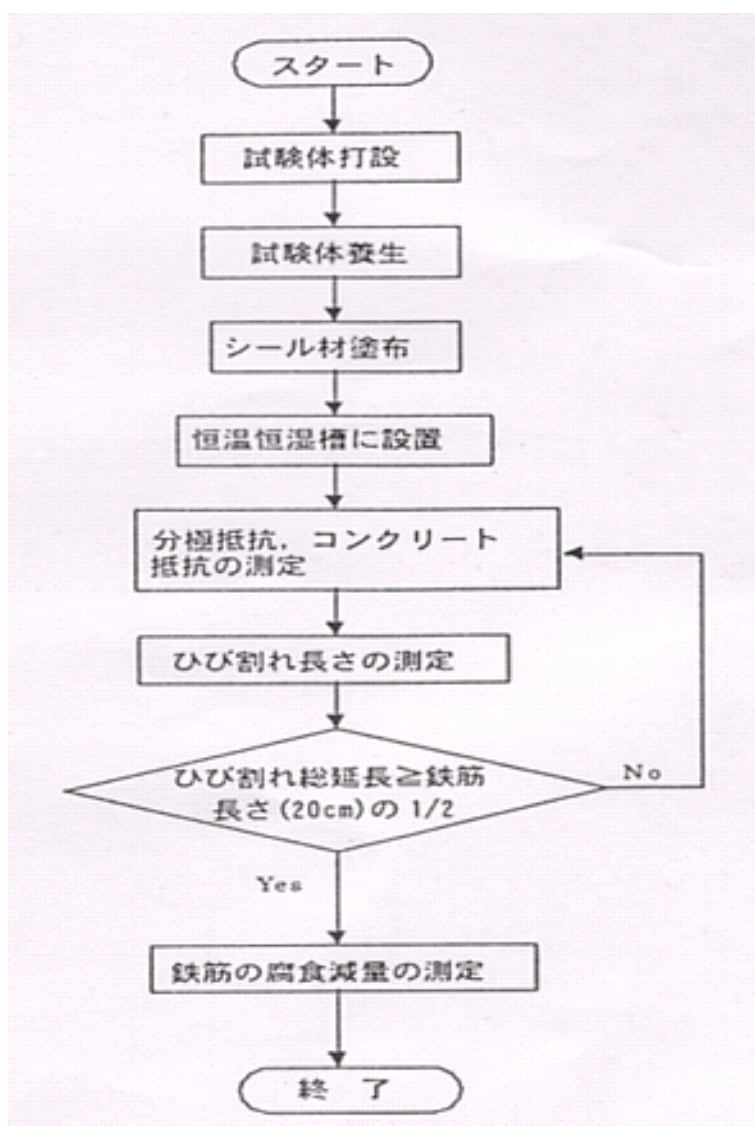


図 2-8-4 腐食速度評価実験の工程

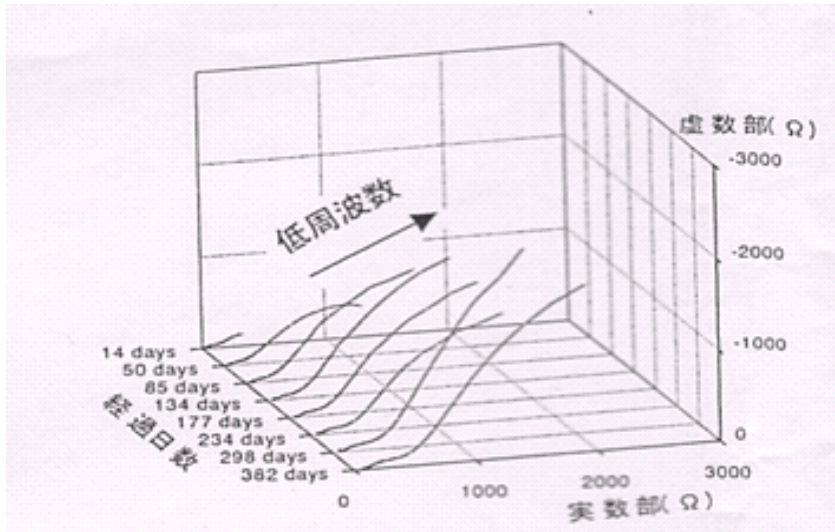


図 2-8-5 測定されたインピーダンス軌跡の例 (かぶり 5cm, 塩化物イオン濃度 4kg/m³)

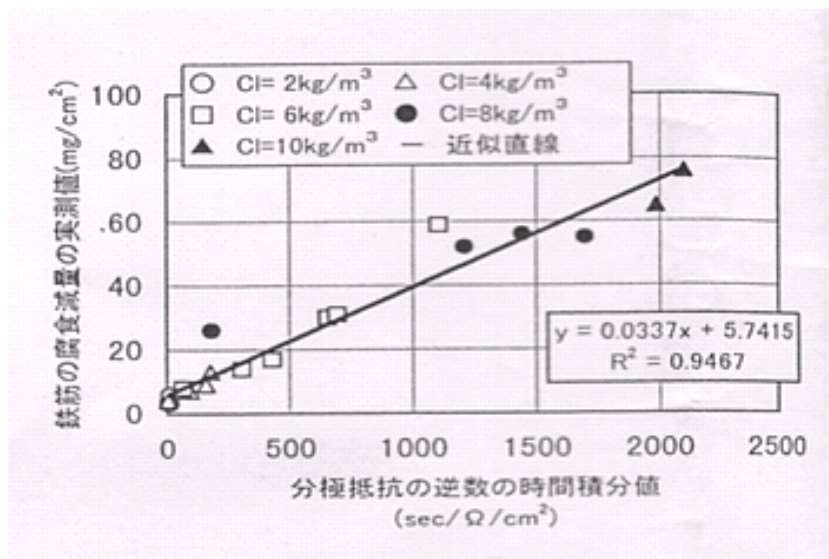


図 2-8-6 分極抵抗係数の逆数の時間積分値と腐食減量の関係

第3章 使用材料・配合条件

3.1 使用材料

以降の各章での実験で使用する材料は以下に示すものとする。

(1) セメント

供試体には、三井住友大阪セメント株式会社製の普通ポルトランドセメントを使用した。セメントの保管は湿度による風化などの影響を防ぐために、1袋ずつビニール袋に入れてテープで密封し、保管した。使用する際には、セメントを貯蔵缶に移し替えた。セメントの物理的性質及び化学成分については、JIS R 5201 “セメントの物理的試験方法”に従って試験を行ない、試験結果を表 3-1-1 に示す。

表 3-1-1 普通ポルトランドセメントの性質

種類		普通ポルトランドセメント JIS R 5210			
		JIS 規格値	試験成績		
			平均値	標準偏差	最大値 (最小値)
品質					
密度	g/cm ³	—	3.15	—	—
比表面積	cm ² /g	2500以上	3340	74	—
凝結	水量	%	—	27.5	—
	始発	h-min	60min以上	2-31	—
	終結	h-min	10h以下	3-44	—
安定性		良	良	—	—
圧縮強さ N/mm ²	1d	—	—	—	—
	3d	12.5以上	30.9	1.45	—
	7d	22.5以上	46.0	1.71	—
	28d	42.5以上	63.3	1.88	—
水和熱 J/g	7d	—	322	—	—
	28d	—	381	—	—
化学成分 %	酸化マグネシウム	5.0以下	1.60	—	2.37
	三酸化硫黄	3.0以下	1.90	—	2.08
	強熱減量	3.0以下	1.85	—	2.36
	全アルカリ	0.75以下	0.55	—	0.63
	塩化物イオン	0.035以下	0.013	—	0.028

(2) 細骨材

本実験に使用した細骨材は、鬼怒川産の川砂である。使用の際に、まずふるい分けによって 5mm 以上の粒を取り除いた後、表面水率が 1%程度となるまで切り返しながら均等に乾燥させた。その後、直ちに茶箱に入れ表面に湿らせたウェスで覆うことにより表面水率の変動を極力抑えるように保管した。細骨材の試験は、JIS A 1102 “骨材のふるい分け試験方法” JIS A 1104 “骨材の単位容積重量及び吸水率試験方法” JIS A 1109 “細骨材の比重及び吸水率試験方法” に基づき試験を行なった。各々の試験結果を表 3-1-2 に示す。

表 3-1-2 細骨材の性質

表乾比重 (kg/m ³)	吸水率 (%)	粗粒率 (FM)	単位容積質量 (kg/l)	実績率 (%)
2.64	2.07	2.73	1.69	66.2

(3) 粗骨材

本実験に使用した粗骨材は、青梅産の碎石であり粗骨材最大寸法は 20mm とした。使用する際に、表面に付着している不純物を取り除くため水洗いしながらふるいによってふるい分けた後、表乾状態にし、茶箱に入れ、湿らせたウェスを被せて保管した。

粗骨材の粒度は、土木学会コンクリート標準示方書に示されている粗骨材の標準粒度範囲内に収まるように 20~15mm, 15~10mm 及び 10~5mm でふるい分けたものを使用した。粗骨材の試験は、JIS A 1110 “粗骨材の比重及び吸水試験方法” JIS A 1104 “骨材の単位容積重量及び実績率試験方法” JIS A 1102 “骨材のふるい分け試験” に基づき試験を行なった。それぞれの試験結果を表 3-1-3 に示す。

表 3-1-3 粗骨材の性質

表乾比重 (kg/m ³)	吸水率 (%)	粗粒率 (FM)	単位容積質量 (kg/l)	実績率 (%)
2.62	0.81	6.72	1.65	59.5

(4) 混和剤料

本実験に使用する AE 剤は、山宗科学社製のレジジン系ヴィンゾルである。また、AE 減水剤は、株式会社ポゾリス物産製のポゾリス No.70 である。

(5) 練り混ぜ水

本実験に使用する練り混ぜ水は、法政大学工学部土木材料実験室内の水道水である。

(6) 浸漬水

本実験に使用する浸漬水は、水道水、一級塩化ナトリウムおよびうみじおである。

3.2 配合条件

本実験において使用した供試体の配合条件を表 3-2-1～表 3-2-3 に示す。

表 3-2-1 W/C=45%の配合条件

スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				単位量 (g/m ³)	
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤	AE減水剤
			W	C	S	G		
5	4.5	44.5	166	369	778	972	37	1296
12	4.5	44.5	180	400	752	935	40	1400
21	4.5	44.5	198	440	715	891	44	1540

表 3-2-2 W/C=55%の配合条件

スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				単位量 (g/m ³)	
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤	AE減水剤
			W	C	S	G		
5	4.5	46.5	166	302	841	967	30	1057
12	4.5	46.5	180	327	815	935	33	1145
21	4.5	46.5	198	360	778	896	36	1260

表 3-2-3 W/C=65%の配合条件

スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				単位量 (g/m ³)	
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤	AE減水剤
			W	C	S	G		
5	4.5	48.5	166	255	896	954	26	893
12	4.5	48.5	180	277	870	922	28	970
21	4.5	48.5	198	305	836	886	31	1068

第4章 実験方法

4.1 研究方法

電磁波法及びインピーダンス法に用いた供試体は高さ 30×幅 40×長さ 20cm とし、両実験ともに鉄筋コンクリート構造物が受ける波浪や海水飛沫作用という条件に近づくように塩化ナトリウム水溶液を用いて塩分浸透させた。浸漬させる塩化ナトリウム水溶液は濃度 3%とし、浸漬サイクルは湿潤 1 日、乾燥 2 日の 3 日間を 1 サイクルとした。1 サイクルの工程を図 4-1-1 に示す。スランプは 12cm とし、W/C=45, 55, 65%の 3 種類の供試体を用いて実験を行った。また、塩分浸漬を早期に促進させるため、W/C=65%, スランプ=21cm, 条件では塩分濃度 10%と人工海水としたケースについても試験を行った。さらに比較のため電磁波法では W/C=55%, インピーダンス法では W/C=45, 55, 65%の 3 種類の供試体において真水を浸漬させた供試体について測定を行った。

図 4-3-1 供試体の概要

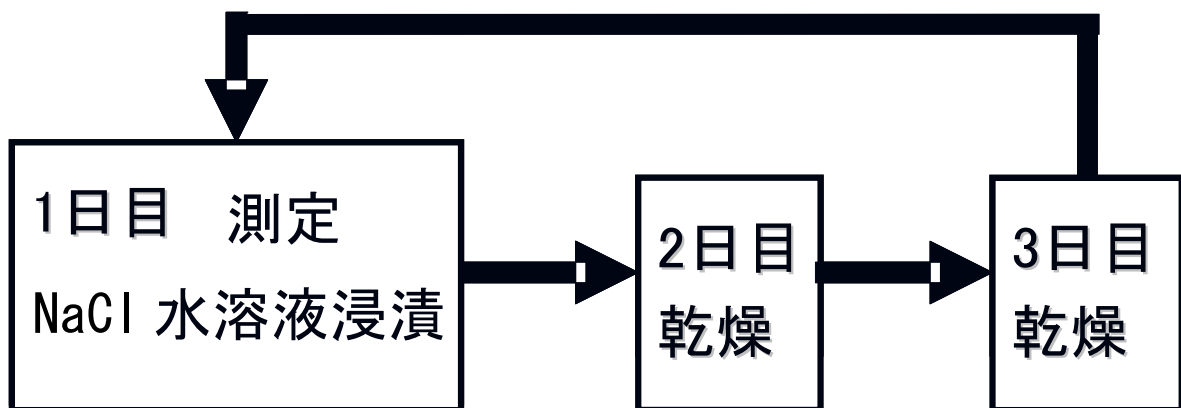


図 4-1-1 1 サイクルの工程

4.2 電磁波法

電磁波測定には電磁波レーダを使用した。本研究では、コマツエンジニアリング株式会社製の周波数 1.0GHz の Iron seeker を用いて時間計測による測定を行った。以下に供試体の概要を示す。

なお、図 4-2-1 に電磁波法で使用した供試体、図 4-2-2 に電磁波レーダを示す。

(1) 供試体概要

- ① 供試体の寸法は高さ 30×幅 40×長さ 20cm で作製した。
- ② 鉄筋位置の変化に対応した塩分量の推定を行うため、供試体上面からの鉄板位置を 3cm、5cm、7cm、10cm と変化させた。鉄板の厚さは 6mm。例外として W/C=65%、スランプ 21cm の供試体に塩害の影響と考えられるひび割れ発生が生じており、これを測定対象とするとともに、この比較対象として w/c=65%、スランプ 12cm の供試体は測定した。
- ③ 水セメント比の違いによる塩分評価を行うため、W/C=45%、55%、65%とした。
- ④ スランプの違いによる塩分評価を行うため、5cm、12cm、21cm とした。また W/C=65%、スランプ 21cm の供試体は塩分促進を図るために 10%の塩化ナトリウム水溶液を浸漬させた。
- ⑤ 鉄板深さ、水セメント比、スランプを考慮し、合計 45 個の供試体を作製した。
- ⑥ また、真水による浸漬を行うため、w/c=55%、スランプ 12cm、鉄板深さ 3cm、5cm、7cm、10cm、鉄板無しの合計 5 個の供試体を作製した。
- ⑦ 浸漬させる上面以外をシリコンシーラントで被覆し、塩化ナトリウム水溶液、もしくは真水を溜められるようアクリル板で囲った。アクリル板の厚さ 3mm。



図 4-2-1 電磁波法で使用する供試体



図 4-2-2 Ironseeker (周波数 1.0GHz)

(2) 測定方法

時間測定

時間測定機能を用いた測定は、かぶり深さごとに時間測定を行う。時間測定概要について図 4-2-3 に示す。

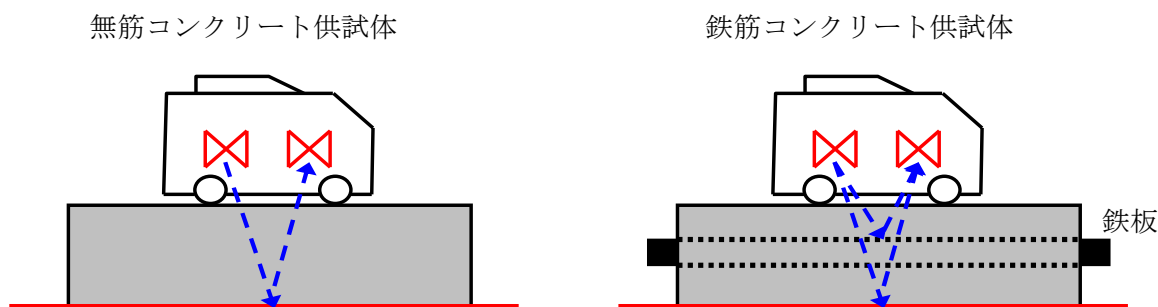


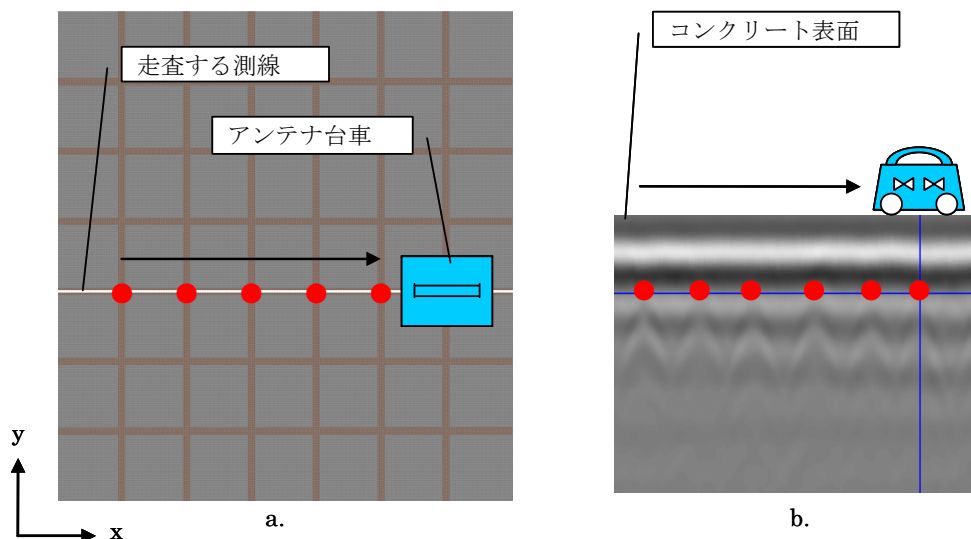
図 4-2-3 時間測定の概要

距離測定

供用されている鉄筋コンクリート構造物には、一般的に主筋とこれに直交する形で配力筋があり、これらの埋設された鉄筋を探索対象として反射波を取得し電磁波法を適用する。

測定は、電磁波レーダのアンテナ台車の移動に伴い測定区間内に存在する鉄筋等の埋設物が測定可能な距離測定機能を利用し、格子状に配筋された鉄筋位置を示すグリッドを石筆、チョークラインで描き、この上をアンテナ台車で走査して行う。距離測定の概要を図 4-2-4 に示す。

図 4-2-4 距離測定の概要



(3) 解析方法

時間測定

時間測定の解析は無筋コンクリート供試体と各鉄筋かぶり深さのコンクリート供試体の減算処理により振幅値及び、比誘電率を取得する。時間測定の解析概要を図 4-2-5 に示す。

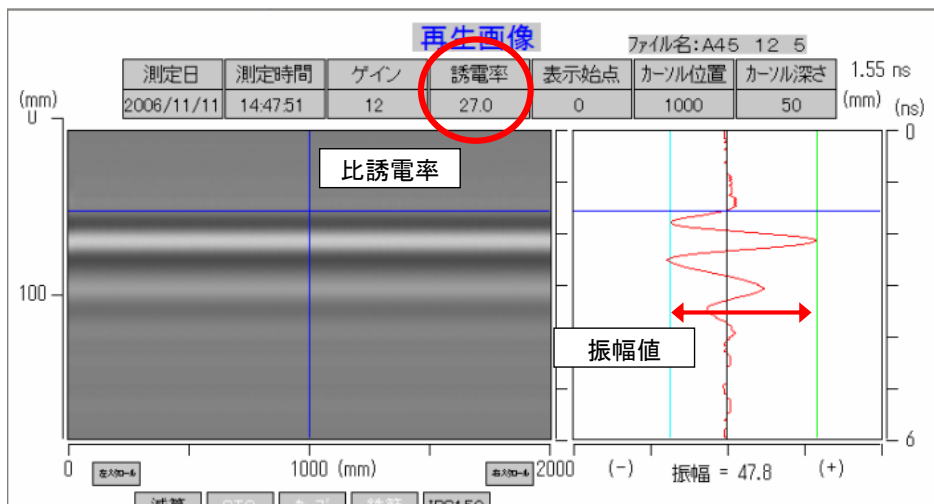


図 4-2-5 時間測定の解析概要

距離測定

図 4-2-6 に示す赤丸が鉄筋の位置になり、赤丸の間を無筋コンクリートとし、時間測定と同様に減算処理を行う。

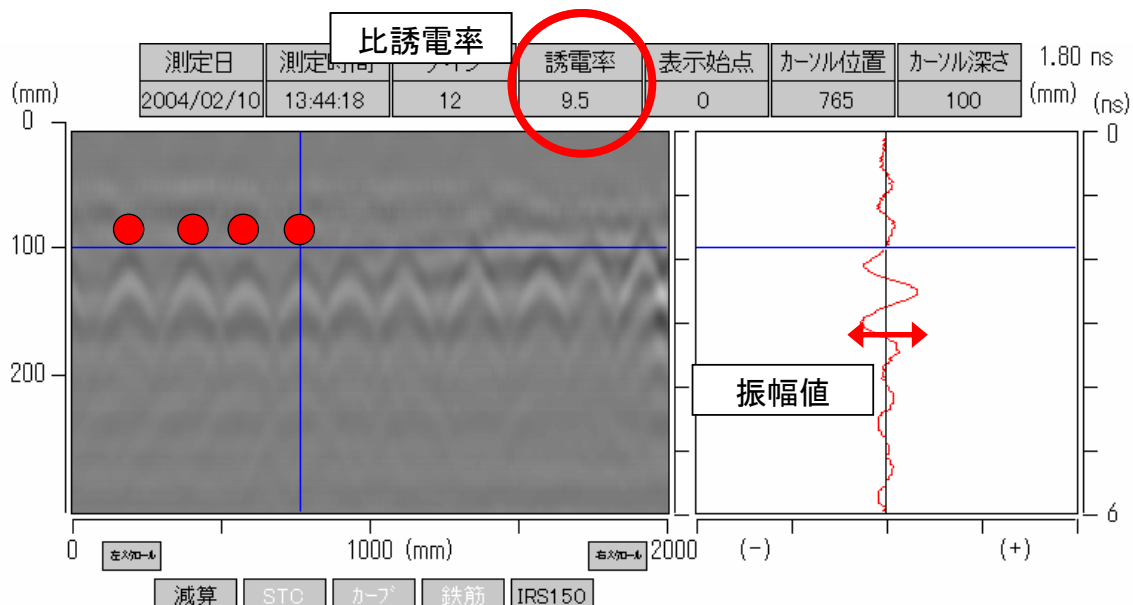


図 4-2-6 距離測定の解析画面

4.3 インピーダンス法

コンクリートに各深さに埋設した1対の銀電極間にシンセサイザーから交流電流を流し、周波数(MHz)を変化させ、コンクリート内部に流れる電流の大きさの変化を電圧差(実効値(mV))としてオシロスコープから読み取る方法で行う。実験装置を図4-3-1に示す。また表面は専用のアタッチメントを取り付け測定する。供試体の概要を写真4-3-1に、測定概要を写真4-3-2に示す。

<供試体概要>

- ①供試体の寸法は高さ30×幅40×長さ20cmで作製した。
- ②銀電極は表面から1, 2, 3, 4, 5, 7, 10cmの深さに埋め込んだ。コンクリート表面では専用のアタッチメントを置き測定した。(図4-3-7)
- ③入力電波波形は、振幅は2Vp-pとし、パワーアンプの利得(×10)、周波数36MHz~40MHzにおいて0.1MHz間隔で計測した。
- ④水セメント比の違いによる塩分評価を行うため、W/C=45%、55%、65%とした。
- ⑤スランプの違いによる塩分評価を行うため、5cm、12cm、21cmとした。しかし、電磁波法において、今年からはスランプを12cmのみとしたのでインピーダンス法についてもスランプは12cmのみとする。また、w/c=65%、スランプ21cmの供試体については電磁波法と同様に10%の塩化ナトリウム水溶液を浸漬させた。
- ⑥鉄板深さ、水セメント比、スランプを考慮し、合計9個の供試体を作製した。
- ⑦また、真水による浸漬を行うため、W/C=45%、55%、65%、スランプ5cm、12cm、21cmの合計9個の供試体を作製した。
- ⑧浸漬させる上面以外をシリコンシーラントで被覆し、塩化ナトリウム水溶液、もしくは真水を溜められるようアクリル板で囲った。アクリル板の厚さは3mm。

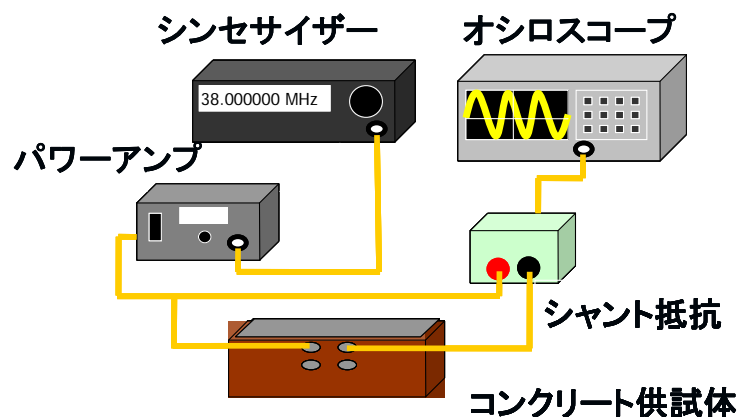


図 4-3-1 実験装置



写真 4-3-1 供試体概要



写真 4-3-2 測定概要

4.4 電位差滴定法

塩分分析は、J I S A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に規定されている「塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法」により全塩化物量を求める。さらに、J I S A 1154 付属書 2「硬化コンクリート中に含まれる温水抽出塩化物イオンの試験方法」に規定されている方法により抽出した可溶性の塩化物量についても電位差滴定法により求める。採取したコア（写真 4-4-1）は、写真 4-4-2 の電動カッターを用いてコアをスライスに切断した後（写真 4-4-3）、J I S A 1154 付属書 1「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン分析用試料の採取方法」に従って試料を作成し、それぞれ粉末試料 10 g ずつを電位差滴定試験装置にて全塩化物量試験及び温水抽出塩化物量試験に用いる。図 4-4-1 に試験結果の例を示す。



写真 4-4-1 採取したコア試料



写真 4-4-2 電動カッター



写真 4-4-3 スライスしたコア試料

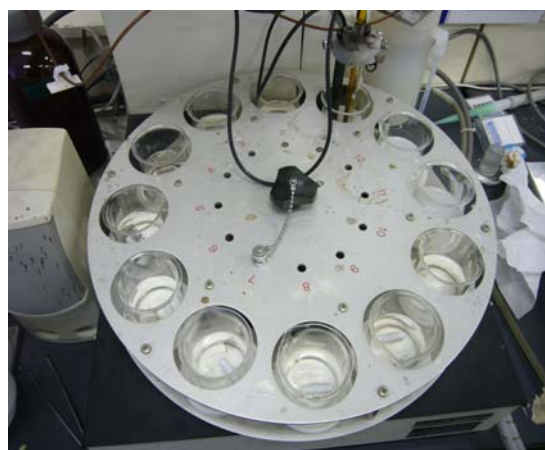


写真 4-4-4 電位差滴定試験

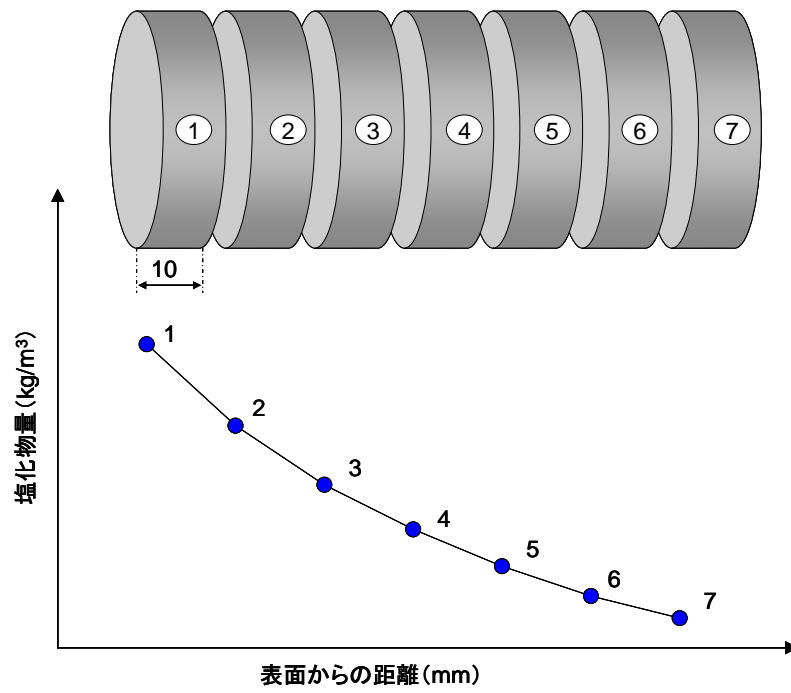


図 4-4-1 試験結果概要

第5章 電磁波法の試験結果（比誘電率）

これまでの実験では、そのほとんどがコンクリートの練混ぜ時に塩化ナトリウムを混入した供試体を用いて電磁波測定が行われてきた。しかし、実構造物においては、コンクリート打込み後に塩化物イオン量がコンクリート表面から浸透してくることとなる。そのため実構造物への適用に関しては、さらに多くの検討すべき課題があると考えられる。そこで本実験では、実構造物に近い条件で塩化物イオン量を浸漬させた供試体を用いて電磁波測定を行った。そして、解析によって得られた比誘電率、振幅値から比較・検討を行った。

5.1 かぶり別による比較

かぶり深さ別の経時変化を図 5-1-1 から図 5-1-3 に示す。

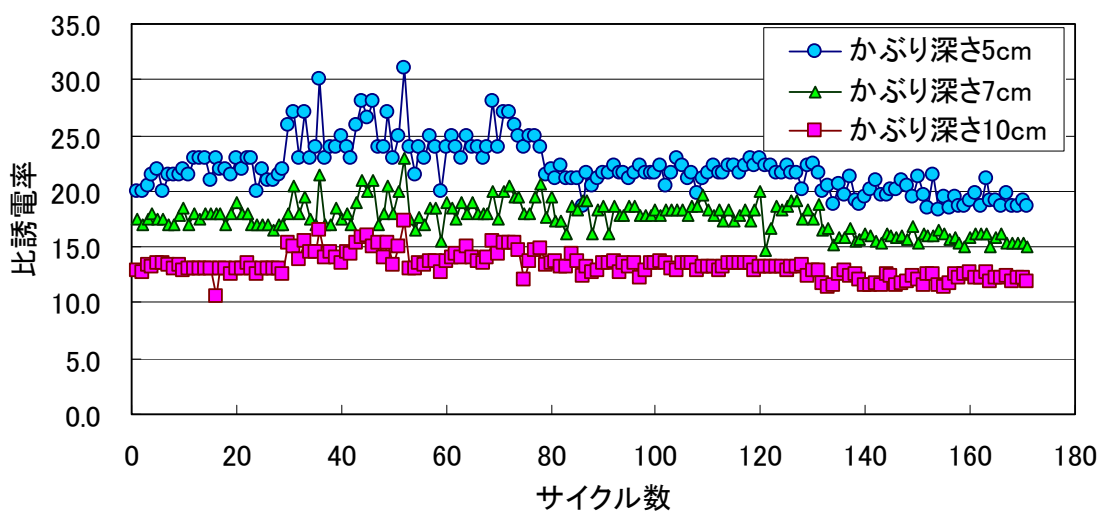


図 5-1-1 かぶり深さ別比誘電率の経時変化(W/C45%,スランプ 12cm)

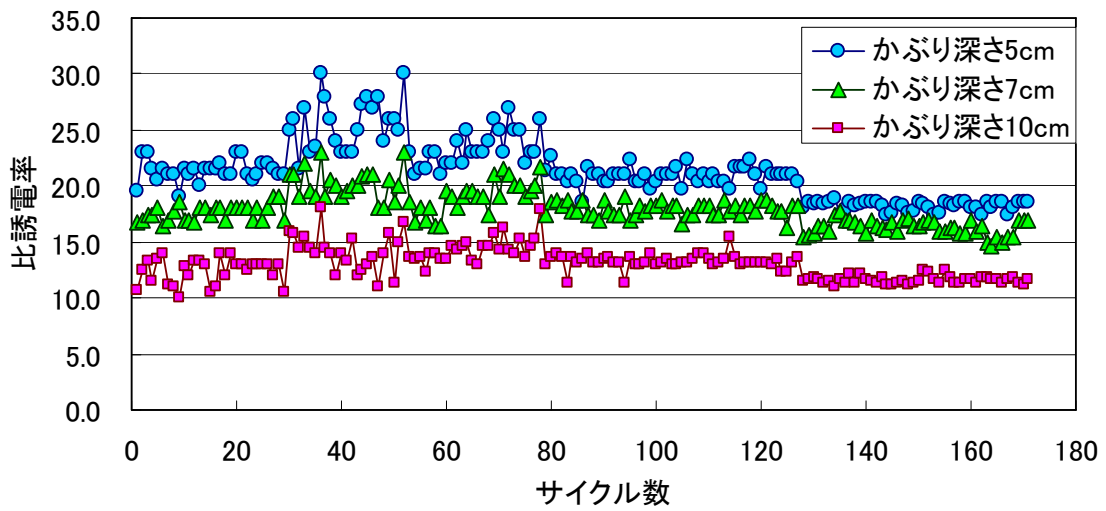


図 5-1-2 かぶり深さ別比誘電率の経時変化(W/C55%,スランプ 12cm)

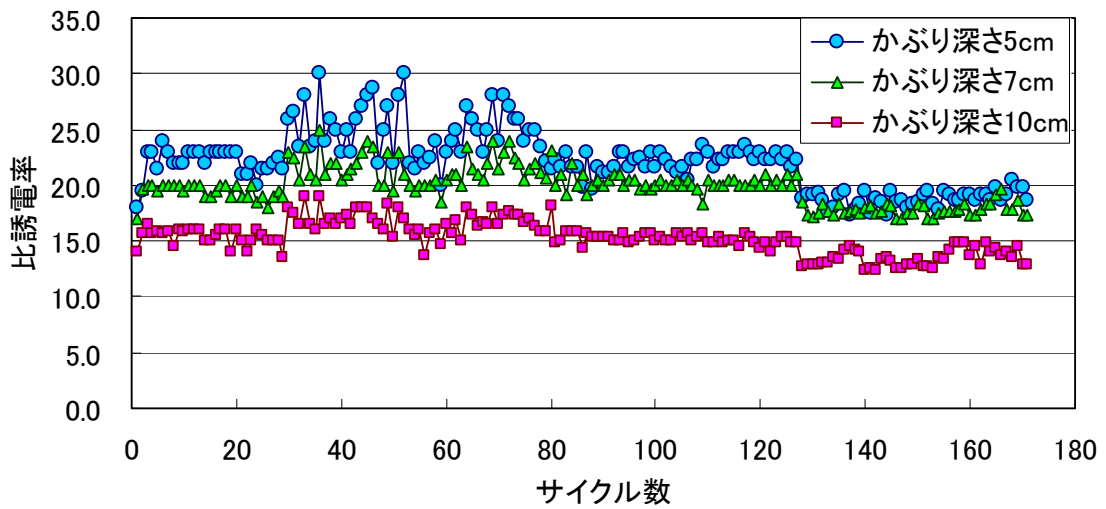


図 5-1-3 かぶり深さ別比誘電率の経時変化(W/C65%,スランプ 12cm)

5.2 水セメント比別による比較

水セメント比別の経時変化を図 5-2-1 から図 5-2-3 に示す。

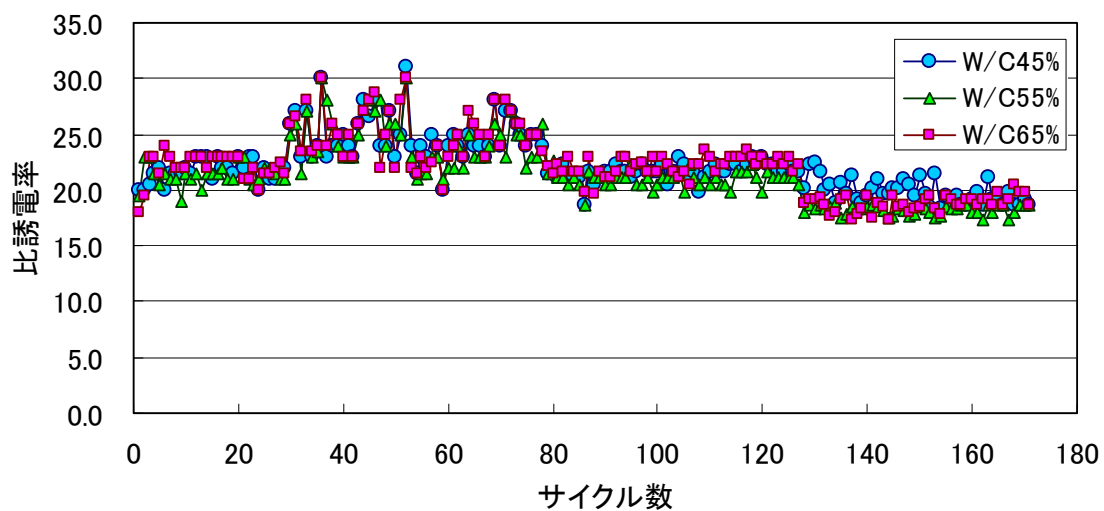


図 5-2-1 W/C 別比誘電率の経時変化(かぶり 5cm,スランプ 12cm)

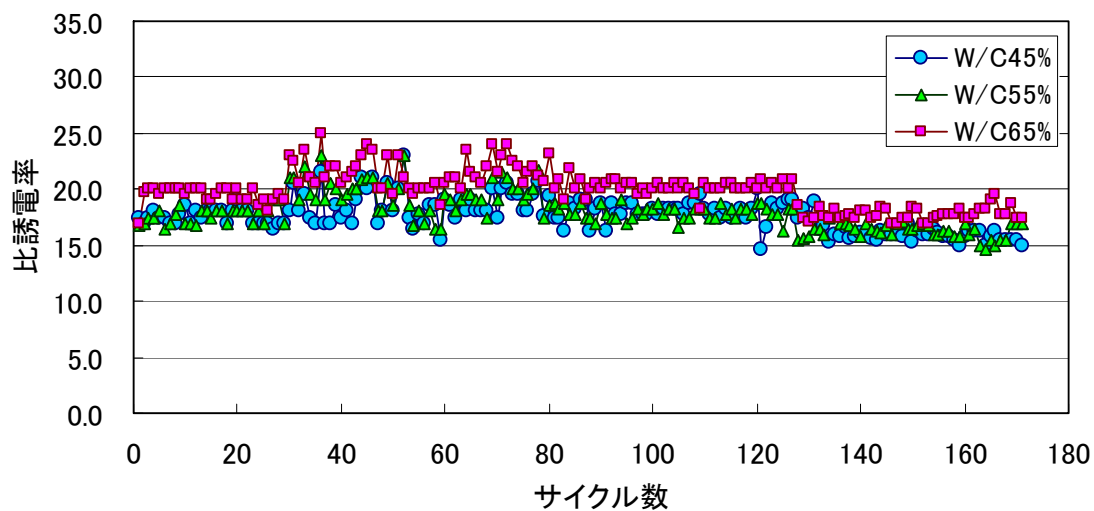


図 5-2-2 W/C 別比誘電率の経時変化(かぶり 7cm,スランプ 12cm)

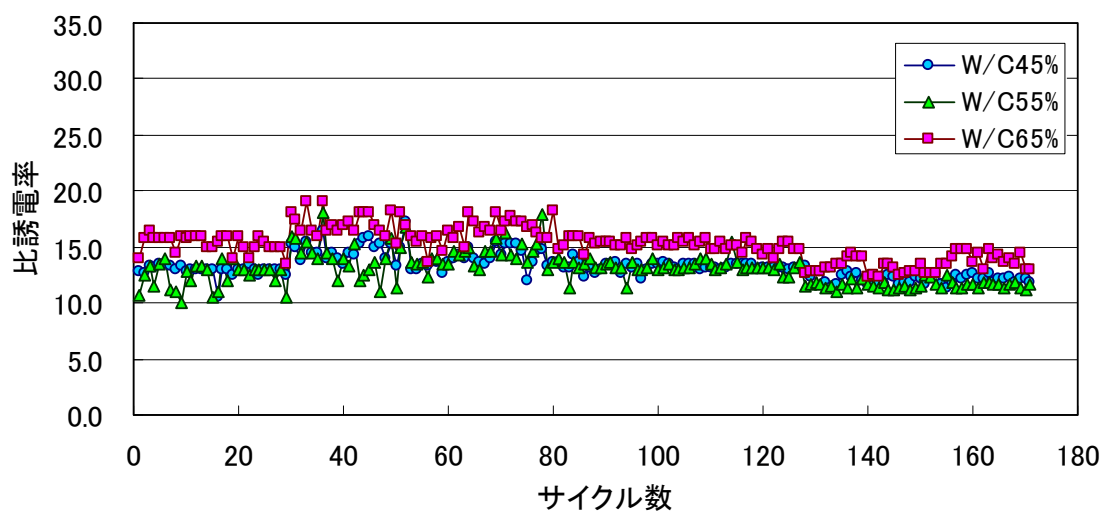


図 5-2-3 W/C 別比誘電率の経時変化(かぶり 10cm,スランプ 12cm)

5.3 浸漬水の濃度別による比較

浸漬水の濃度別の経時変化を図 5-3-1 から図 5-3-3 に示す。

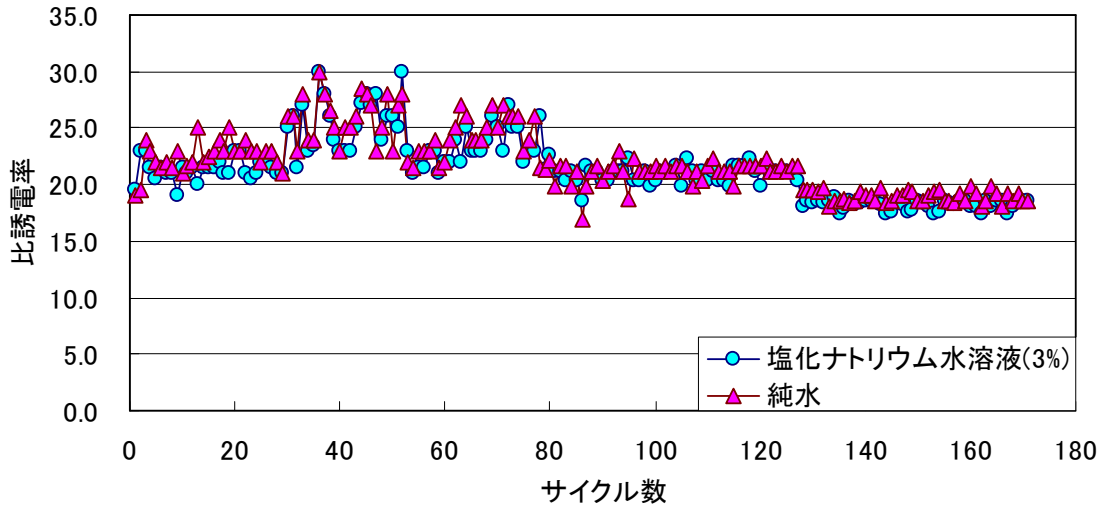


図 5-3-1 浸漬水の濃度別比誘電率の経時変化(かぶり 5cm,スランプ 12cm)

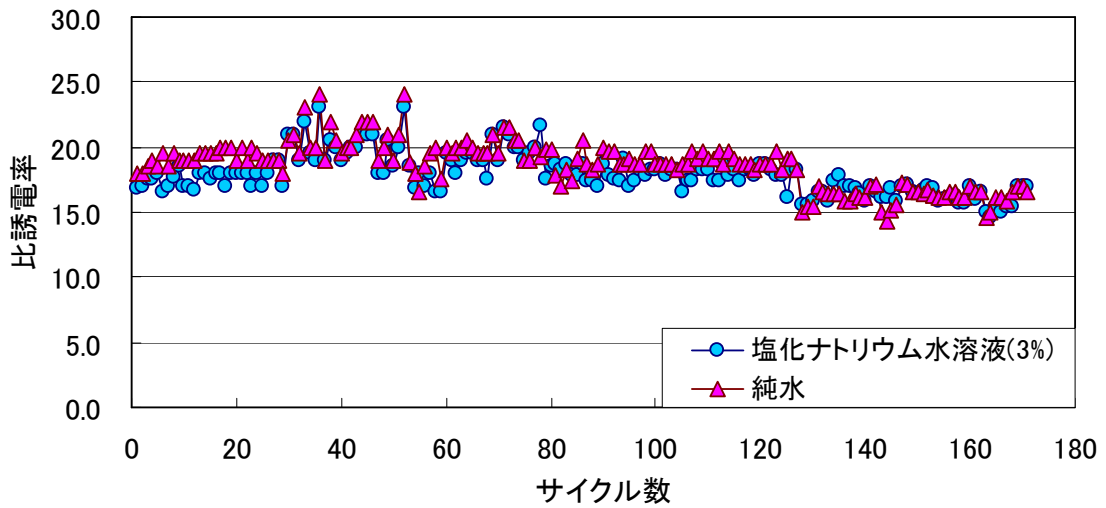


図 5-3-2 浸漬水の濃度別比誘電率の経時変化(かぶり 7cm,スランプ 12cm)

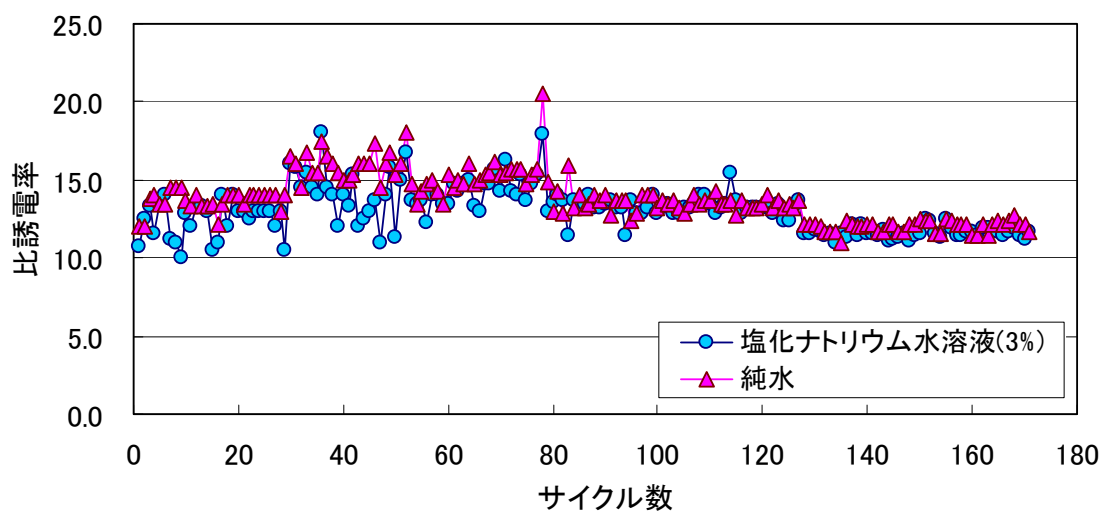


図 5-3-3 浸漬水の濃度別比誘電率の経時変化(かぶり 10cm,スランプ 12cm)

5.4 考察

図 5-1-1,図 5-1-2,図 5-1-3 から,一部測定値にばらつきがみられるがサイクル数に伴って,ほぼ一定の傾向を示した. また, かぶり深さが大きいほど低い値を示すことがわかる. これは, コンクリート内部の含水率の分布が影響しているものと思われる. 比誘電率は含水状態の影響を受けられるが, 湿潤,乾燥を毎回繰り返している供試体では測定時の含水状態はほぼ同じであると考えられる. よって理論上では大きな変化は見られないと考えられ,実験結果もそれを示している. また,解析の際に目視により決定される要素があり,人為的な誤差が生じたため,ばらつきがある結果となったと考えられる.

図 5-2-1,図 5-2-2,図 5-2-3 から,比誘電率は W/C による影響がほとんど無いと考えられる.

図 5-3-1,図 5-3-2,図 5-3-3 から,どの W/C においてもほぼ同等の値を示している. これは,比誘電率は普通ポルトランドセメントにおいてセメント量は関係がないということを示していると考えられる.

第6章 電磁波法の試験結果（振幅値）

6.1 かぶり別による比較

かぶり深さ別の経時変化を図 6-1-1 から図 6-1-3 に示す。

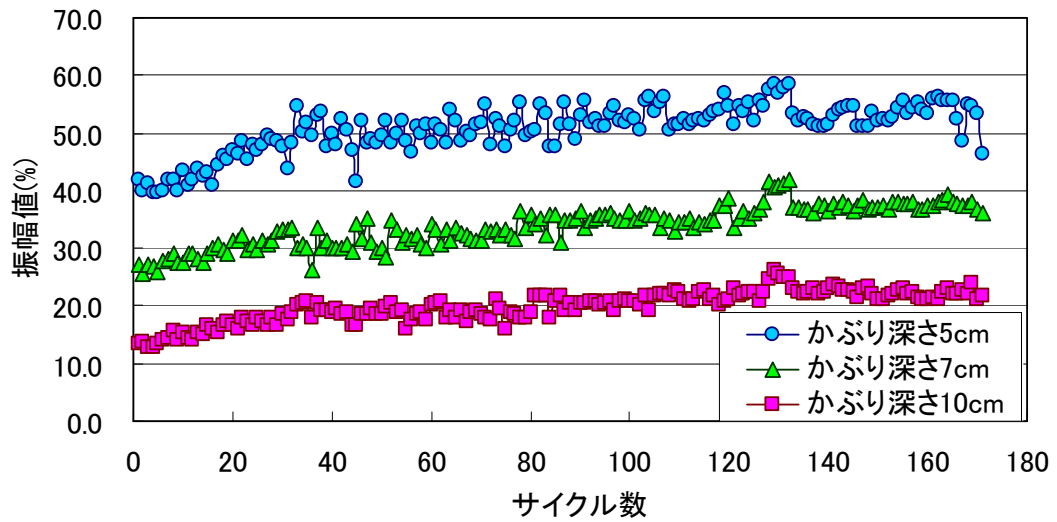


図 6-1-1 かぶり深さ別振幅値の経時変化(W/C45%,スランプ 12cm)

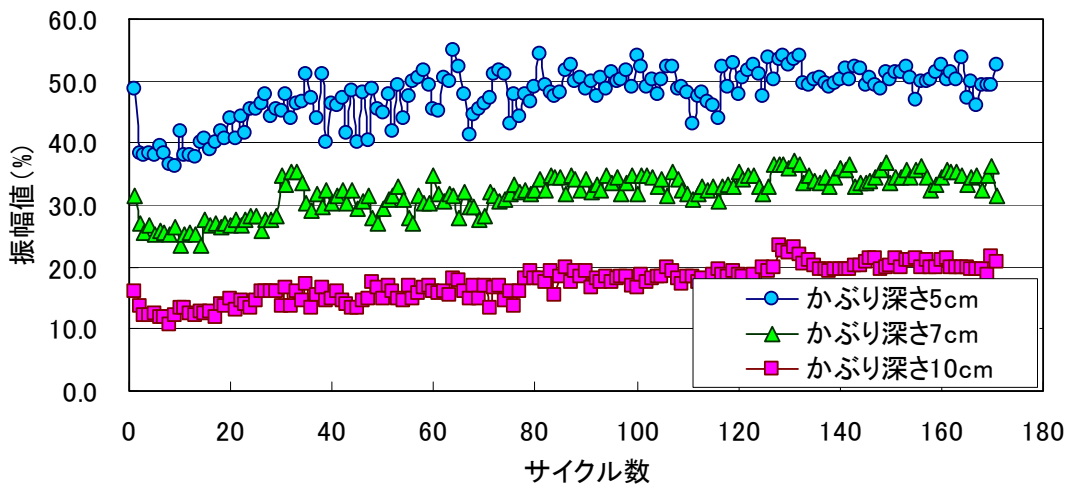


図 6-1-2 かぶり深さ別振幅値の経時変化(W/C55%,スランプ 12cm)

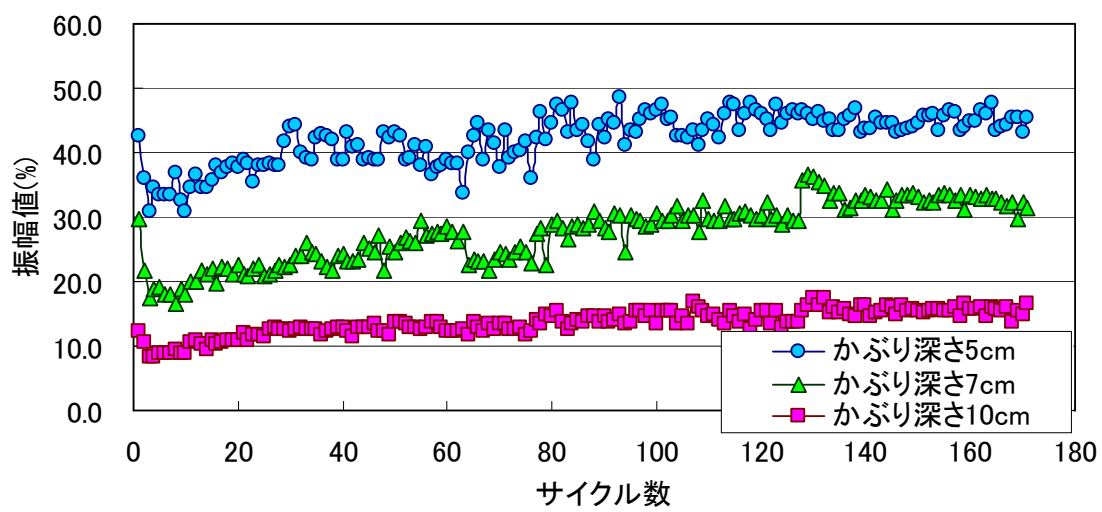


図 6-1-3 かぶり深さ別振幅値の経時変化(W/C65%,スランプ 12cm)

6.2 水セメント比別による比較

水セメント比別の経時変化を図 6-2-1 から図 6-2-3 に示す。

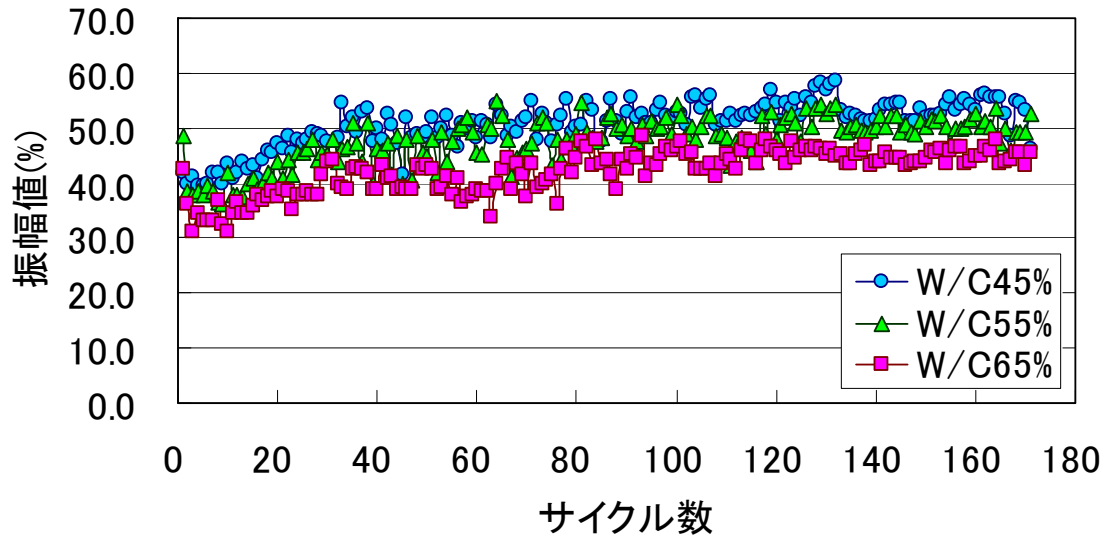


図 6-2-1 W/C 別振幅値の経時変化(かぶり深さ 5cm,スランプ 12cm)

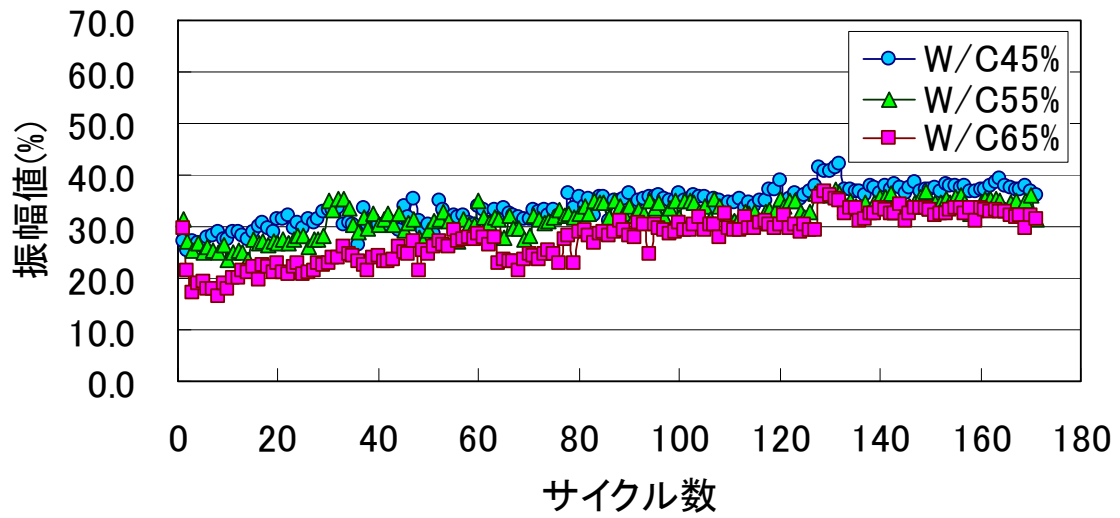


図 6-2-2 W/C 別振幅値の経時変化(かぶり深さ 7cm,スランプ 12cm)

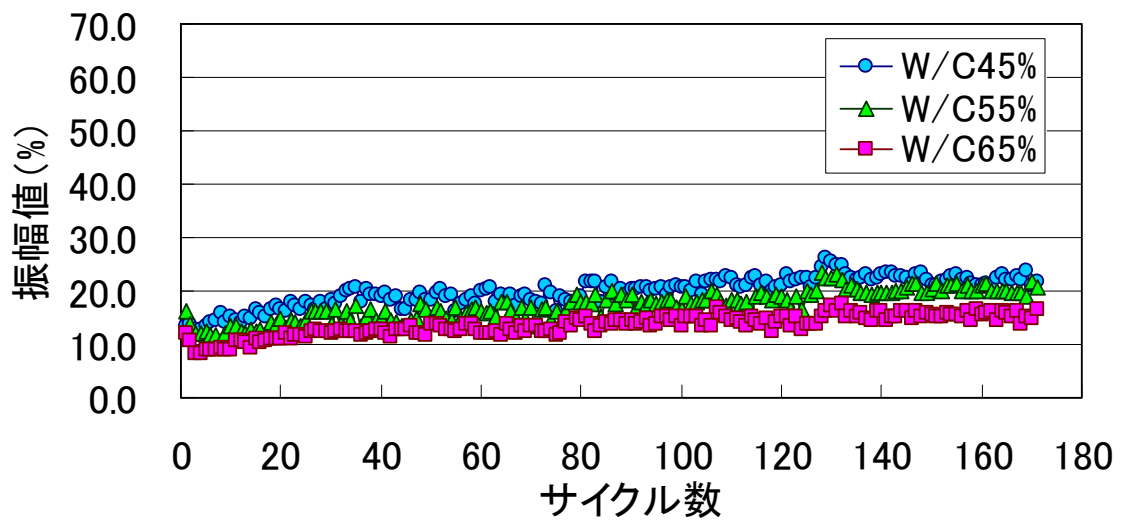


図 6-2-3 W/C 別振幅値の経時変化(かぶり深さ 10cm,スランプ 12cm)

6.3 浸漬水の濃度別による比較

浸漬水の濃度別の経時変化を図 6-3-1 から図 6-3-6 に示す。

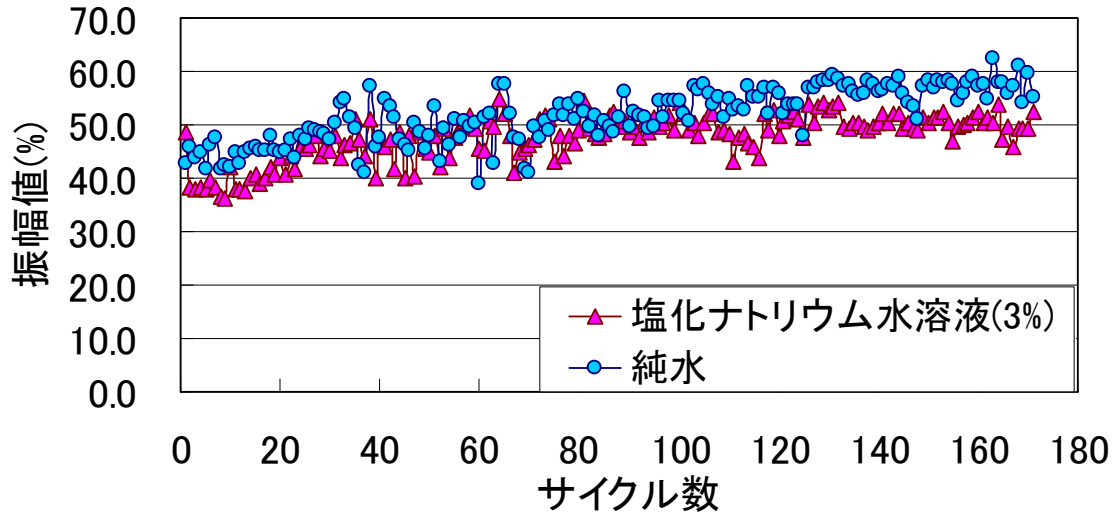


図 6-3-1 浸漬水の濃度別振幅値の経時変化(W/C=55%,かぶり深さ 5cm,スランプ 12cm)

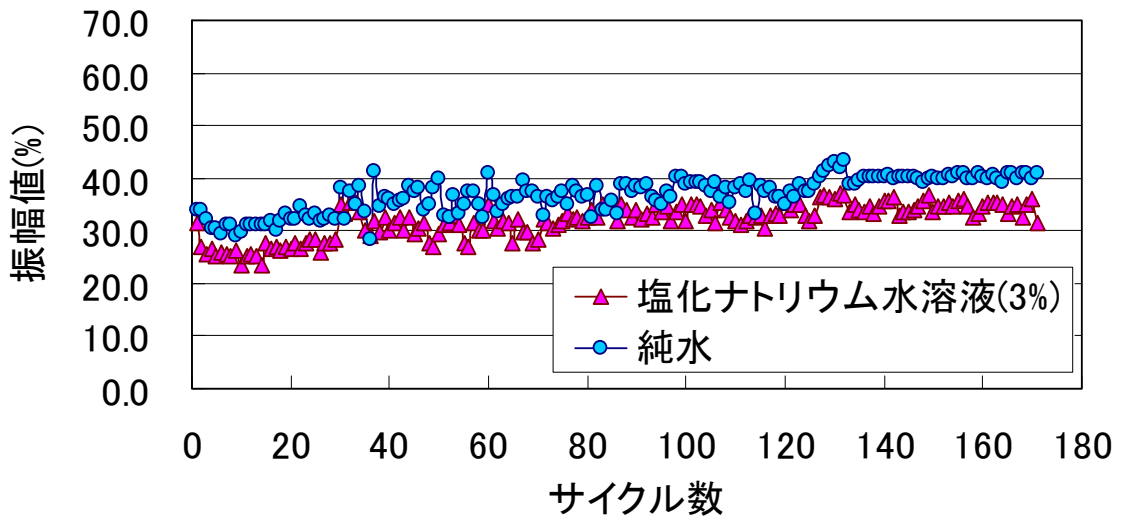


図 6-3-2 浸漬水の濃度別振幅値の経時変化(W/C=55%,かぶり深さ 7cm,スランプ 12cm)

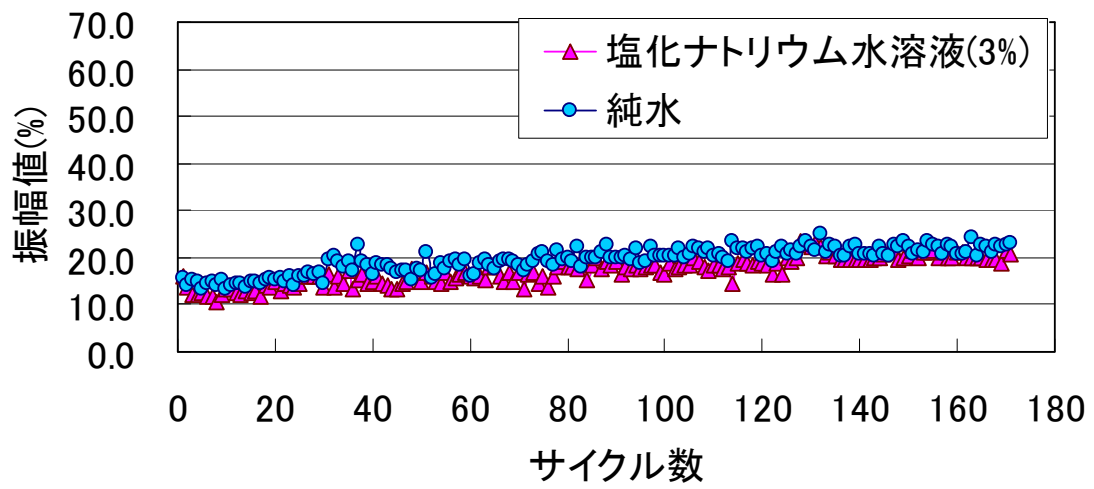


図 6-3-3 浸漬水の濃度別振幅値の経時変化(W/C=55%,かぶり深さ 7cm,スランプ 12cm)

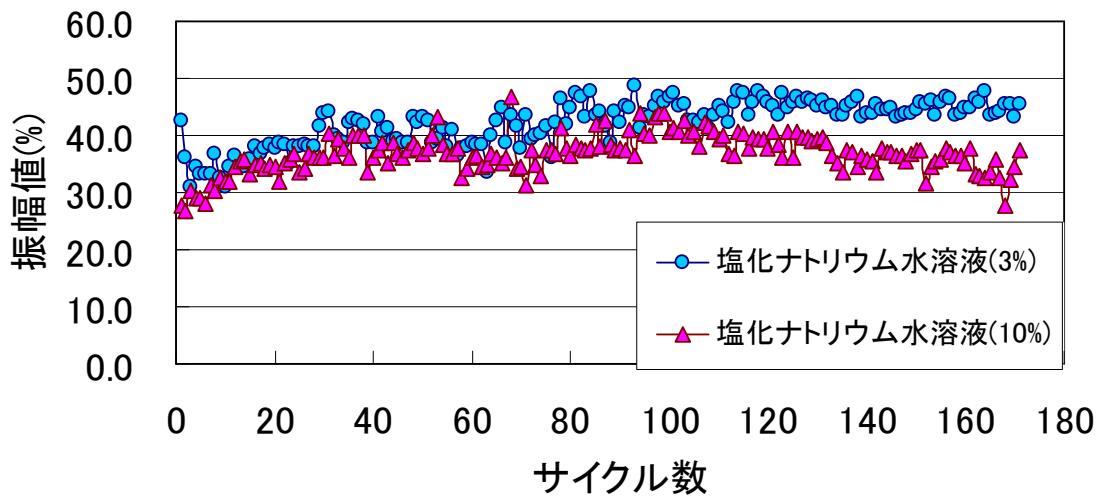


図 6-3-4 浸漬水の濃度別振幅値の経時変化(W/C=65%,かぶり深さ 5cm)

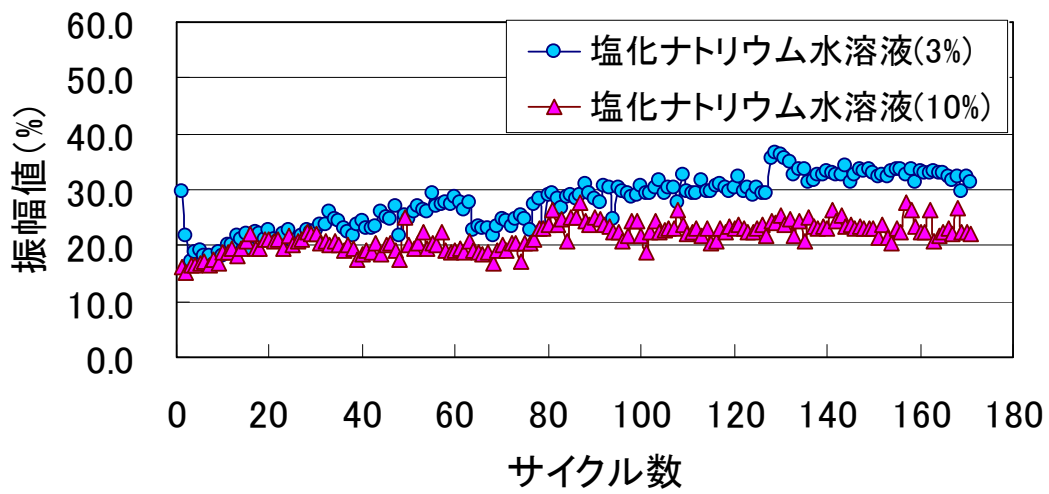


図 6-3-5 浸漬水の濃度別振幅値の経時変化(W/C=65%,かぶり深さ 7cm)

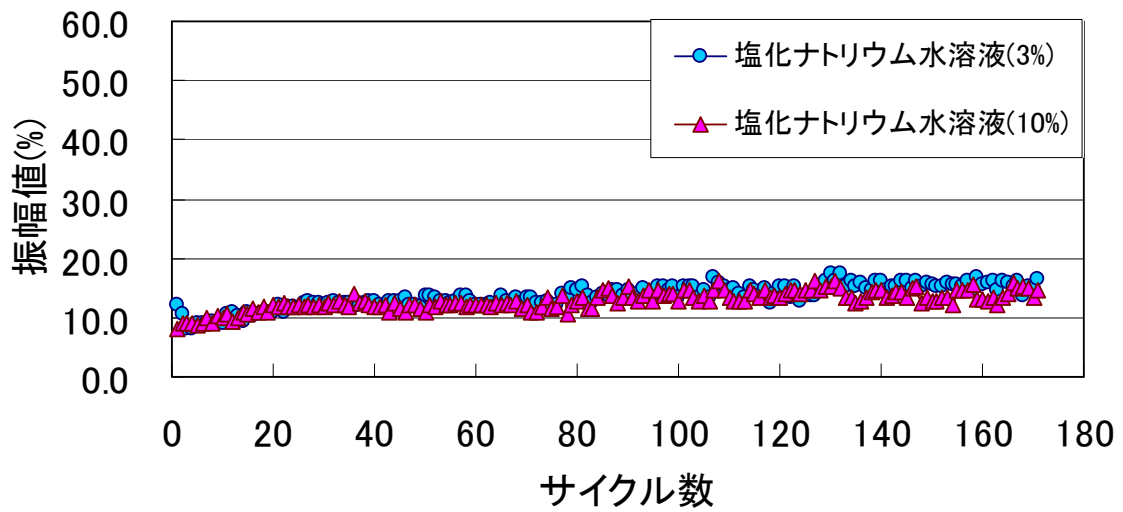


図 6-3-6 浸漬水の濃度別振幅値の経時変化(W/C=65%,かぶり深さ 10cm)

6.4 浸漬水の種類別による比較

浸漬水の種類別の経時変化を図 6-4-1 から図 6-4-3 に示す。

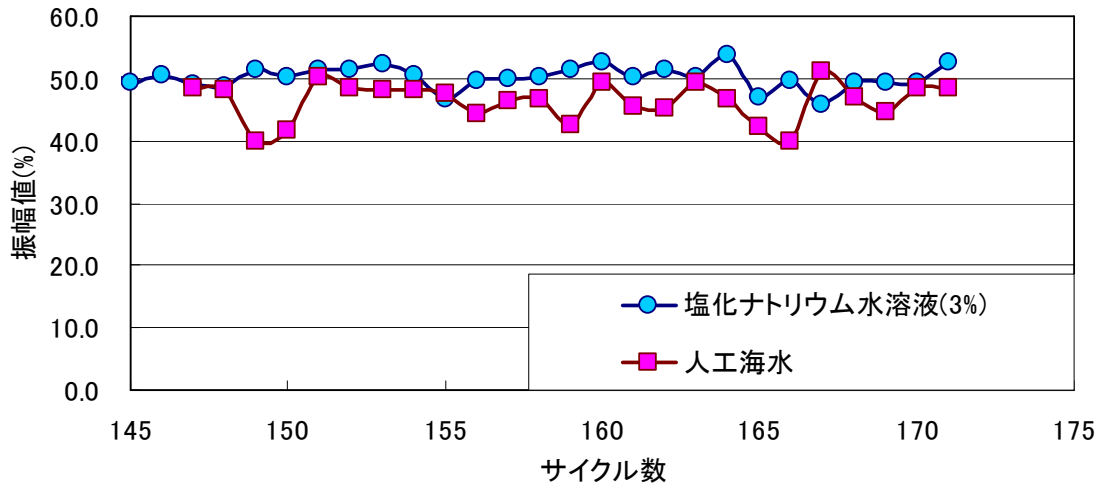


図 6-4-1 浸漬水の種類別振幅値の経時変化(W/C=55%,かぶり深さ 5cm)

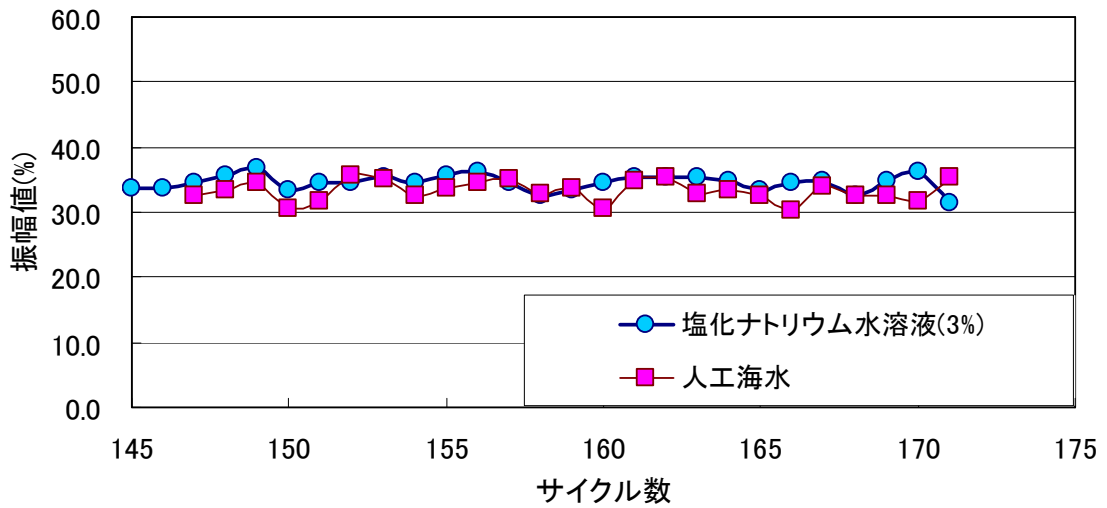


図 6-4-2 浸漬水の種類別振幅値の経時変化(W/C=55%,かぶり深さ 7cm)

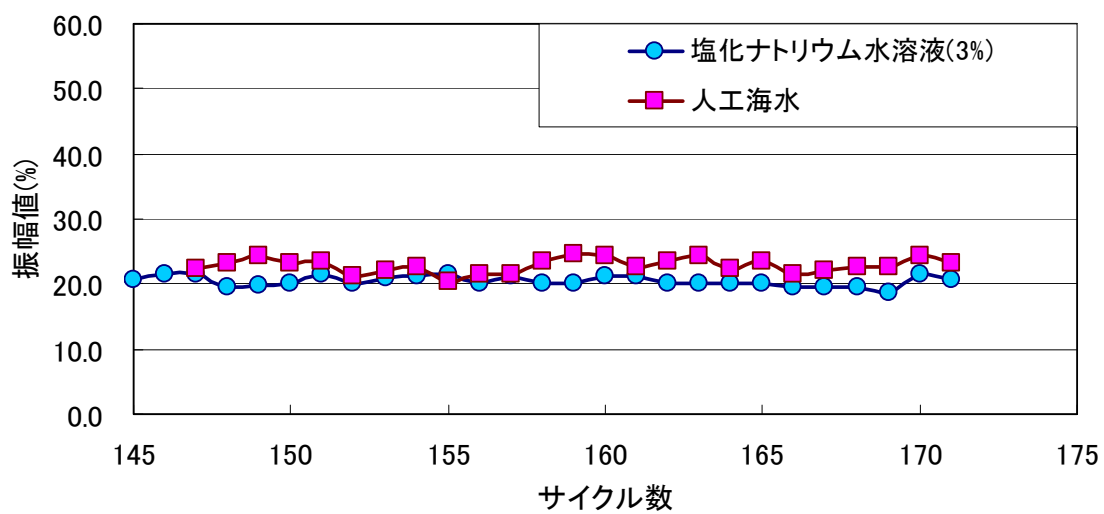


図 6-4-3 浸漬水の種類別振幅値の経時変化(W/C=55%,かぶり深さ 10cm)

6.5 考察

図 6-1-1,図 6-1-2,図 6-1-3 から, 振幅値はサイクル数の増加に伴って大きくなる傾向を示した。ただし, 40 サイクル以降は, 増加の割合が比較的小さくなる結果となった。これは, セメントの水和生成物が形成されてある程度緻密になったためにイオンの浸透速度(拡散)がほぼ一定になったためだと思われる。また, かぶり深いほど振幅値が低いことがわかる。これは電磁波の波が物質を通過した際にイオンにより減衰するため,かぶり深いほど振幅値が低いのだ考えられる。

図 6-2-1,図 6-2-2,図 6-2-3 から,W/C が低いほど振幅値が低いことがわかる。これは, 水セメント比が小さいほどコンクリートが緻密となり, 拡散係数が小さくなるためと思われる。また, かぶり深さが深い所では振幅値はほぼ同様の値を示した。これは,かぶり深さが深い所には塩素イオンが届いていないためだと考えられる。

図 6-3-1,図 6-3-2,図 6-3-3 から,3%濃度の塩化ナトリウム水溶液による浸漬に比べ純水による浸漬の方が高い値を示した。これは, 電磁波の振幅値には塩素イオンが大きく影響していることを示している。また,図 6-3-4,図 6-3-5,図 6-3-6 から,純水と濃度 3%の塩化ナトリウム水溶液の比較同様に濃度が高い浸漬水の方が高い値を示すという傾向を確認することができる。

図 6-4-1,図 6-4-2,図 6-4-3 から,本研究は電磁波の振幅が,コンクリート中における塩素イオンとその他のイオンにどれほどの影響を受けるかを調べるために行ったが,上記の結果からは差異が見られなかった。これによって, 電磁波の振幅値には塩素イオン以外のイオンによる影響は少なく, 塩素イオンの影響を強く受けることがわかる。

第7章 インピーダンス法の試験結果（浸漬水による比較）

本章では、それぞれの供試体に塩水または、真水を浸漬させ周波数の変化によってどのように実効値が変化するか、銀電極の深さ方向の違いによりどのように実効値が変化するかなどについて比較・検討を行った。

7.1 塩水および真水浸漬による実行値の比較

測定結果は次ページより示す。

- 水セメント比 45% 図 7-1-1, 図 7-1-2
- 水セメント比 55% 図 7-1-3, 図 7-1-4
- 水セメント比 65% 図 7-1-5, 図 7-1-6 にそれぞれ示す。

<水セメント比 45%>

・塩水浸漬

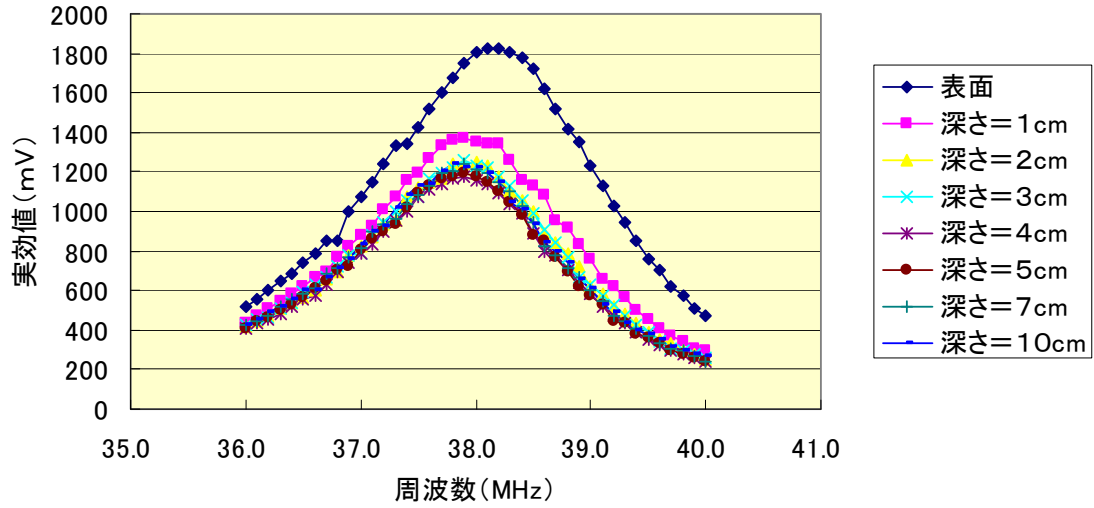


図 7-1-1 塩分浸漬における実効値変化

・真水浸漬

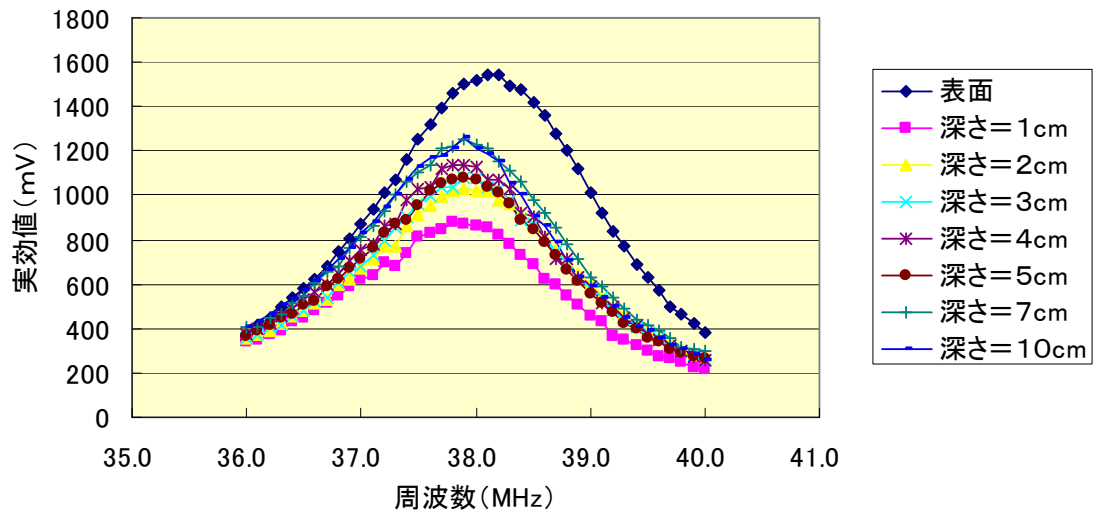


図 7-1-2 真水浸漬における実効値の変化

・塩水浸漬

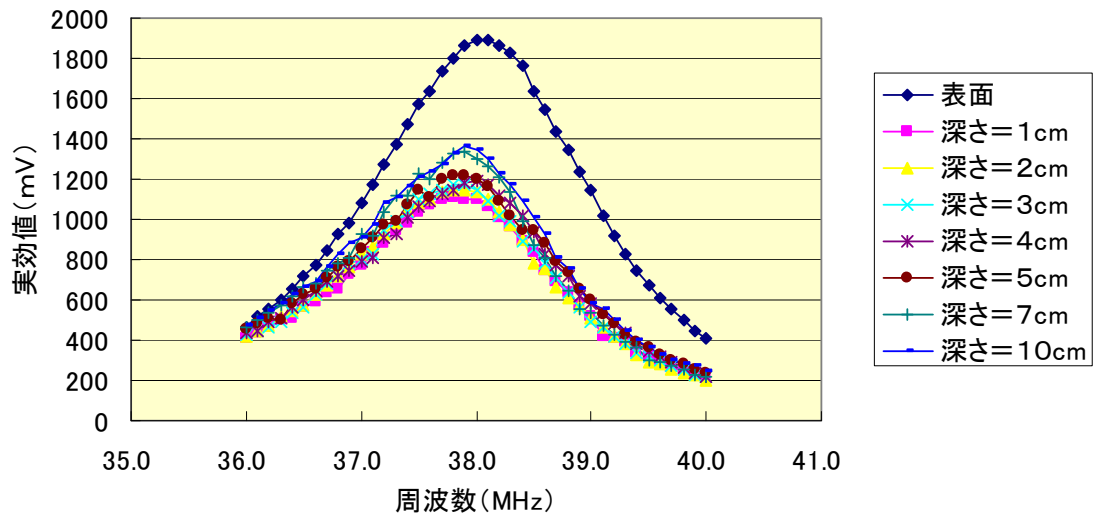


図 7-1-3 塩水浸漬における実効値の変化

・真水浸漬

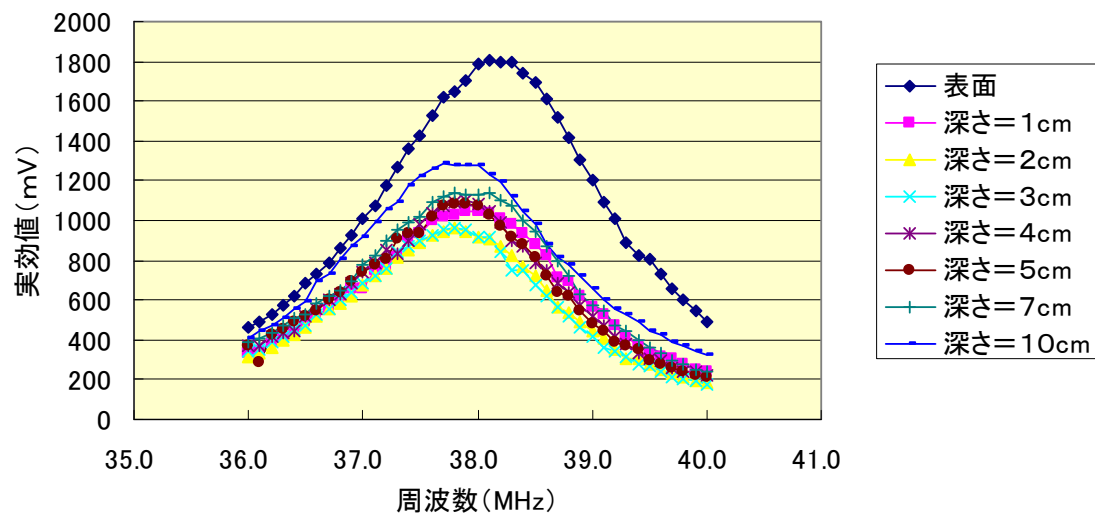


図 7-1-4 真水浸漬における実効値の変化

<水セメント比 55%>

・塩水浸漬

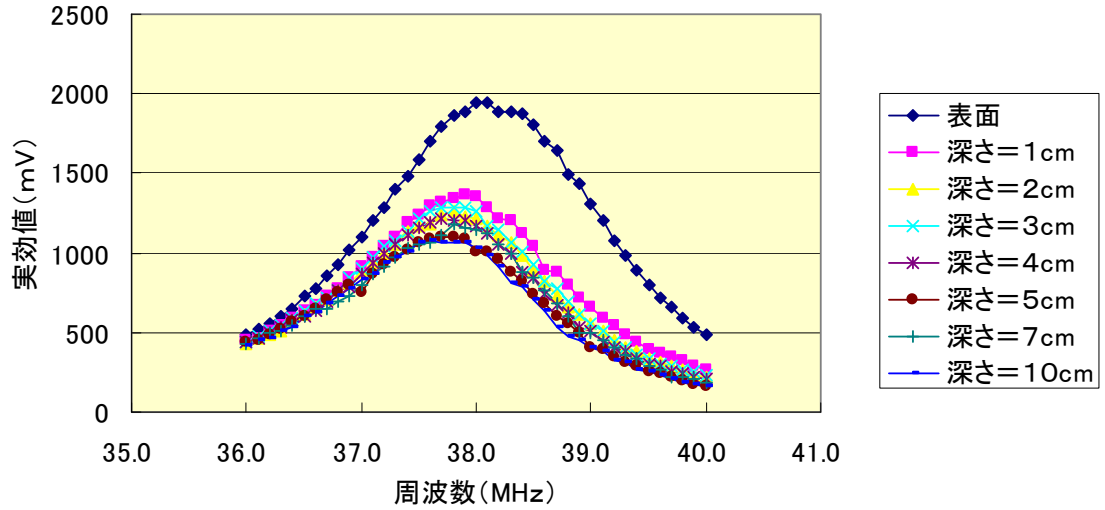


図 7-1-5 塩水浸漬における実効値の変化

・真水浸漬

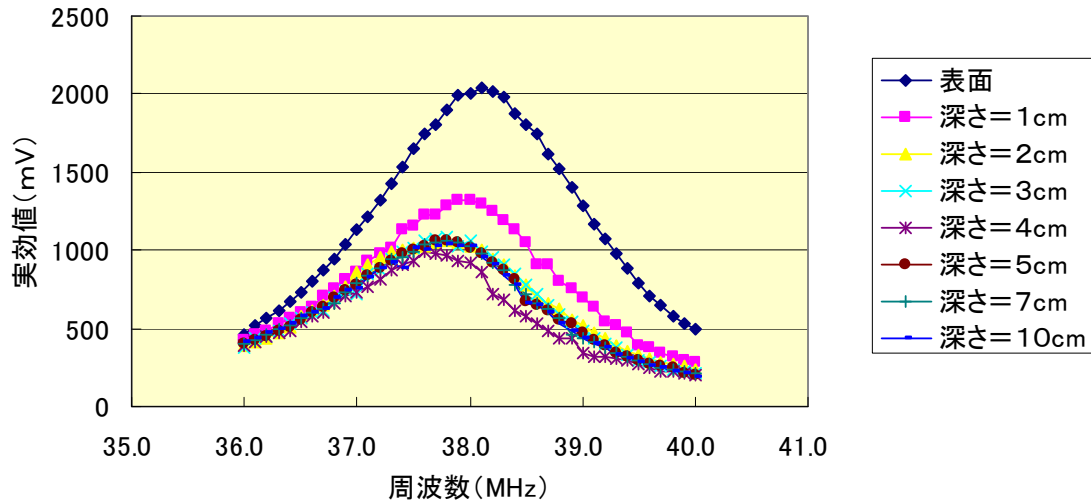


図 7-1-6 真水浸漬における実効値の変化

7.2 考察

実効値の変化を示す曲線は深さ方向について、あまり大きな差異は見られないが、かぶり深さ方向にともなって実効値が小さくなる傾向にある。これは、水分浸透が実効値に影響を与えていると考えられる。また、表面の実効値測定に関して、実効値が水分の影響を非常に受けやすいということや、毎回の測定ごとで表面の状態が一定でなかったことなどから、数値がバラついてしまいはっきりとした傾向をつかむことは困難であった。最大実効値を示す周波数については、38MHz 付近に収まっていたが、徐々に最大実効値が遅れて計測される傾向にあった。

また、どの水セメント比においても真水浸漬については深さごとに実効値の変化が顕著にみえたが、塩分浸漬においては、同程度の実効値を示す傾向にある。この要因は、塩化物イオンの浸漬による影響がでていると考えられる。

第 8 章 インピーダンス法の試験結果（各条件別の比較）

以下に各条件別の比較および経時変化を示す。

測定結果は次ページより示す。

- 水セメント比毎の比較 図 8-1-1～図 8-1-8
- 深さ方向についての実効値変化 図 8-2-1～図 8-2-2
- 塩分浸漬と真水浸漬の比較 図 8-3-1～図 8-3-24

8.1 水セメント比毎の影響

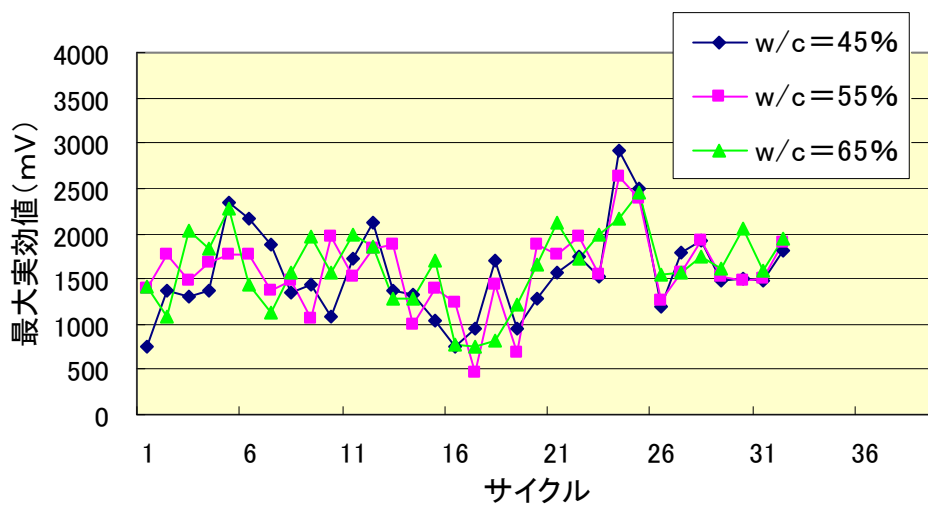


図 8-1-1 水セメント比ごとの比較 (表面)

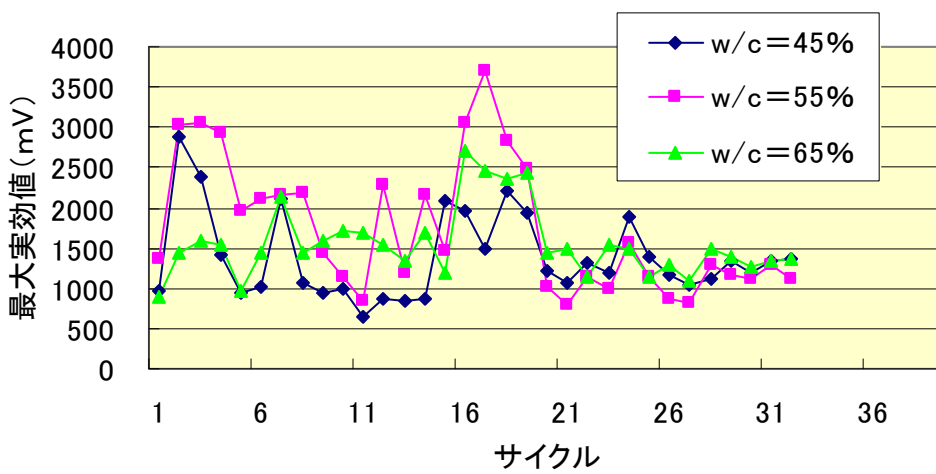


図 8-1-2 水セメント比ごとの比較 (1 cm)

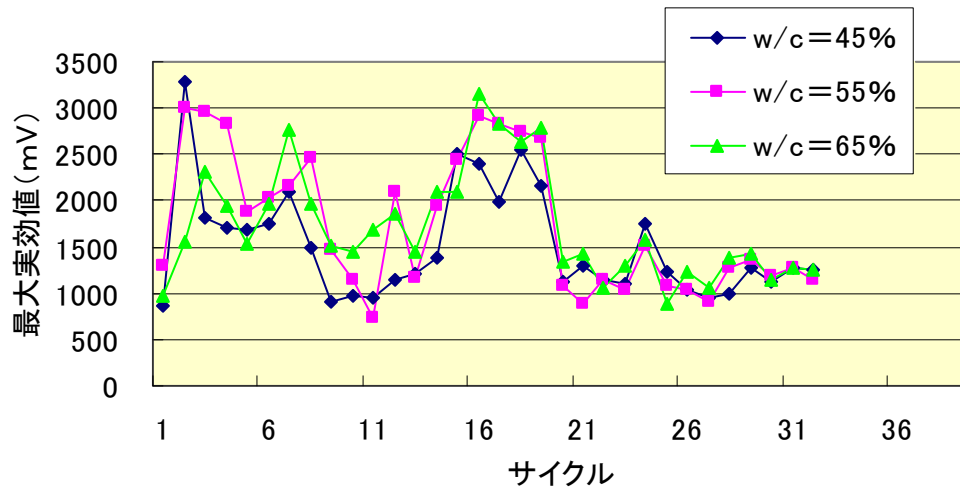


図 8-1-3 水セメント比毎の比較 (2 cm)

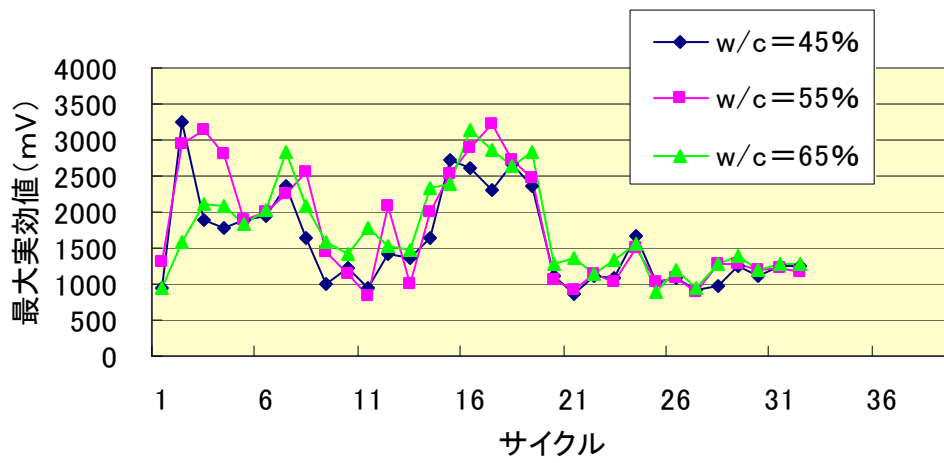


図 8-1-4 水セメント比毎の比較 (3 cm)

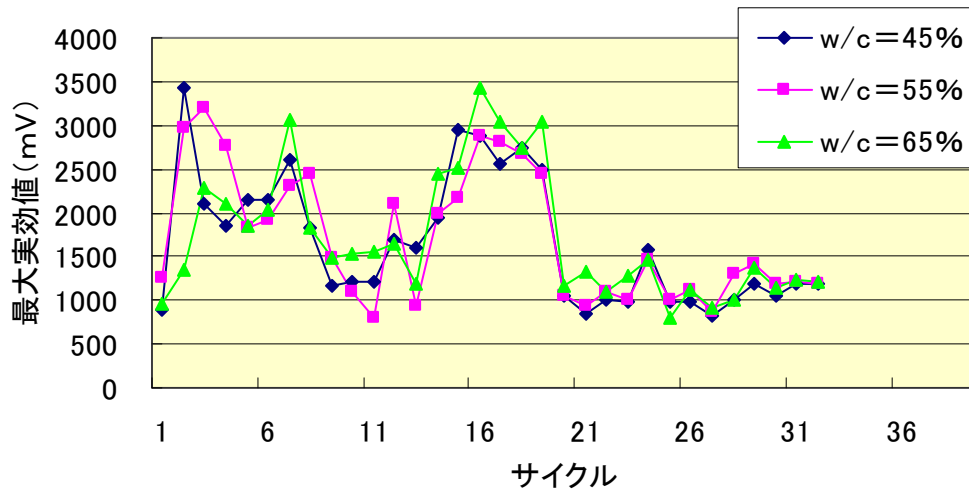


図 8-1-5 水セメント比毎の比較 (4 cm)

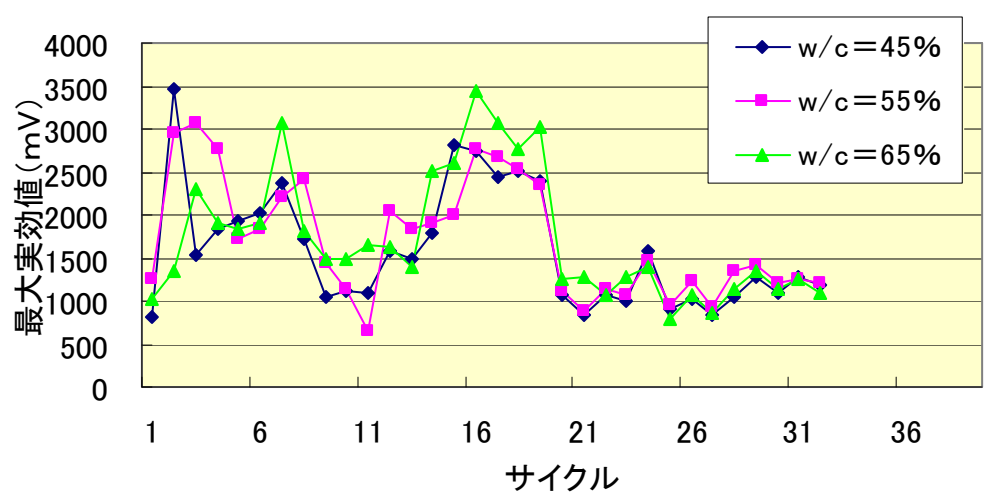


図 8-1-6 水セメント比毎の比較 (5 cm)

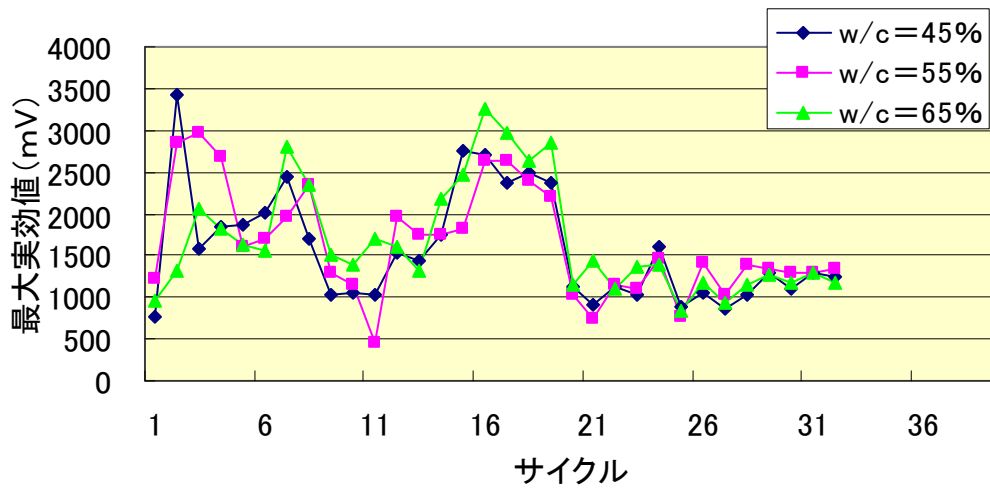


図 8-1-7 水セメント比毎の比較 (7 cm)

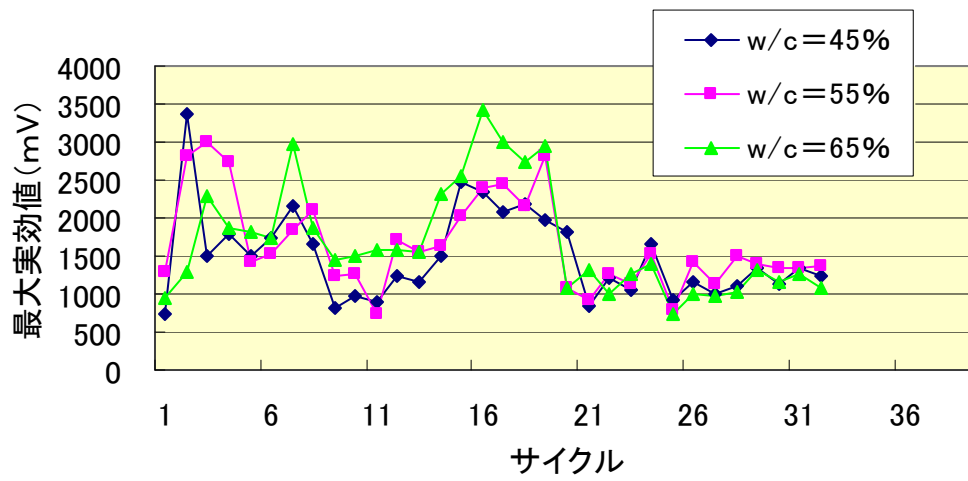


図 8-1-8 水セメント比毎の比較 (10 cm)

8.2 深さ方向の最大実効値の変化

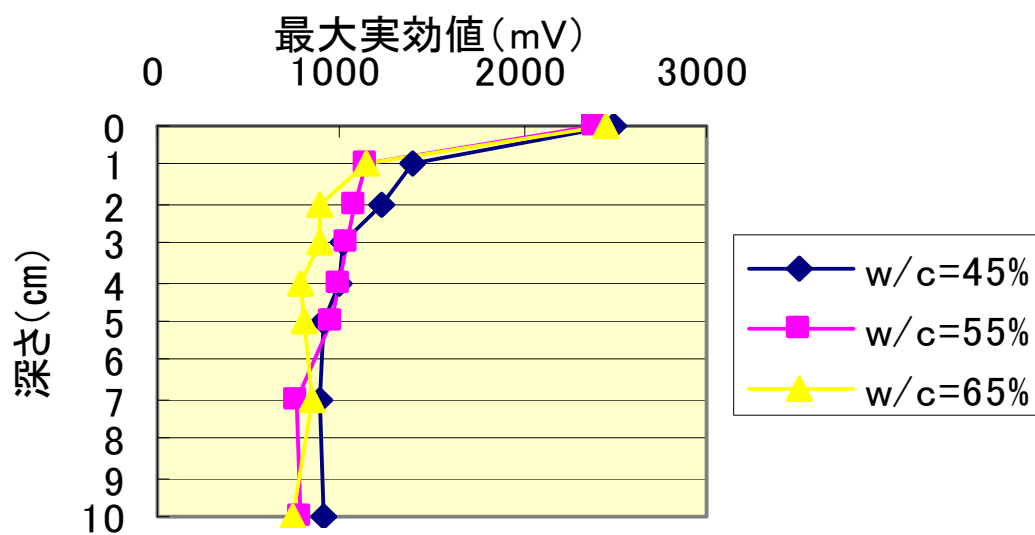


図 8-2-1 深さ方向についての実効値の変化

8.3 塩分浸漬と真水浸漬の比較

<水セメント比 45%>

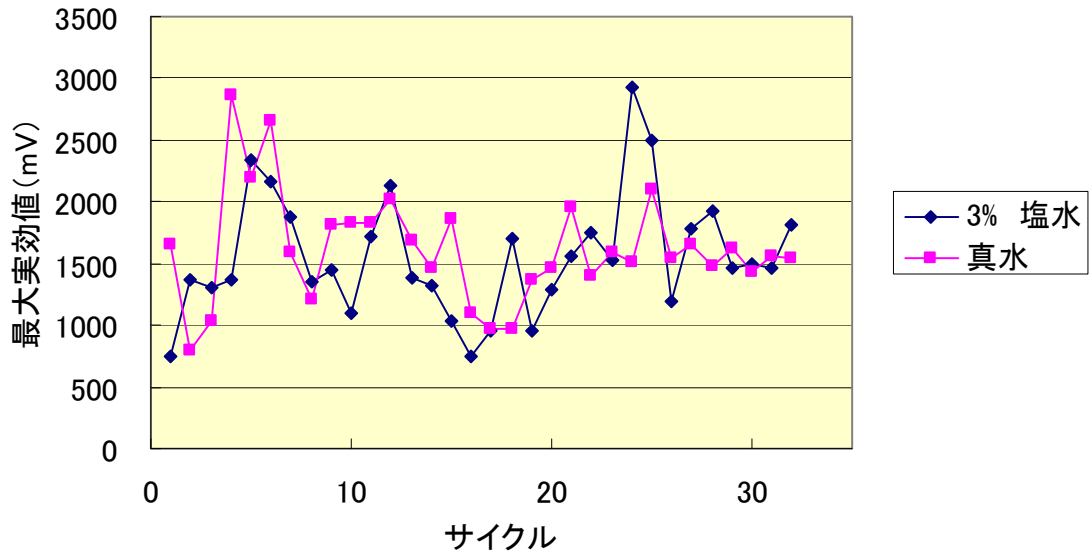


図 8-3-1 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (表面)

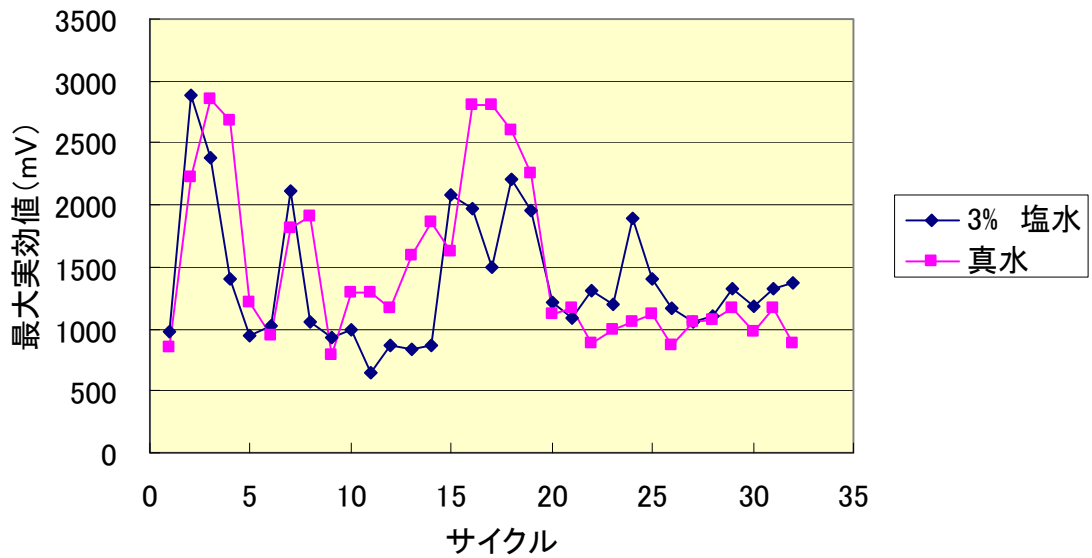


図 8-3-2 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (1 cm)

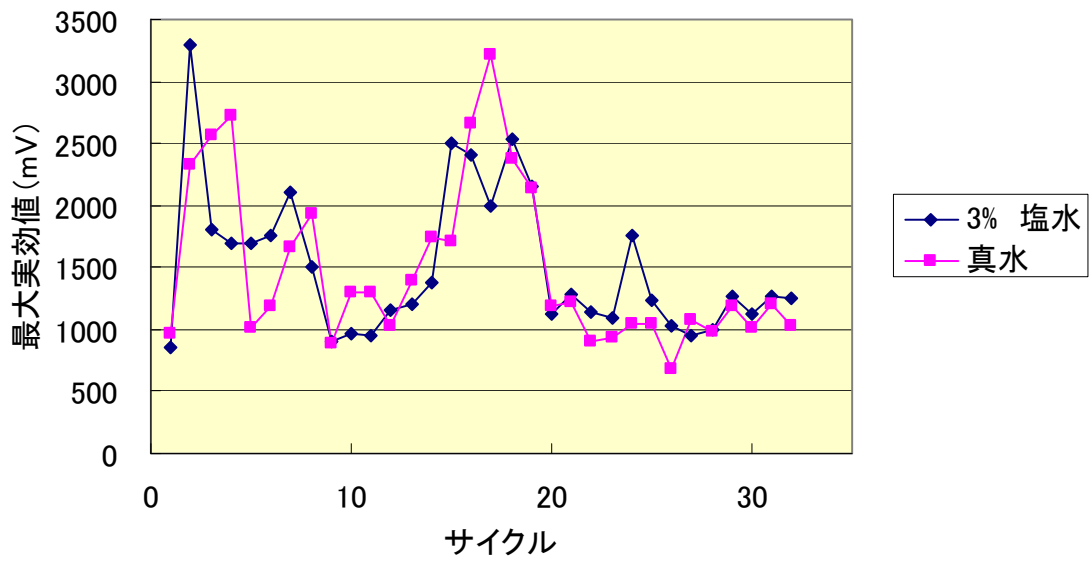


図 8-3-3 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (2 cm)

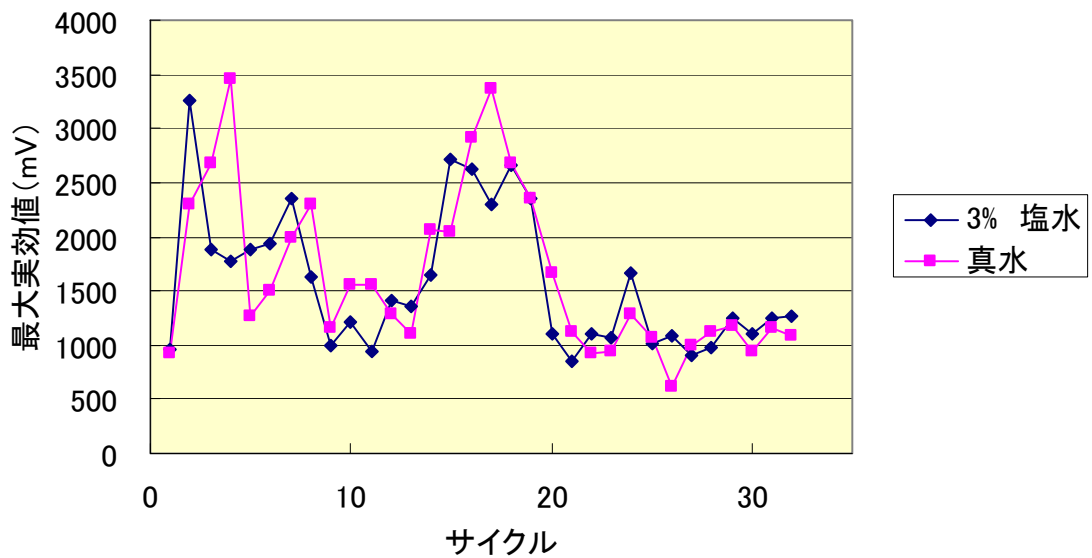


図 8-3-4 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (3 cm)

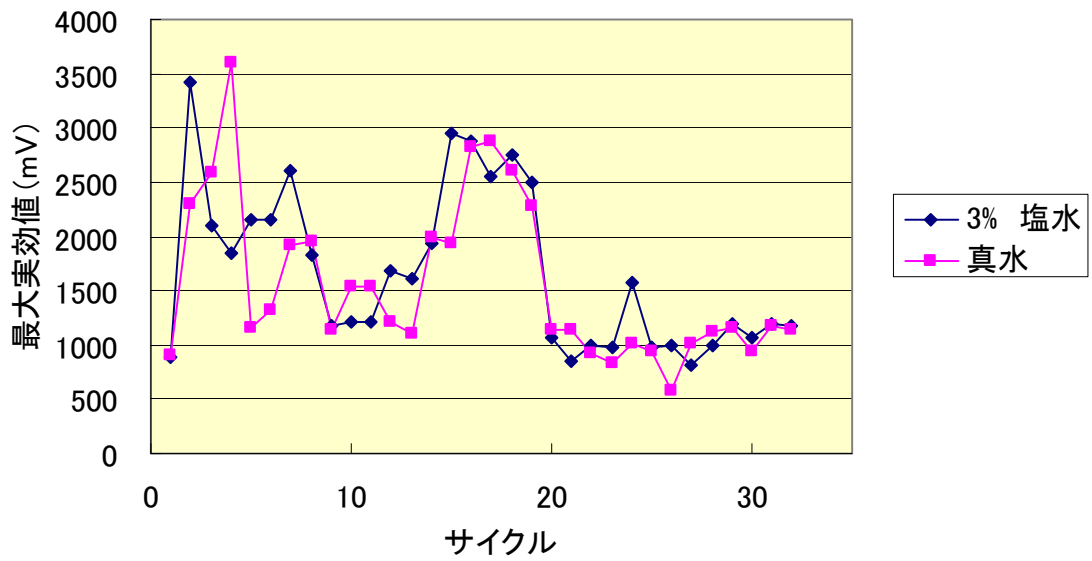


図 8-3-5 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (4 cm)

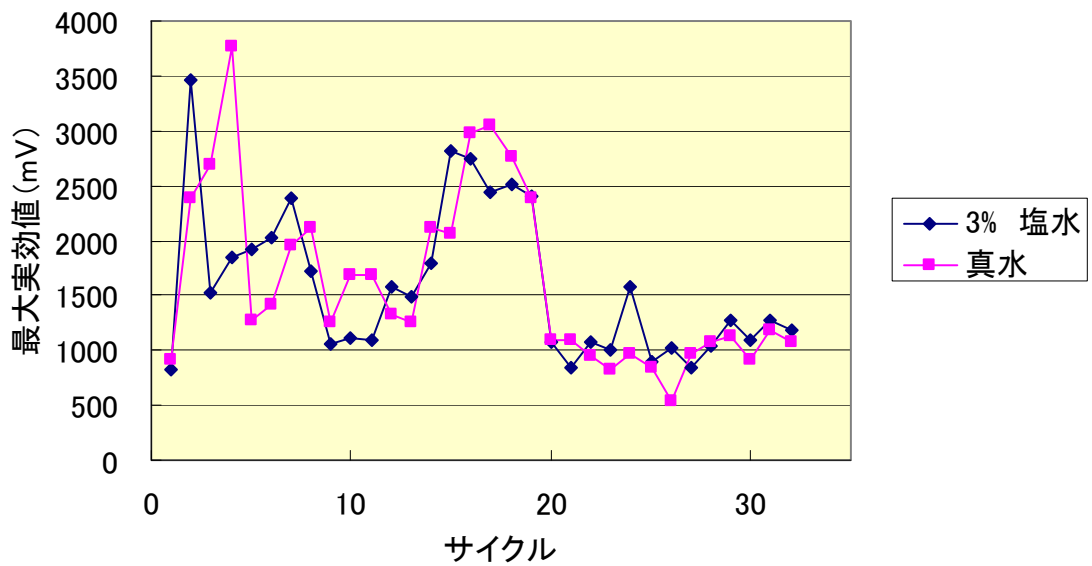


図 8-3-6 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (5 cm)

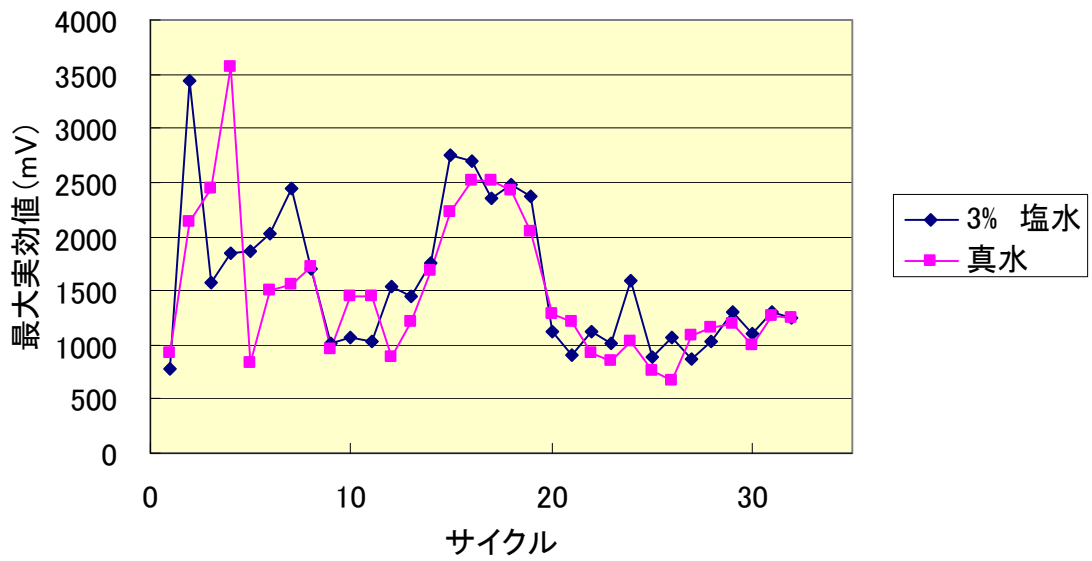


図 8-3-7 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (7 cm)

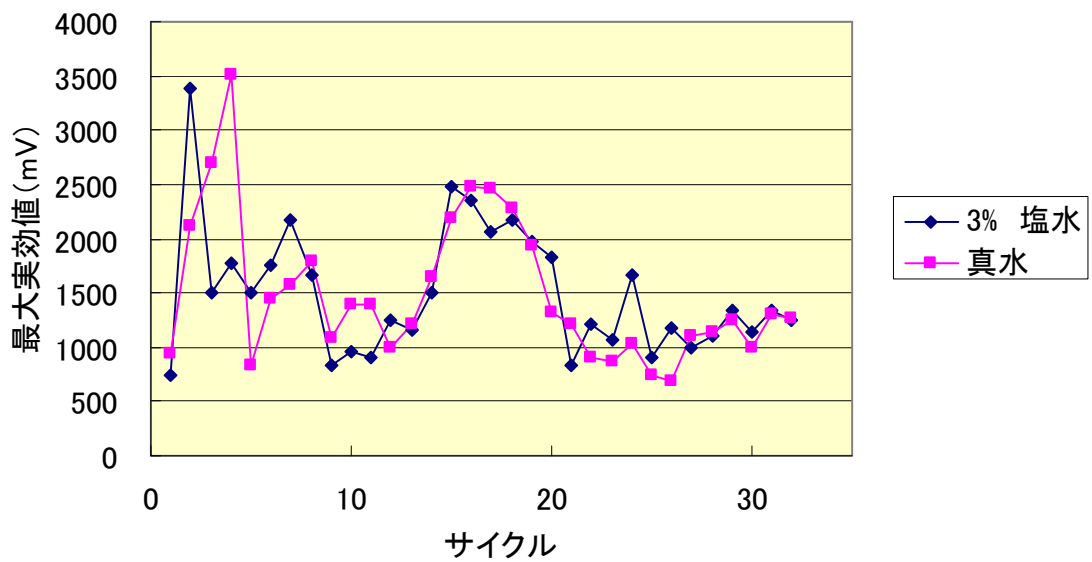


図 8-3-8 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (10 cm)

<水セメント比 55%>

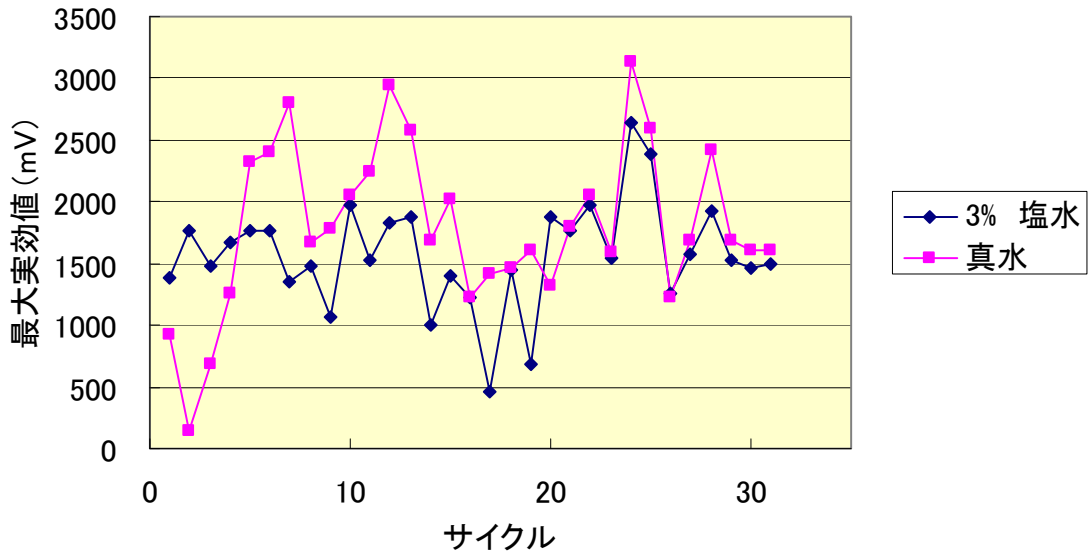


図 8-3-9 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (表面)

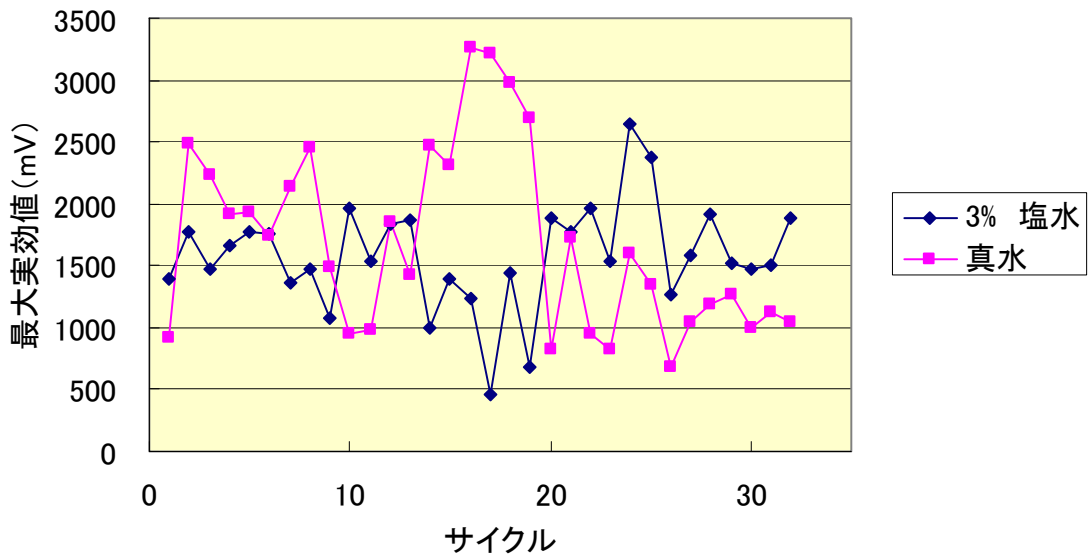


図 8-3-10 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (1 cm)

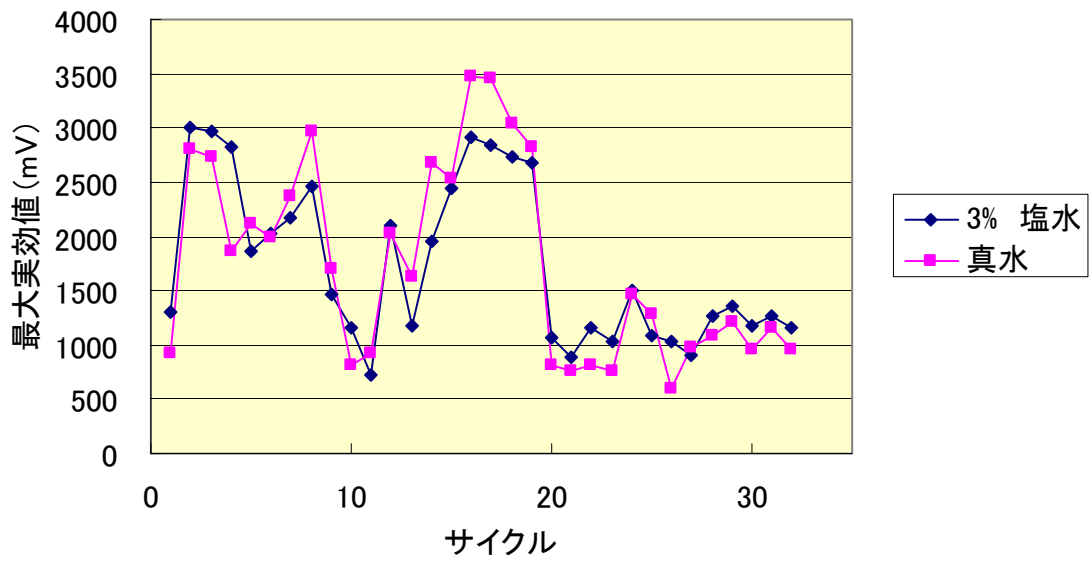


図 8-3-11 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (2 cm)

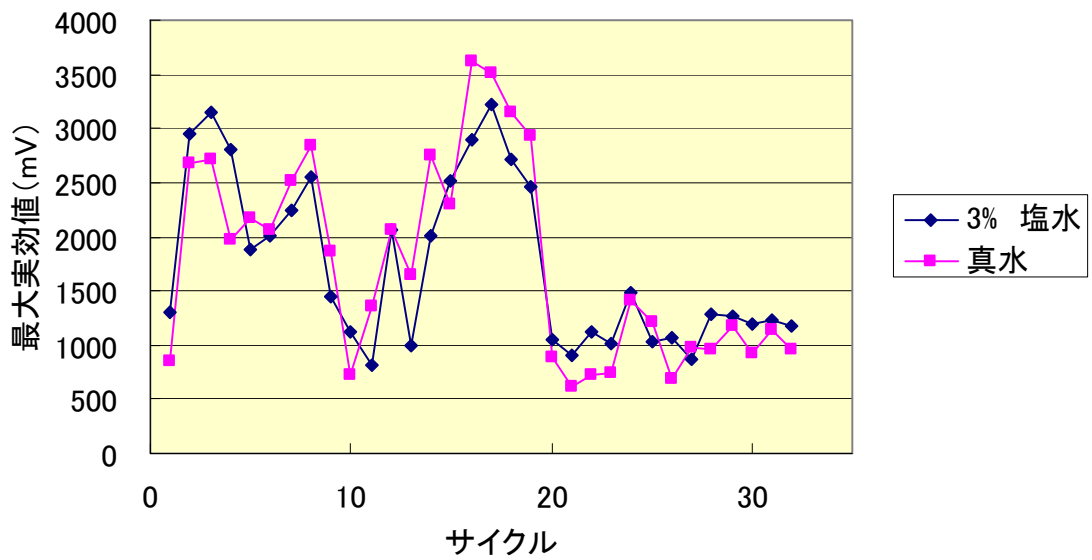


図 8-3-12 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (3 cm)

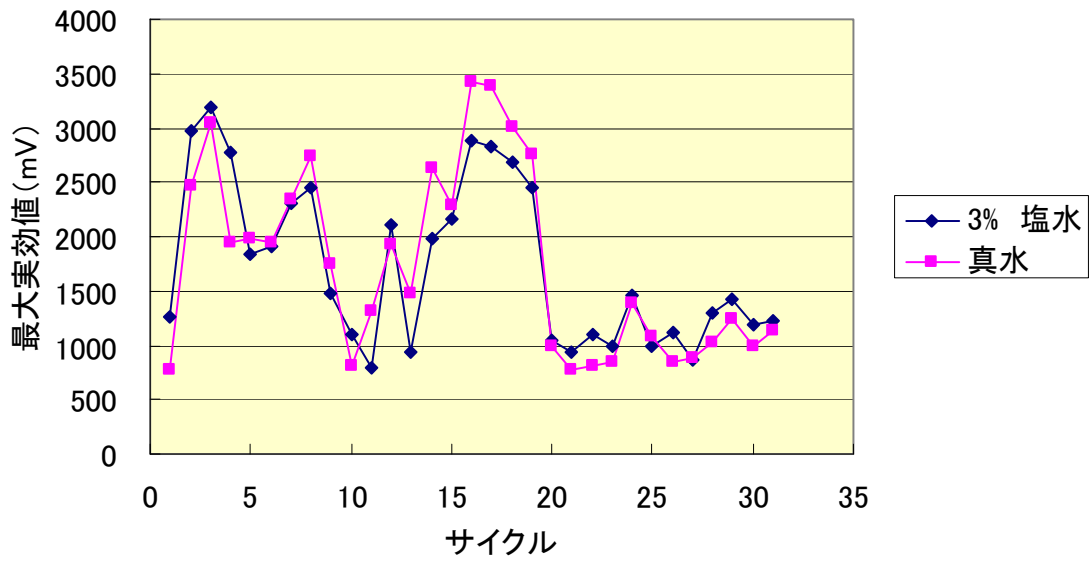


図 8-3-13 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (4 cm)

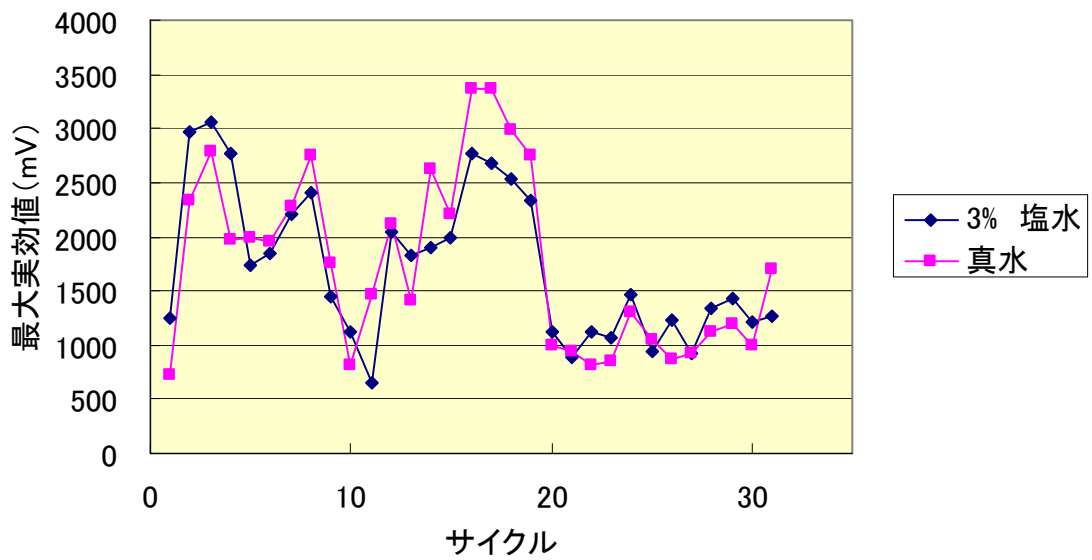


図 8-3-14 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (5 cm)

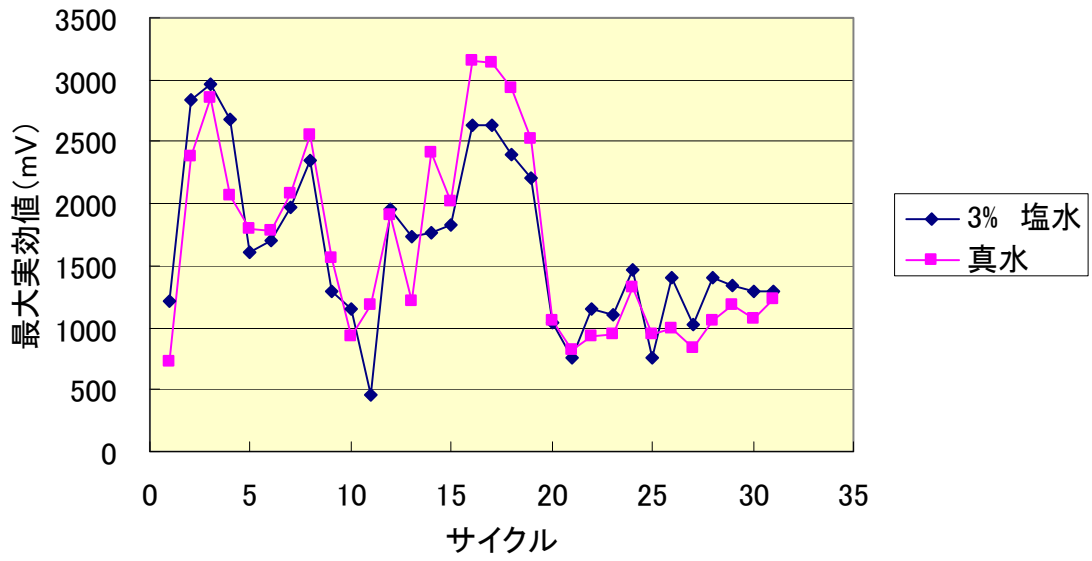


図 8-3-15 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (7 cm)

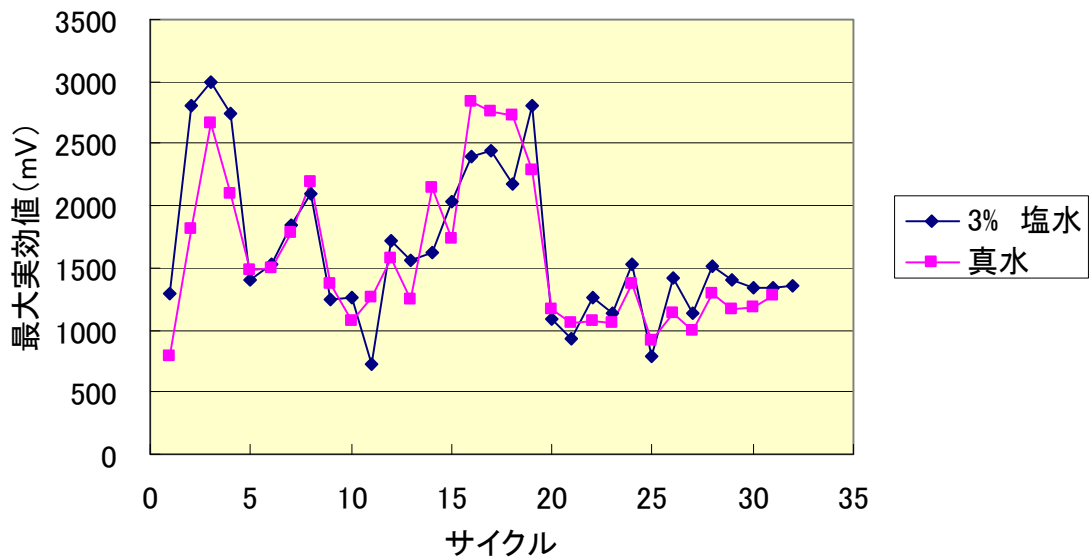


図 8-3-16 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (10 cm)

<水セメント比 65%>

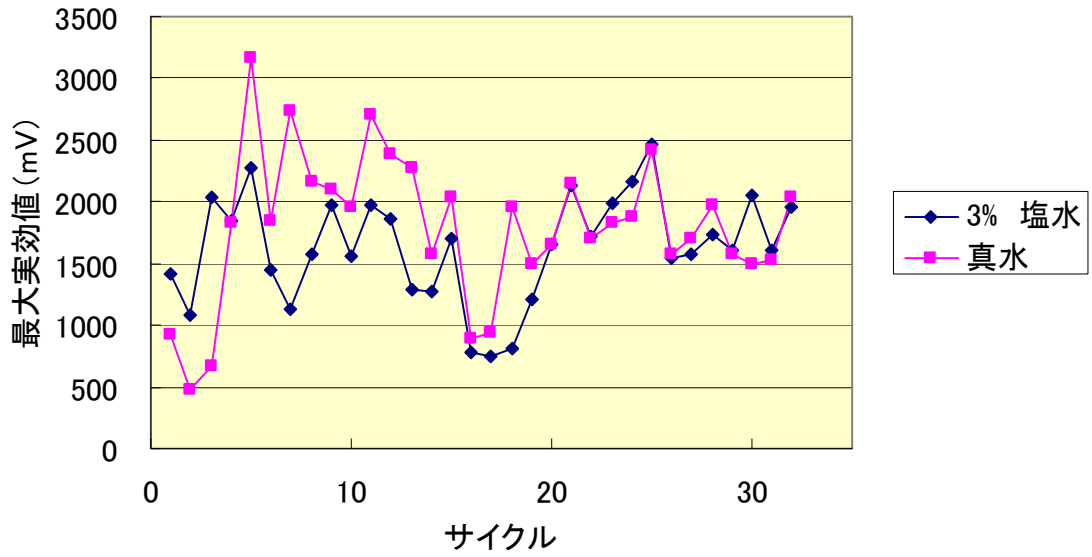


図 8-3-17 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (表面)

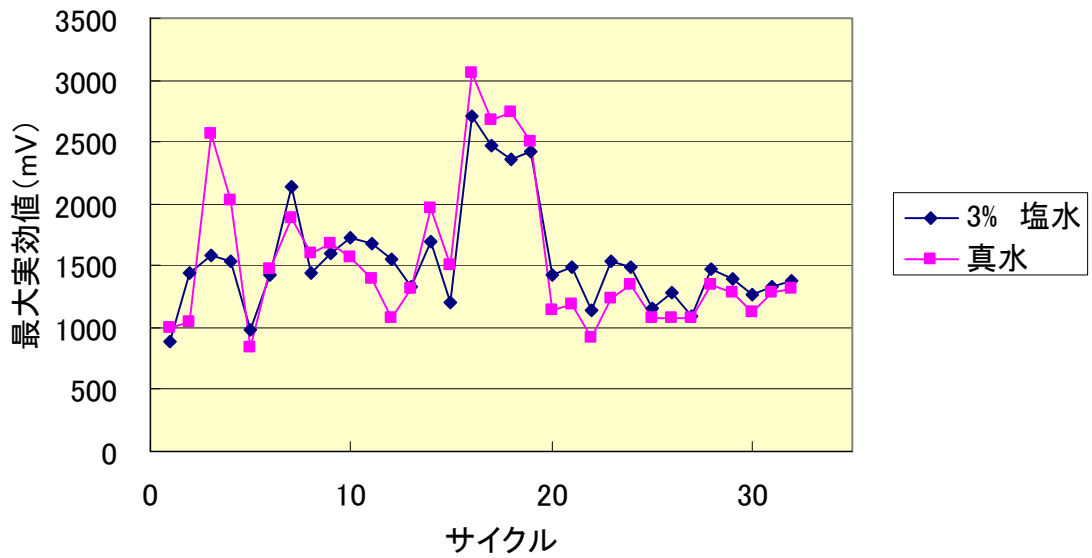


図 8-3-18 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (1 cm)

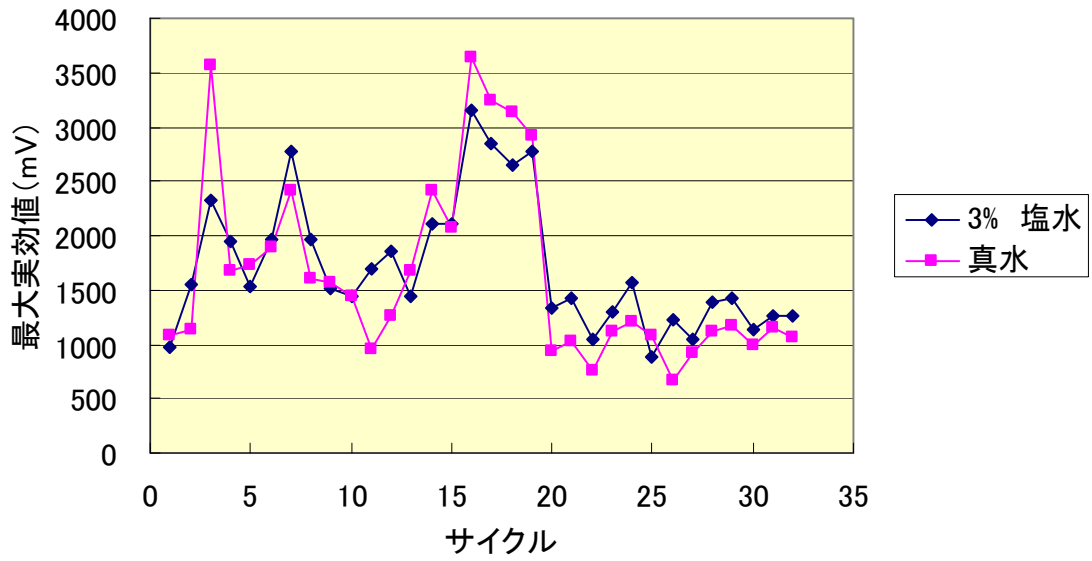


図 8-3-19 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (2 cm)

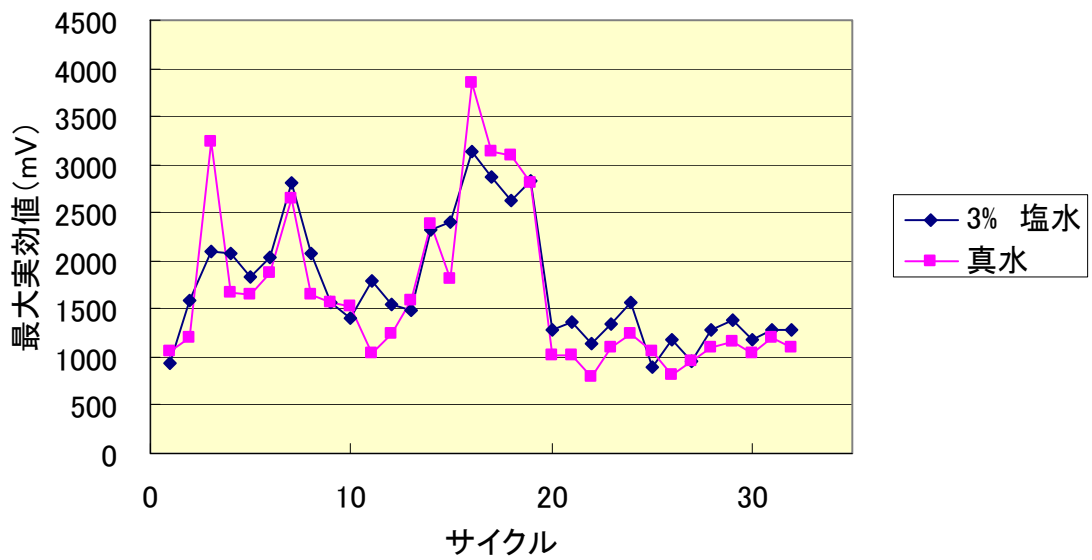


図 8-3-20 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (3 cm)

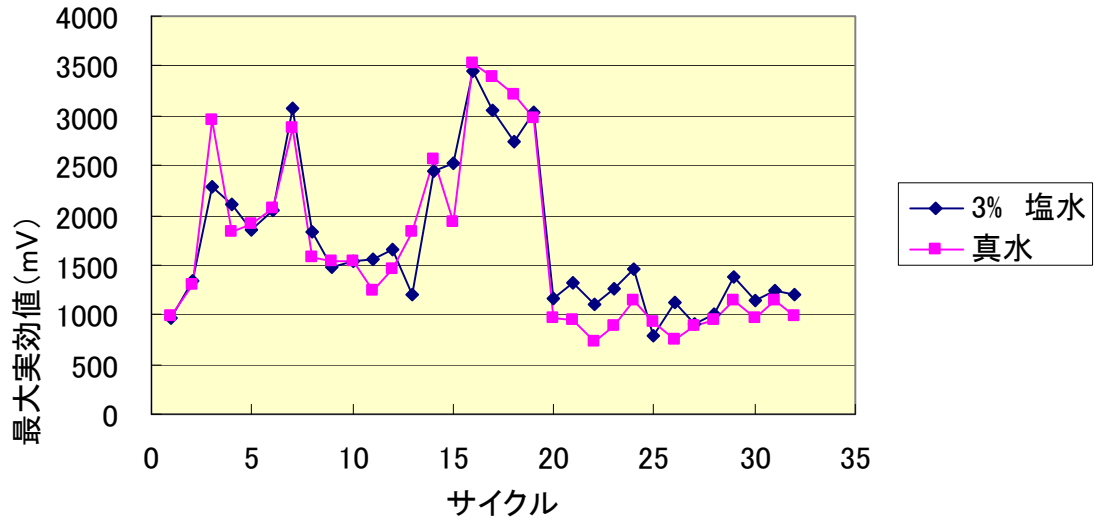


図 8-3-21 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (4 cm)

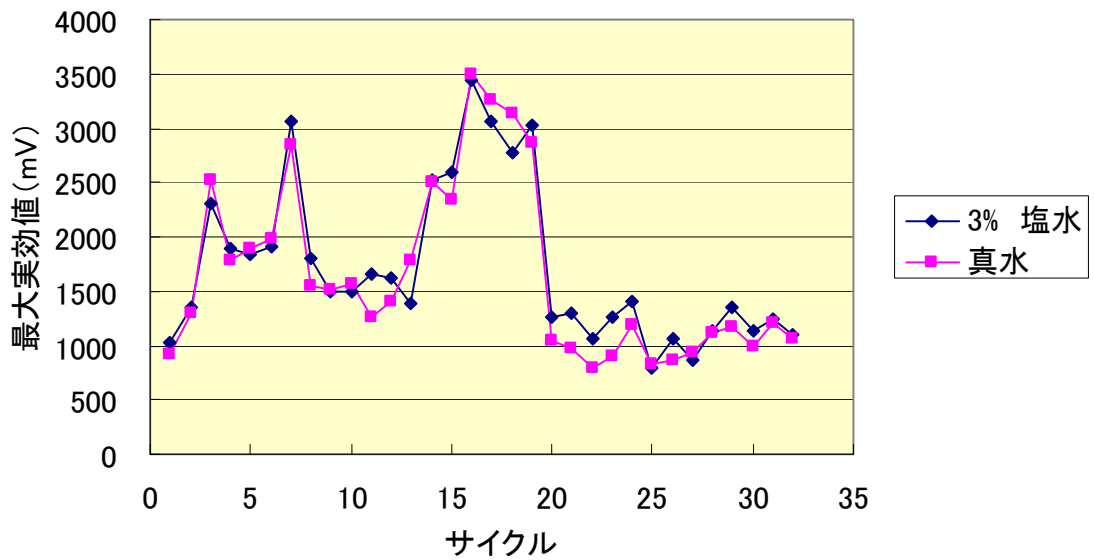


図 8-3-22 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (5 cm)

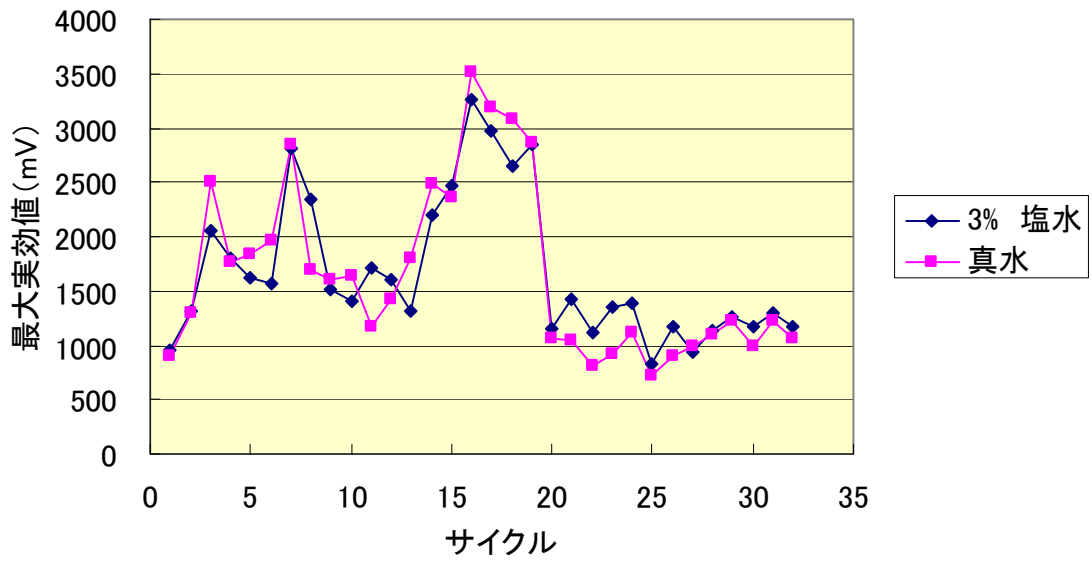


図 8-3-23 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (7 cm)

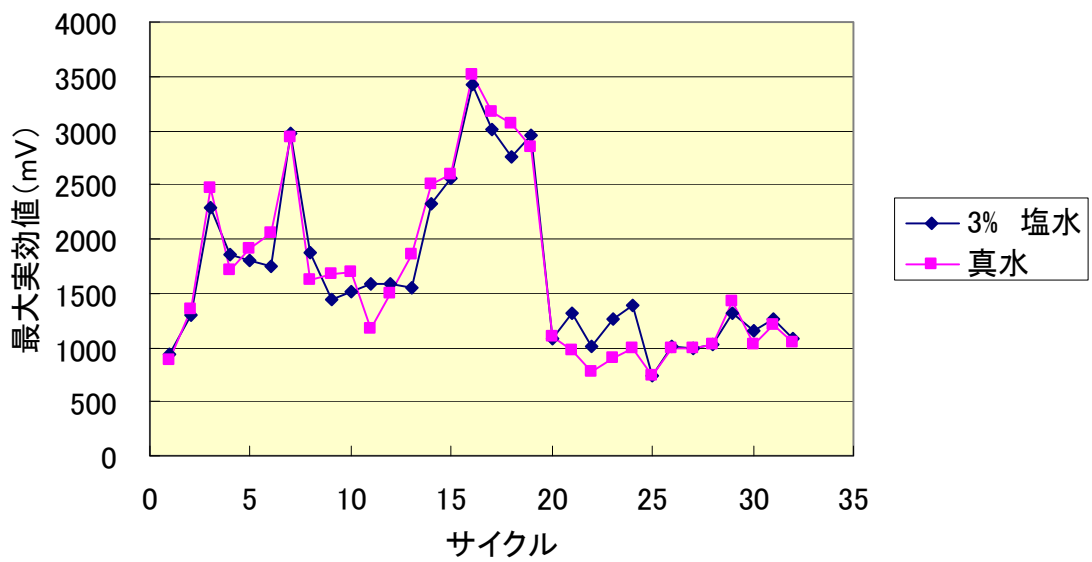


図 8-3-24 塩水浸漬と真水浸漬の比較 (10 cm)

8.4 考察

それぞれの供試体における実効値の経時変化については測定値にバラつきが生じており、傾向を読み取ることが困難であった。

・水セメント比の影響

上記の通りバラつきが大きいためグラフの経時的な変化の傾向をつかむことは難しい。しかし、どの水セメント比においてもほぼ同じ最大実効値が計測されている。また、深さ方向の実効値変化より、深くなるにつれ最大実効値は小さくなることから、水分浸透が実効値に影響しているということが考えられる。このことから、実効値は塩分及び水分の両方に左右されるため、測定時のコンクリートの状態によって実効値は大きく変化すると考えられ、そのことも数値のバラつきの原因になっていると考えられる。

・塩分浸漬と真水浸漬の比較

かぶり深さが大きくなるにつれて若干ではあるが塩水浸漬の供試体の最大実効値が低下している傾向が見られる。かぶり深さが大きくなるにつれ最大実効値は小さくなることから、水分浸透が実効値に影響しているということが考えられる。また塩分浸漬と真水浸漬にあまり大きな差が出ていないことについて、インピーダンス法は塩分と水分の両方に作用されるためだと推定される。

第9章 実際の塩化物量の測定

9.1 目的

本研究で採取した電磁波法及びインピーダンス法によるデータから推測される塩化物量と比較するため、測定条件と同条件下にある供試体からコアを抜き各深さ毎の実際の塩化物量を測定した。

電磁波法の測定に使用した供試体からコアカッターを用いてコアを採取した。コアの採取を行った位置を写真 9-2-1 に示す。コアの直径は 5cm、深さは 10～12cm で採取を行った。

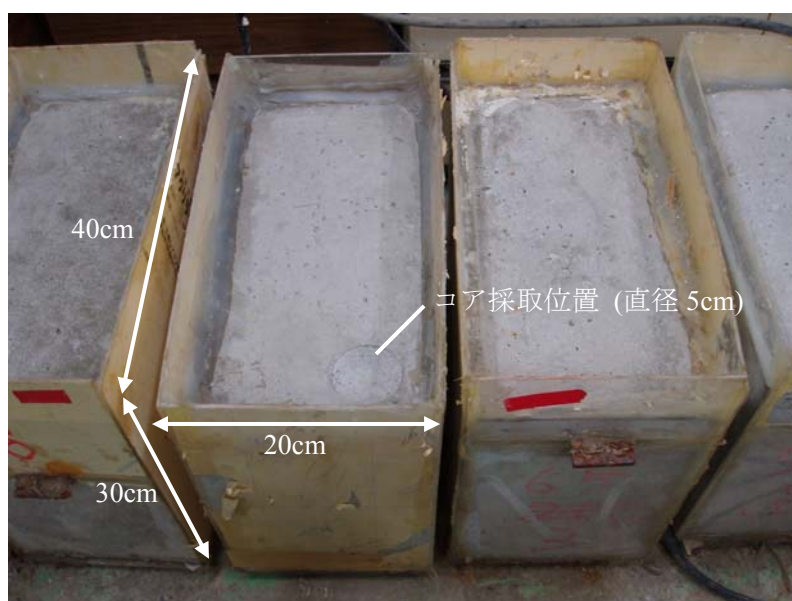


写真 9-1-1 コアを採取した供試体 (w/c=65%、s1=12cm、塩水浸漬)

9.2 測定結果

実際の塩分量を測定した結果を以下に示す。可溶性塩分の測定結果のグラフを図 9-2-1～図 9-2-3 に、全塩分の測定結果のグラフを図 9-2-4～図 9-2-6 に示す。

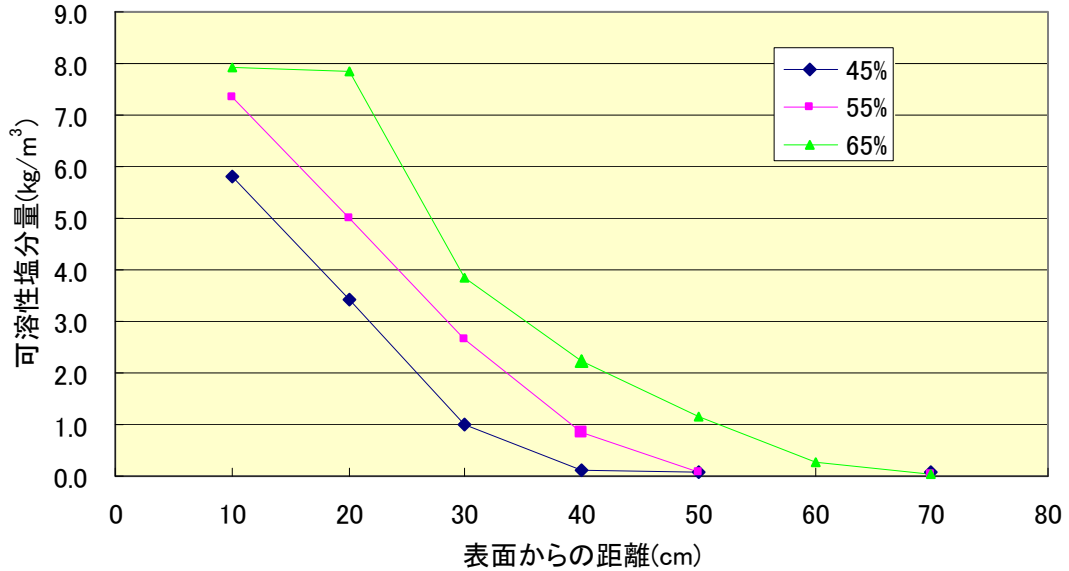


図 9-2-1 可溶性塩分の測定結果 (80 サイクル)

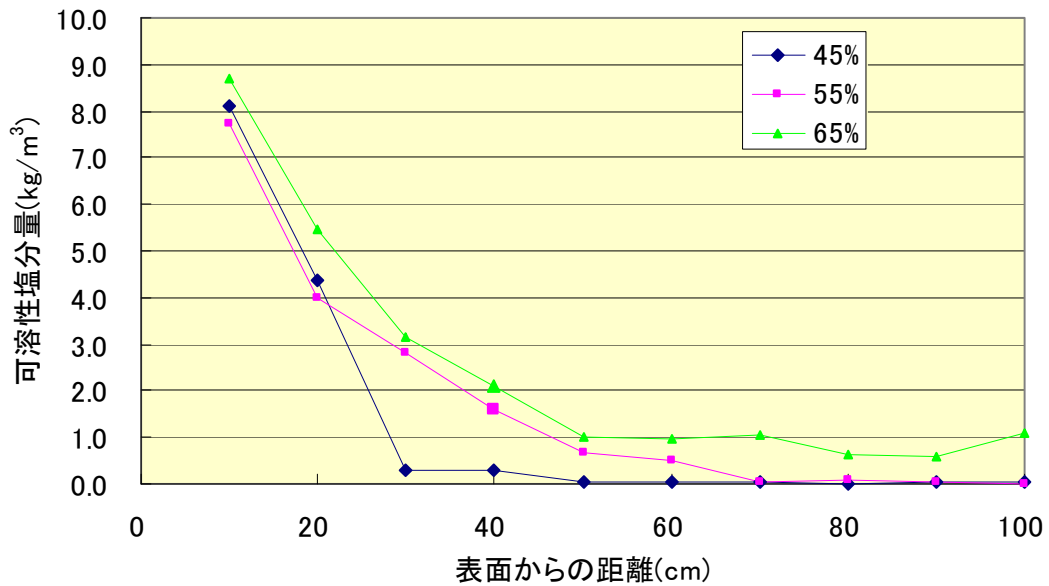


図 9-2-2 可溶性塩分の測定結果 (126 サイクル)

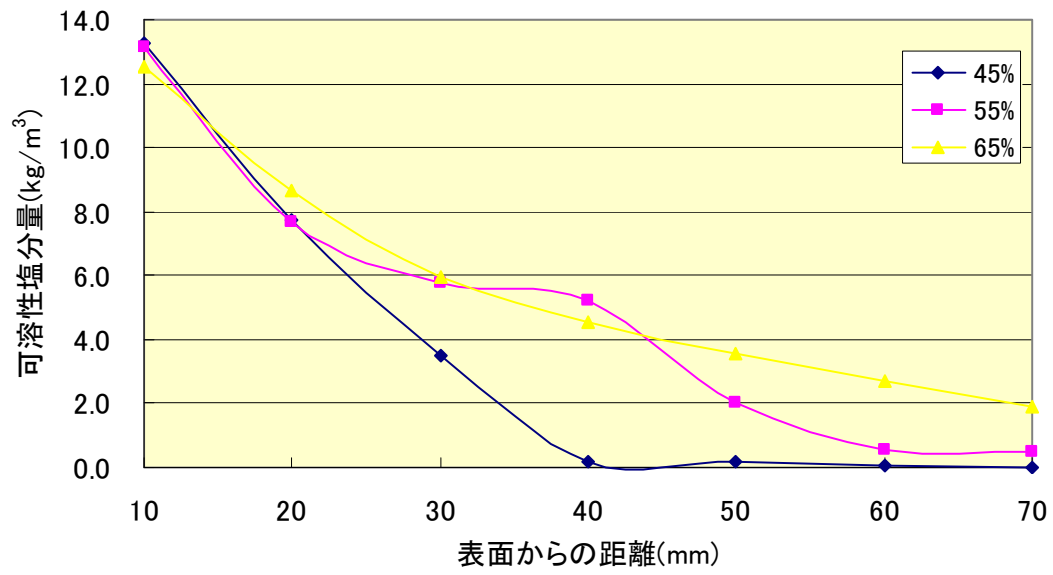


図 9-2-3 可溶性塩分の測定結果 (158 サイクル)

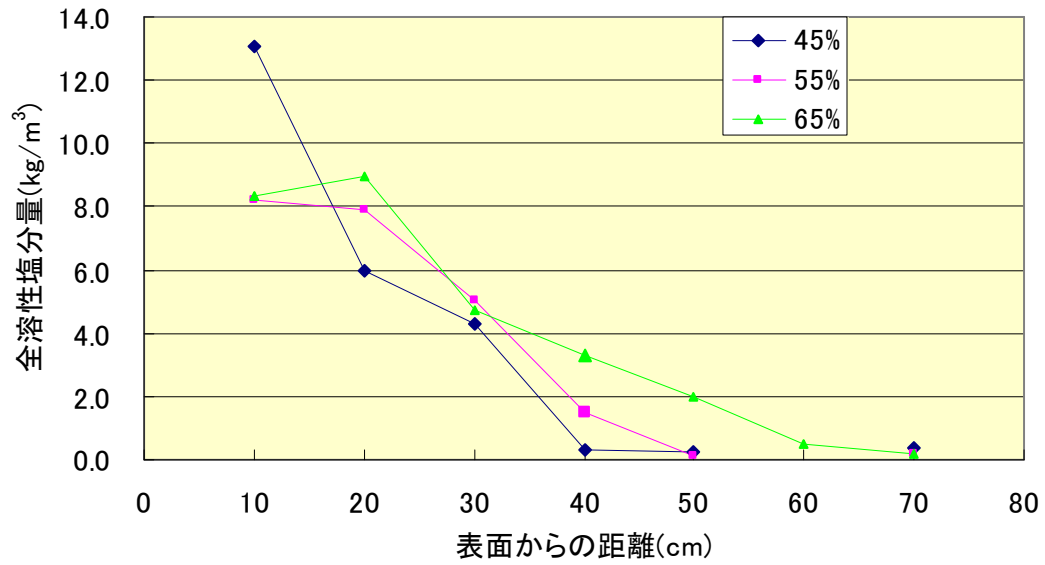


図 9-2-4 全溶性塩分の測定結果 (80 サイクル)

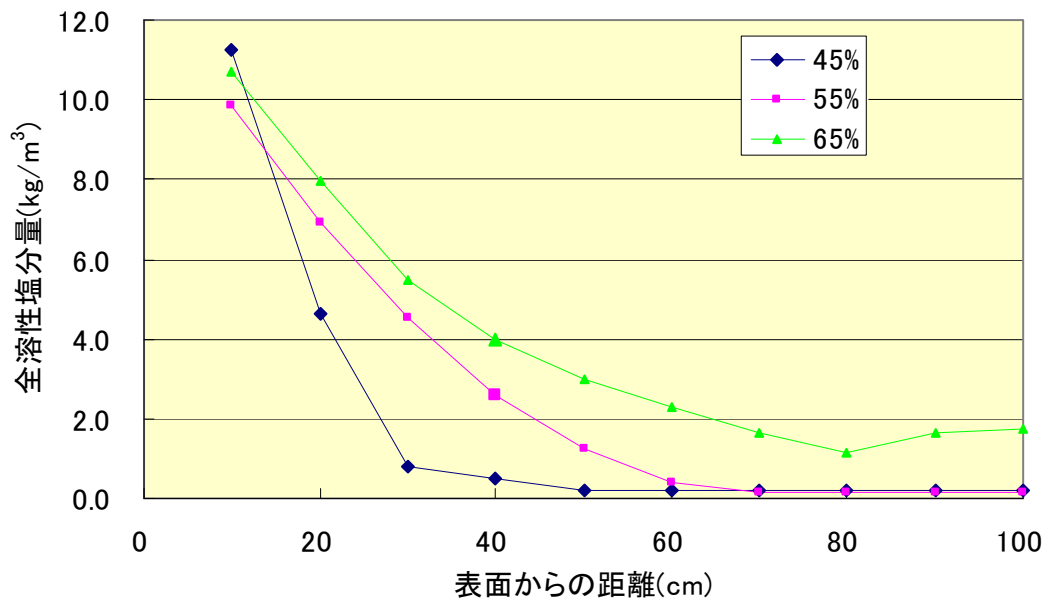


図 9-2-5 全溶性塩分の測定結果 (126 サイクル)

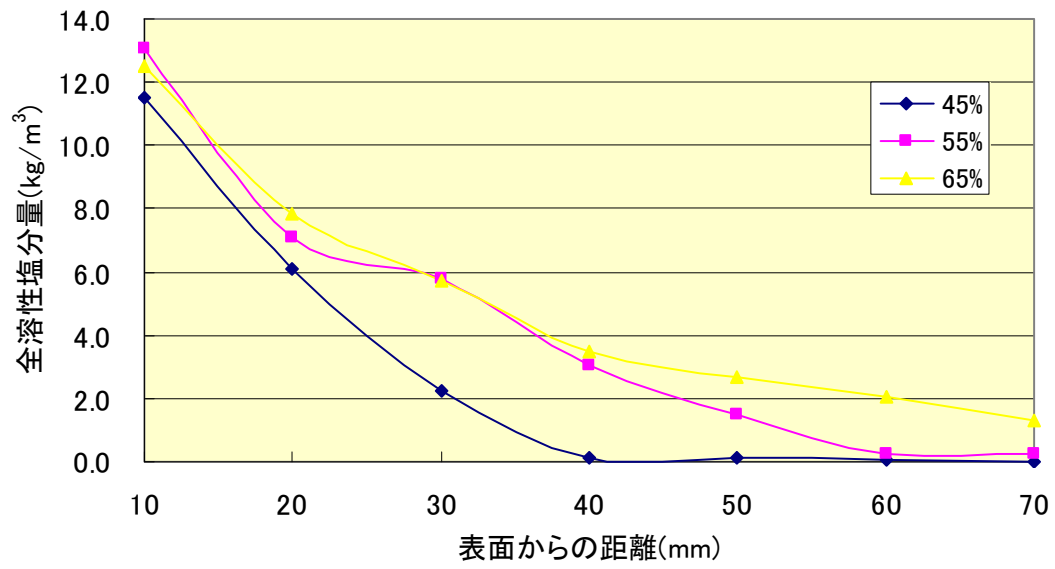


図 9-2-6 全溶性塩分の測定結果 (158 サイクル)

水セメント比別のサイクル数に伴う可溶性塩分量を図 9-2-7～図 9-2-9 に、全溶性塩分量を図 9-2-10～図 9-2-12 に示す。

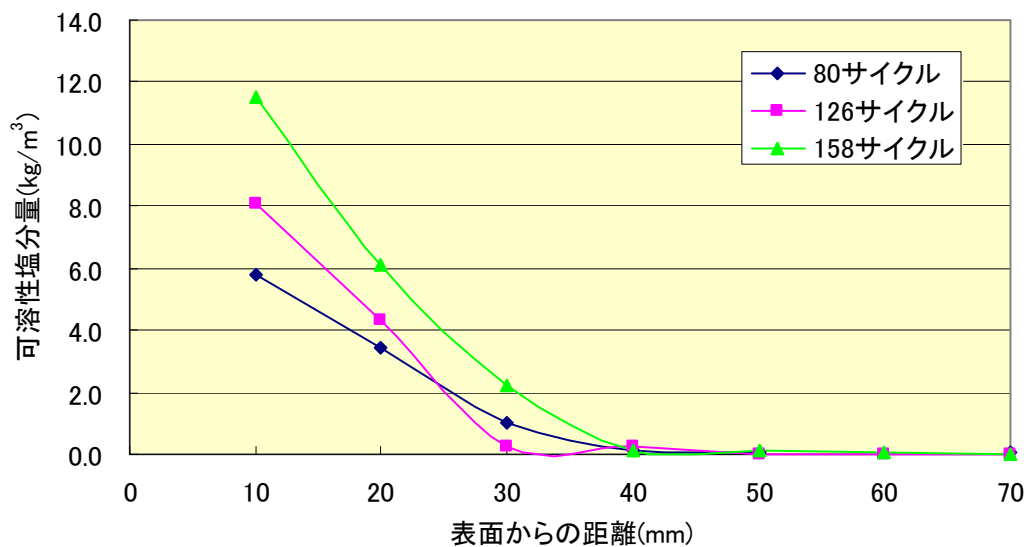


図 9-2-7 可溶性塩分量の経時変化 (W/C=45%)

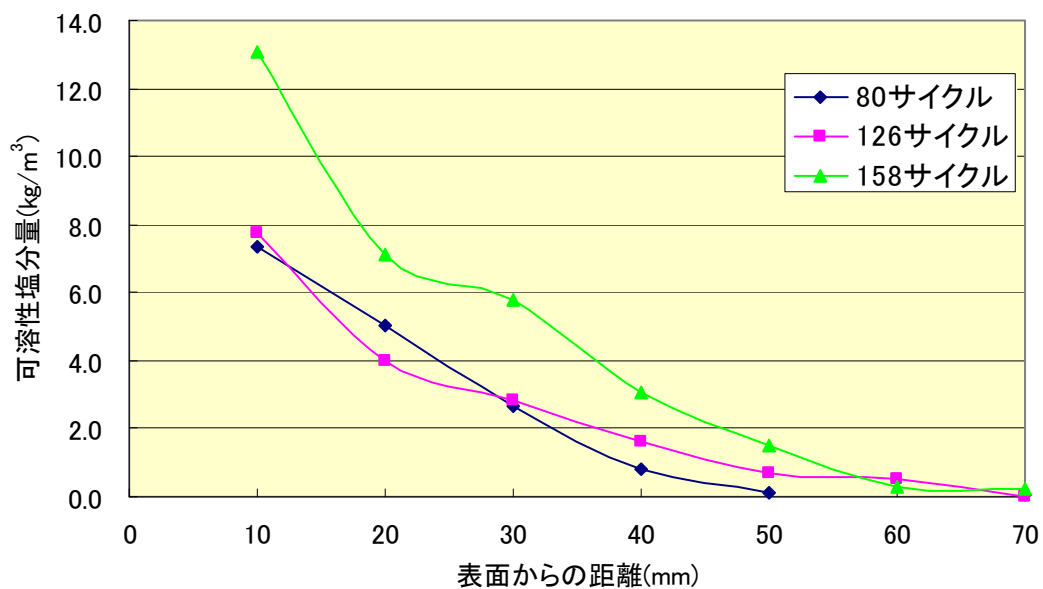


図 9-2-8 可溶性塩分量の経時変化 (W/C=55%)

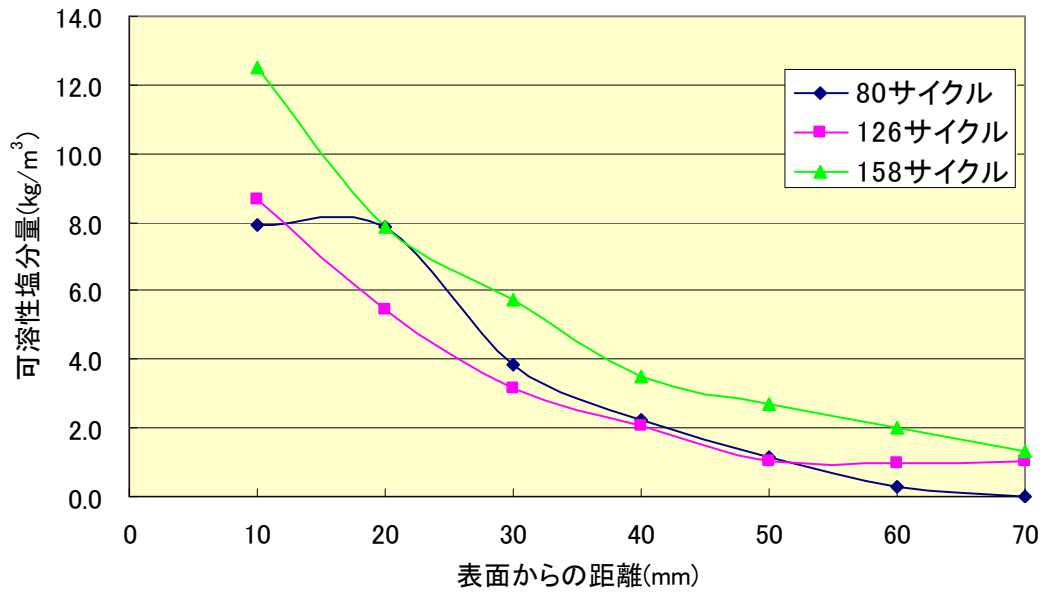


図 9-2-9 可溶性塩分量の経時変化 (W/C=65%)

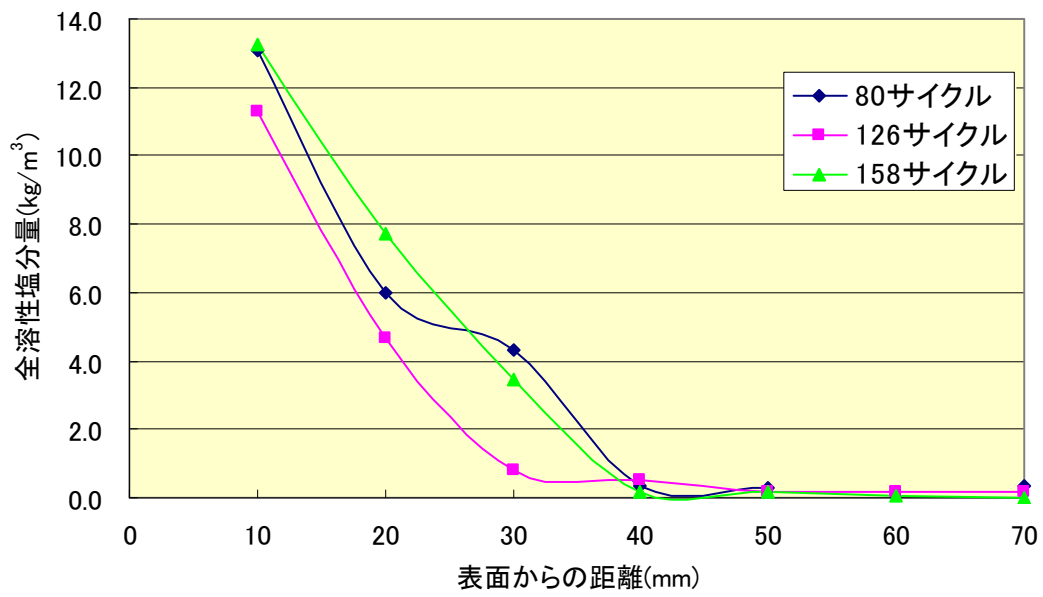


図 9-2-10 全溶性塩分量の経時変化 (W/C=45%)

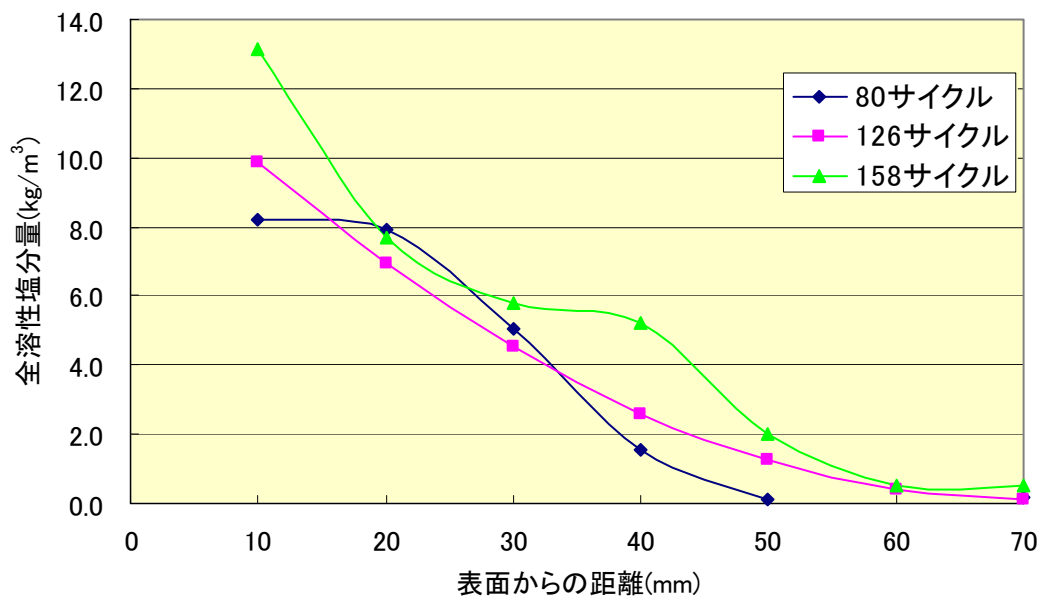


図 9-2-11 全溶性塩分量の経時変化 (W/C=55%)

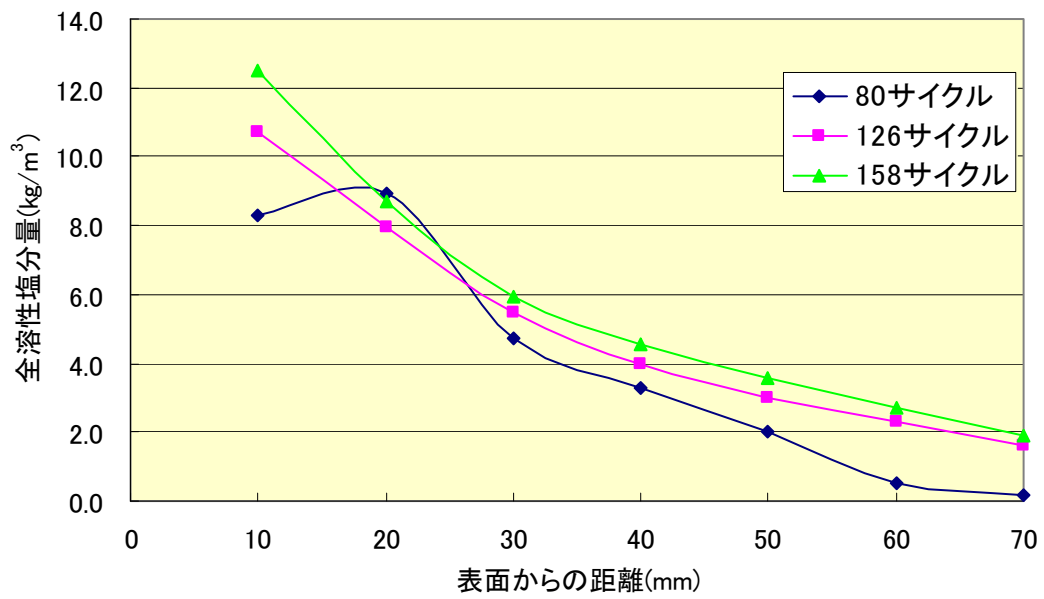


図 9-2-12 全溶性塩分量の経時変化 (W/C=65%)

9.3 考察

水セメント比が大きいほど塩分が浸透しているという傾向が見られる。これは塩分浸透にはコンクリート中のセメント量が大きく関係していると考えられ、セメント量が多いほど浸透しにくく、少ないほど浸透しやすいことをあらわしている。

分布の仕方としては表面に近づくほどコンクリート中に含まれる塩化物イオン量は増えていく。しかし、一部表面と 2 層目がほぼ同等の塩分量を示している。これは、中性化の影響やコアを抜く際に真水に浸しながら切断を行うため表面部分の塩化物イオンが流れてしまい、実際の塩化物量より低い数値が観測されてしまったのではないかと考えられる。

第 10 章 推定値と実測値の比較

10.1 目的

本研究の実験データから求められる推定塩分量と実際の塩分量とにどれほどの違いがあるかを比較検討する。また、インピーダンス法による実験データと電磁波法による実験データから、塩分量推定曲線を作成した。

10.2 電磁波法のデータによる推定

電磁波法で得られる塩分推定量は対象深さまでの平均値であるため、ここでは実際の塩分量をグラフの面積から求め、それを対象深さで除し、平均塩化物濃度を縦の長さとし、それぞれの鉄筋深さを横の長さとして長方形に等価して比較をする。また、比較自体は長方形の縦の長さ、つまり、平均塩化物濃度を使い比較する。

3 回の塩分分析および電磁波法による測定結果より重回帰分析を行い、推定式を求めた。得られた推定式を以下に記す。

$$C_c = -0.0379\alpha + 0.247\varepsilon + 0.0580W/C - 3.41$$

C_c : 塩化物量 (kg/m^3) , α : 振幅値, ε : 比誘電率, W/C : 水セメント比 (%)

上記の式より得られた、推定値と実測値の比較を図 10-2-1～図 10-2-4 に示す。

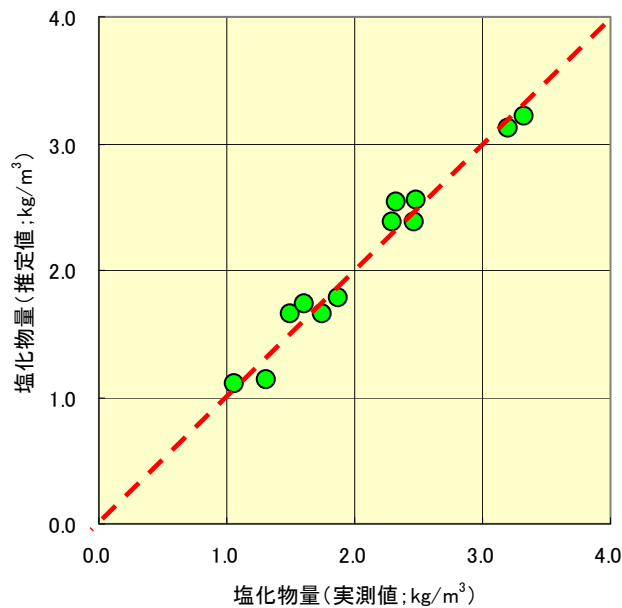


図 10-2-1 平均塩化物量の推定値と実測値との比較

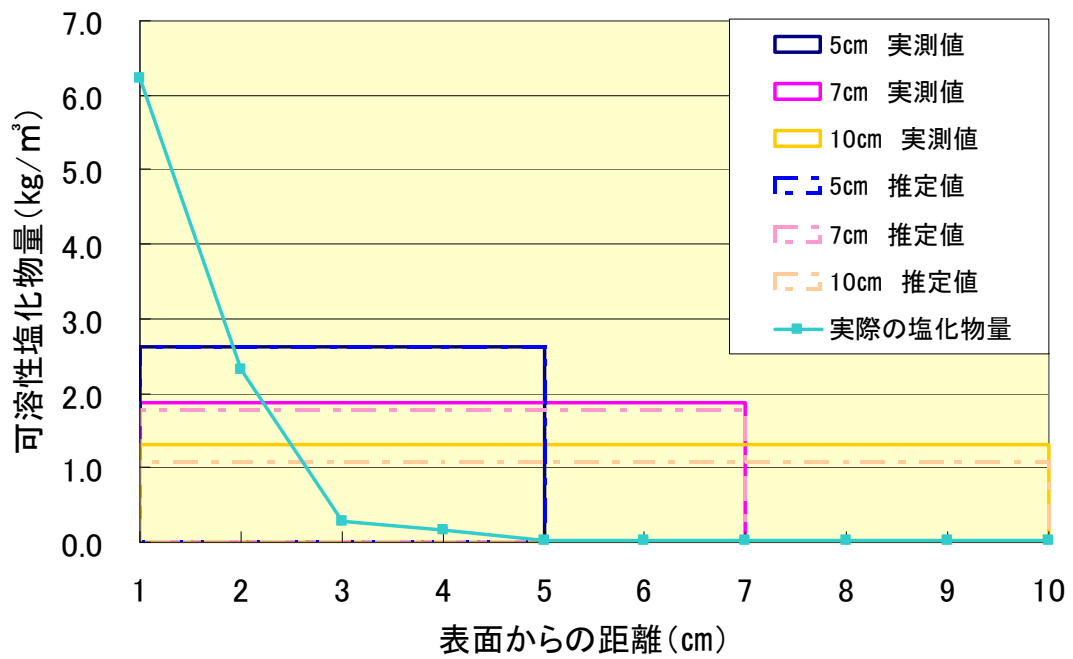


図 10-2-2 推定式と実測値の比較 (45%)

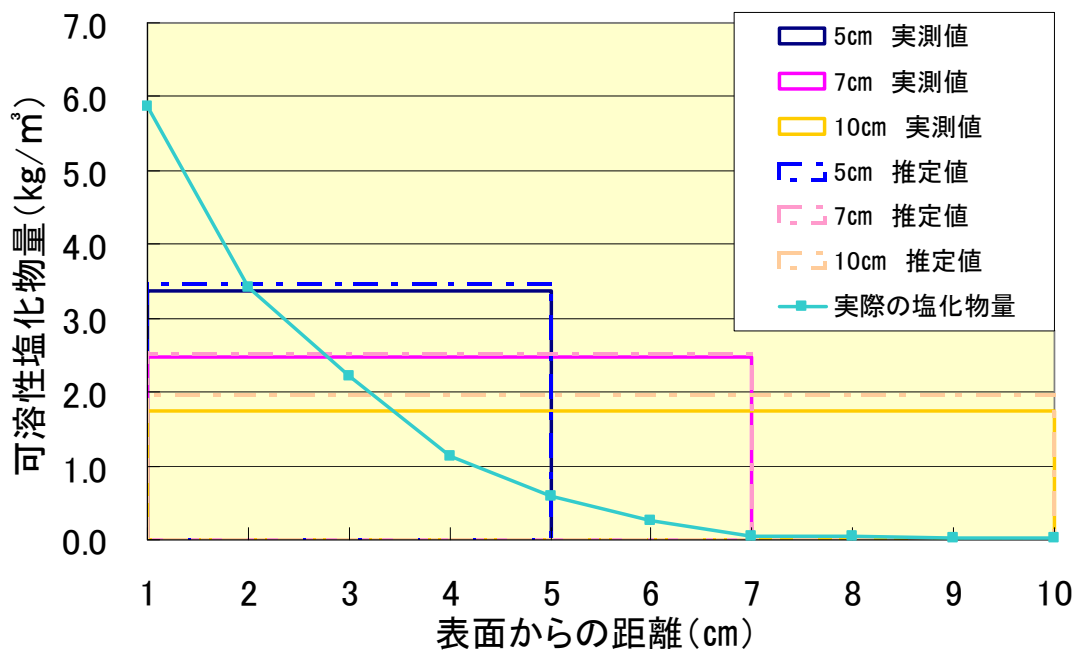


図 10-2-3 推定式と実測値の比較 (55%)

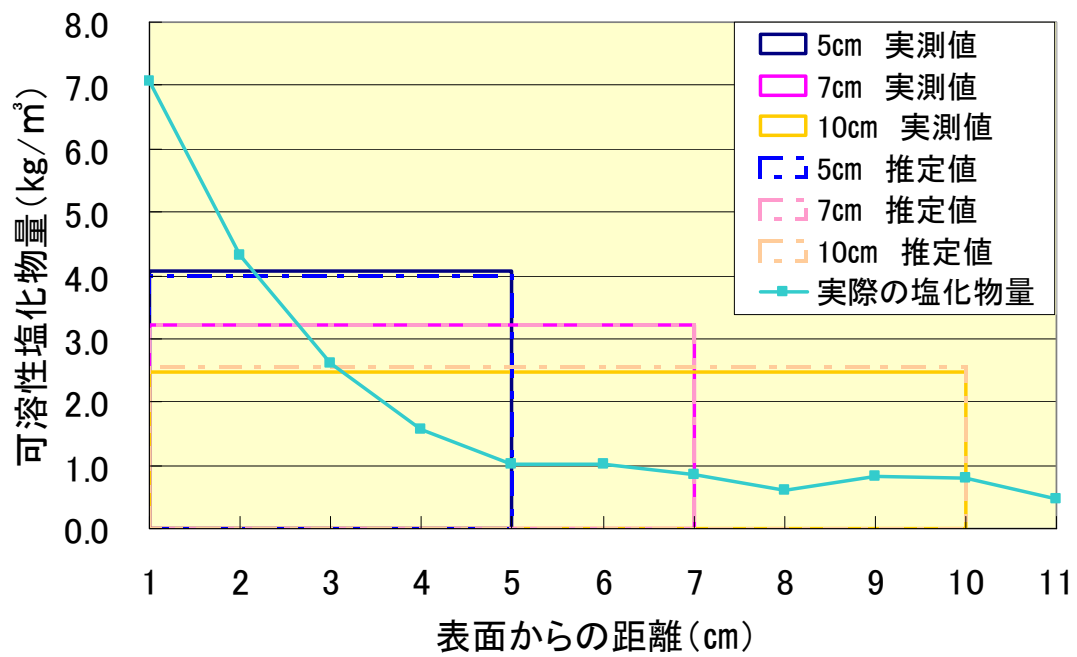


図 10-2-4 推定式と実測値の比較 (65%)

10.3 インピーダンス法のデータによる塩分曲線の推定

Fick の第 2 法則 $\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ を誤差関数を用いて解いた塩化物量の式

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \times t}} \right) \right]$$

から推定塩分量を算出した。

$C(x, t)$: 時間 t 、距離 x における塩化物量 (kg/m³)

C_0 : 見かけの表面塩化物イオン量

erf : 誤差関数

x : 表面からの距離 (cm)

D_c : 塩化物イオンの拡散係数 (cm²/年)

t : 経過時間 (年)

なお、 C_0 は重回帰分析より求められた

$$C_0 = 0.00970 \times \text{塩水の最大実効値}(mV) + 0.06690 \times w/c(\%) - 0.00430 \times \text{最大実効値の差}[\text{塩水} - \text{真水}](mV) - 10.22639$$

より求めた結果、

水セメント比 (%)	C_0 (kg/m ³)
45	7.035
55	8.272
65	11.646

D_c は普通コンクリート構造物では $\log D_c = -3.9 \times (w/c)^2 + 7.2 \times (w/c) - 2.5$ から求め、用いられる。

水セメント比 (%)	D_c (cm ² /年)
45	0.892
55	1.907
65	3.406

コンクリート供試体から得られた実効値から重回帰分析を行い、表面塩化物量を推定した。

その結果を以下に示す。

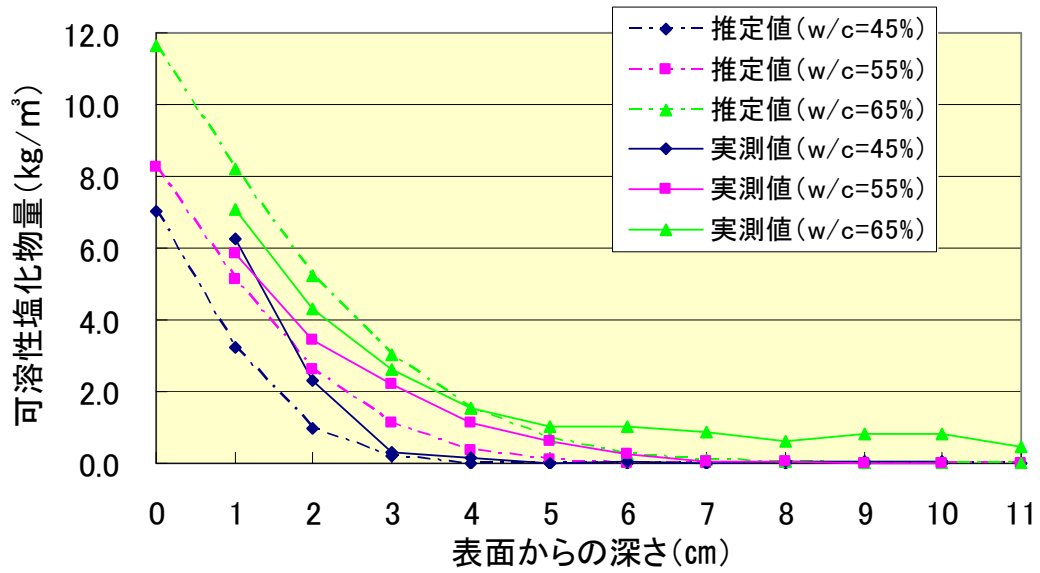


図 10-3-1 インピーダンス法による塩分量比較

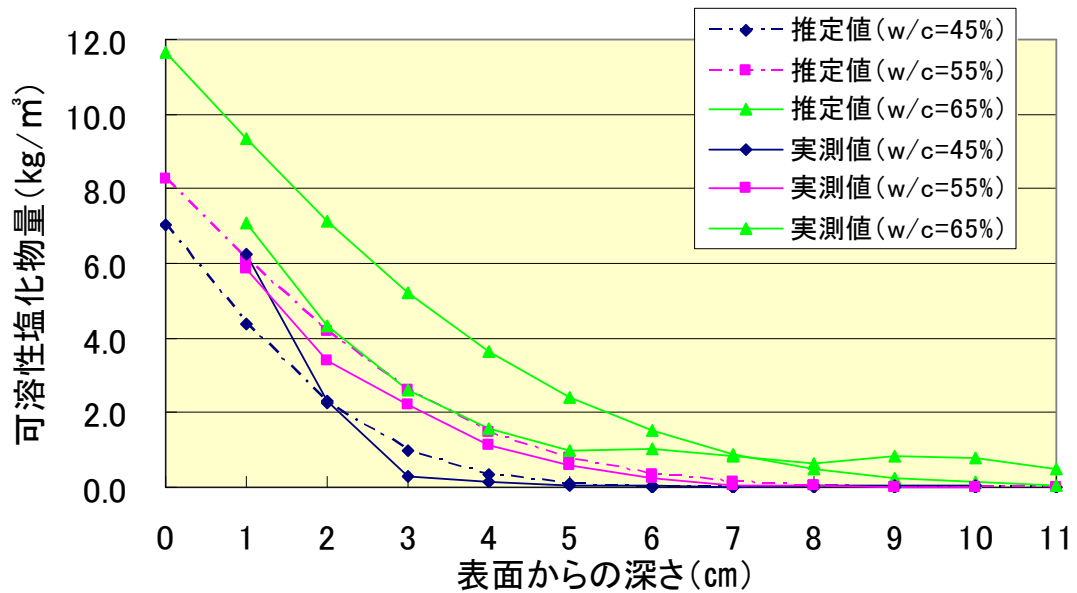


図 10-3-2 インピーダンス法による塩分量比較

10.4 インピーダンス法と電磁波法から求められる塩分推定曲線

表面塩化物量は 10-3 でインピーダンス法から求めたものを使用する。ここでは電磁波法によって対象深さまでの塩化物量がわかっているので、フィックの第2法則の拡散係数を変化させることによってグラフの面積と推定される塩化物量を合わせ、グラフの外形を決めた。

以下に塩分曲線の推定方法を示す。

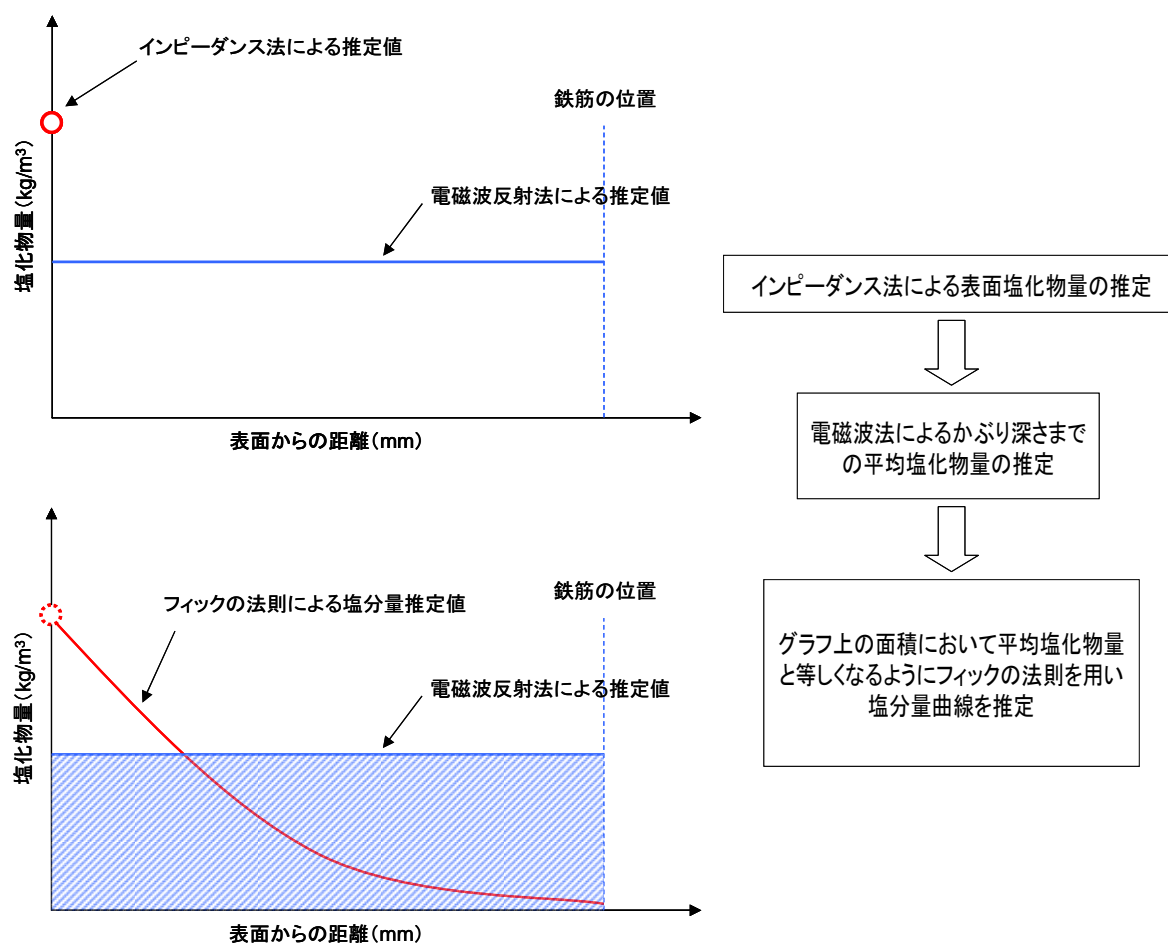


図 6-2-1 推定塩分曲線のフロー図

また上記の方法で塩分量曲線推定した結果を以下に示す。

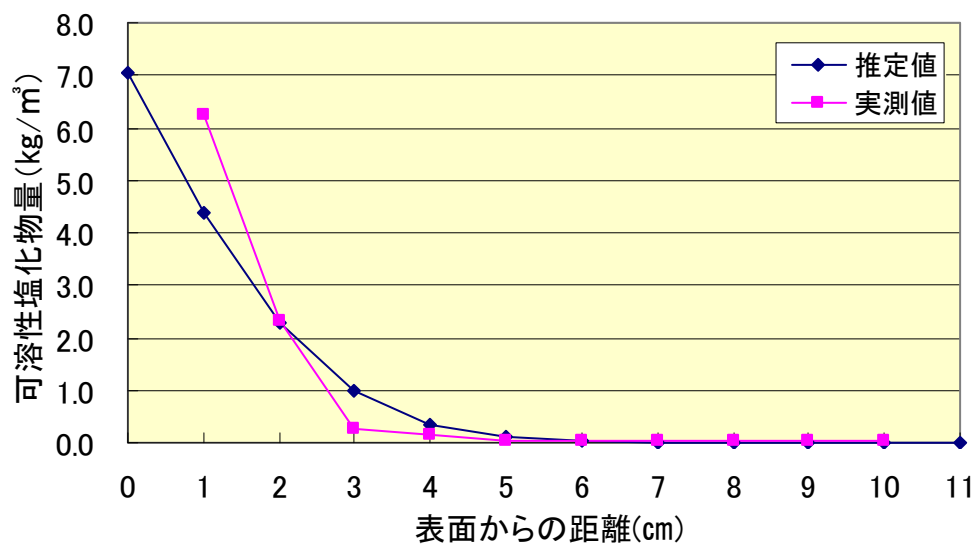


図 10-4-1 水セメント比 45%における塩分推定曲線

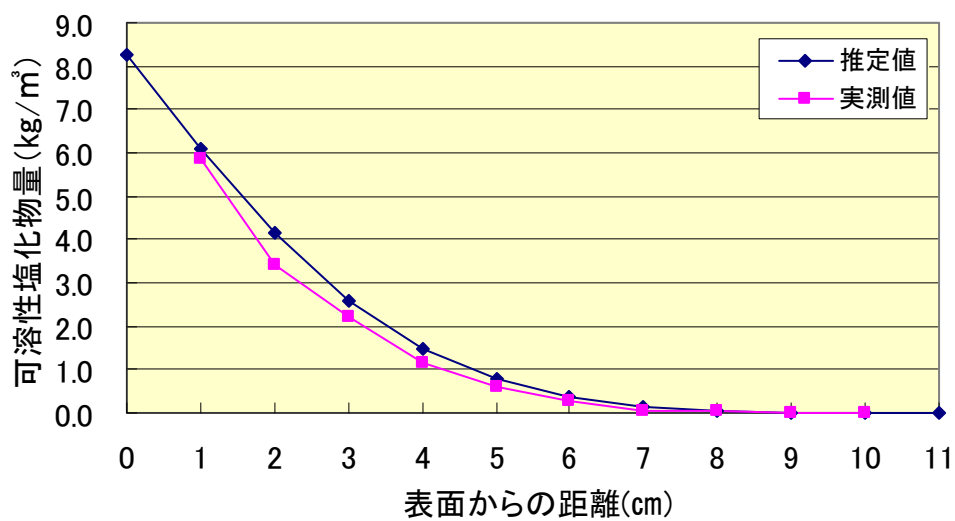


図 10-4-2 水セメント比 55%における塩分推定曲線

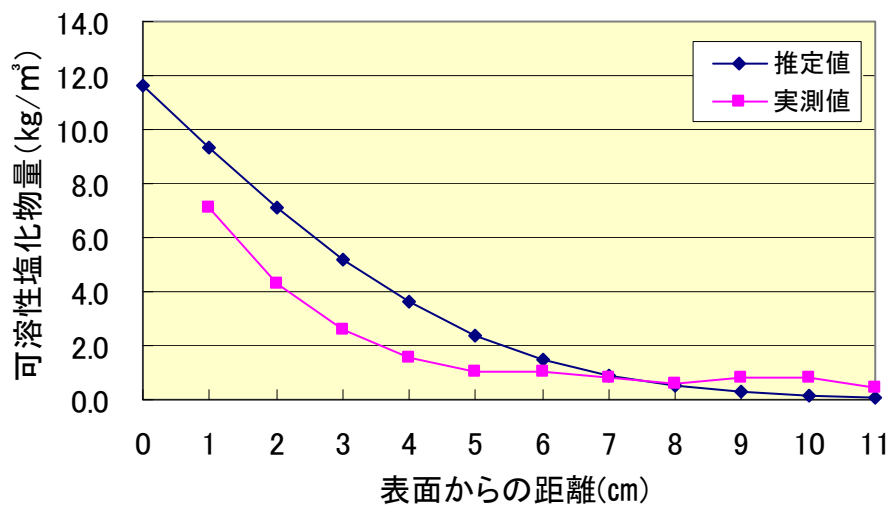


図 10-4-3 水セメント比 65%における塩分推定曲線

10.5 考察

(1) インピーダンス法からの推定

インピーダンス法のデータによる結果としては、表面塩化物量はほぼ期待したとおりの値となった。しかし、表面からの深さが深くなるにつれて、実測値との誤差が大きくなる結果となった。これは、インピーダンス法の測定精度が悪いことや、塩化物イオンの拡散係数の値を一般に用いられる海洋構造物 (W/C=45%) の拡散係数 ($D_c=10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$) を用いたため、推定される塩化物量が大きく出てしまったと考えられる。

(2) 電磁波法からの推定

比誘電率は鉄筋深さが同じであれば水セメント比や浸漬溶液、経過時間に関係なくほぼ同じ値を示すことが明らかとなっている。このことより重回帰分析の説明変数に比誘電率を入れることで鉄筋深さを考慮することが出来ると思われる。図 10-2-1 から、各推定値と測定値は比較的高い相関関係にあり、上記の推定式を用いてコンクリート中の平均塩化物量を推定することは可能であると思われる。

(3) 両実験から推定される塩分推定曲線

図 10-4-1～図 10-4-3 から、水セメント比 45% および 55% については、塩化物量の浸透深さが異なるものの、推定値と測定値がほぼ一致する結果となった。一方、水セメント比 65% の場合には推定値がコンクリート表面から 7cm よりも深い位置で塩化物量が $0\text{kg}/\text{m}^3$ となっているのに対して、測定値では $1\text{kg}/\text{m}^3$ 近い塩化物量となっており、推定値と測定値が大きく異なる結果となった。塩化物量がかぶりよりも深く浸透している場合には、今回の推定方法では十分評価することが難しいことから、この点については推定方法も含めてさらに検討していく必要がある。

第 11 章 電磁波法による塩分量推定の実構造物への適用

本研究では、4回の海洋コンクリート構造物でのフィールド調査を行った。うち2回においては、飛沫帯の同一測定範囲(10m×10m)において、電磁波法の距離測定機能を用いて経時的な測定を行った。

11.1 磯子火力発電所における経年調査結果

- 測定日時 : 平成 21 年 9 月 15,16 日
 平成 22 年 10 月 19,20 日
- 場所 : 電源開発株式会社 磯子火力発電所(神奈川県横浜市)
 海上デッキ/北棧橋
- 試料採取 : ドリル法
 塩化物イオン濃度試料採取用の吸じん式ハンマドリルを使用
 (深度 2cm ごとに採取)
- 濃度調査 : 電位差滴定法

測定位置である海上デッキの詳細を図 11-1-1、写真 11-1-1 に示す。

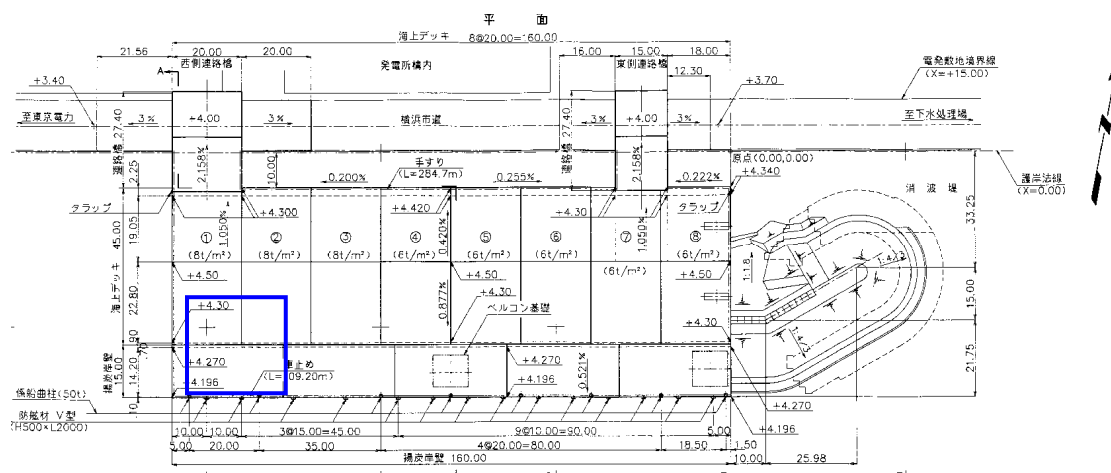


図 11-1-1 海上デッキ位置



写真 11-1-1 海上デッキ上空図

11.1.1 試験方法

下準備としてあらかじめ実験に使用している電磁波レーダで鉄筋探査を行った。これにより鉄筋位置を把握し、鉄筋位置に対してある程度の水平、垂直になるように 0 点、および X 軸、Y 軸を定めた。また測定には電磁波法で用いたアンテナにある距離測定機能（室内実験では時間測定機能）を利用し、順次アンテナ台車により走査を行う。一本の走査測線でデータ取得が完了するごとに、データ内にノイズが生じずに、有効なデータであるか確認後ファイルとして保存する。以下、解析などの処理は室内実験で述べたものと同様である。

設定した座標を図 11-2-1 に示す。ここで、コア A～コア D は 2009 年度に採取した試料であり、コア E～コア G は 2010 年度に採取したものである。

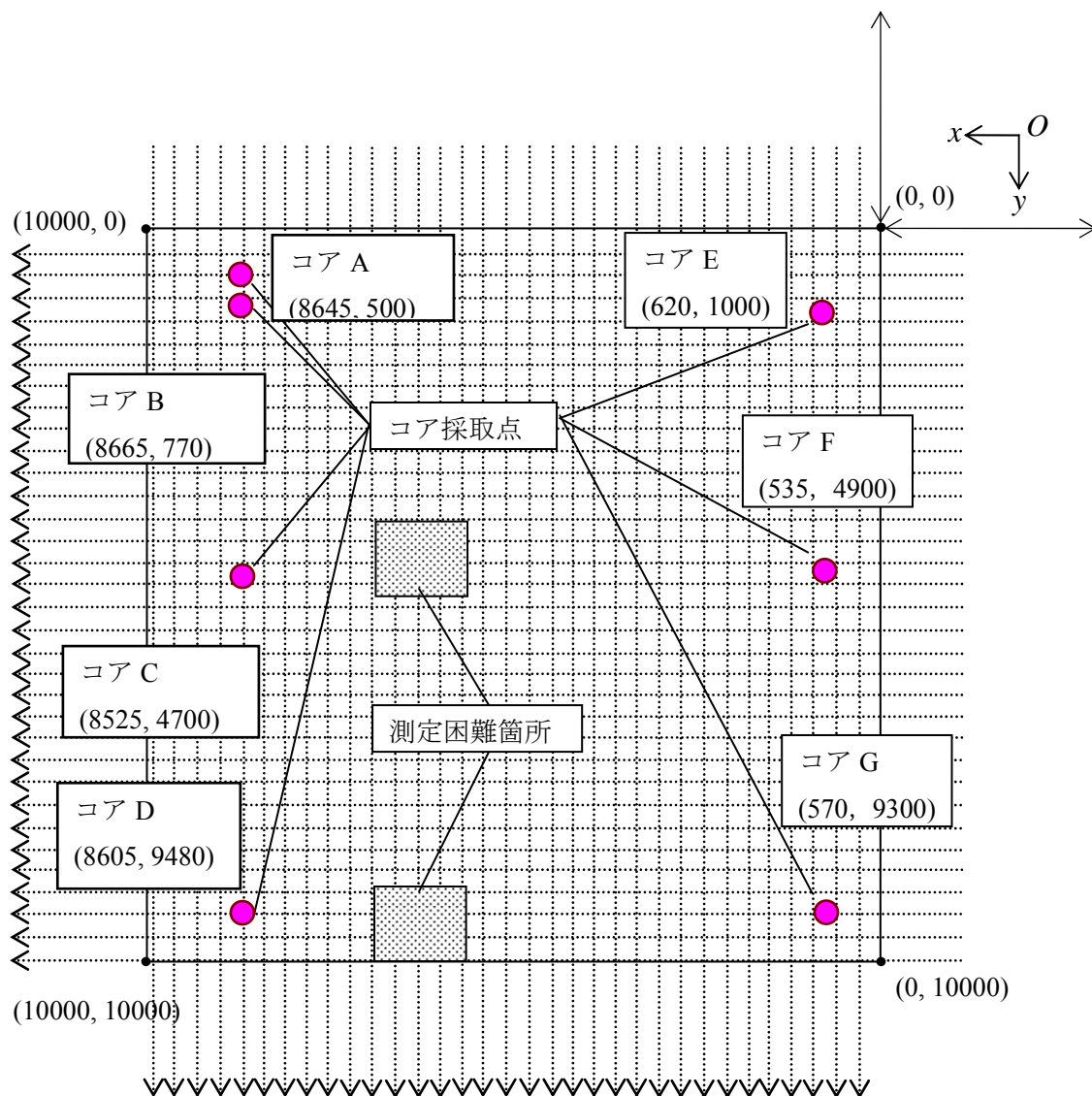


図 11-1-2 海上デッキ座標

また，2010年度は北棧橋においても調査を行った．北棧橋詳細を以下に示す．



写真 11-1-1 北棧橋 2 面



写真 11-1-2 北棧橋 2 面 測定面



写真 11-1-3 北棧橋 3 面 測定面

北棧橋 2 面

試料採取位置
(x,y)=(1505, 2250)

海

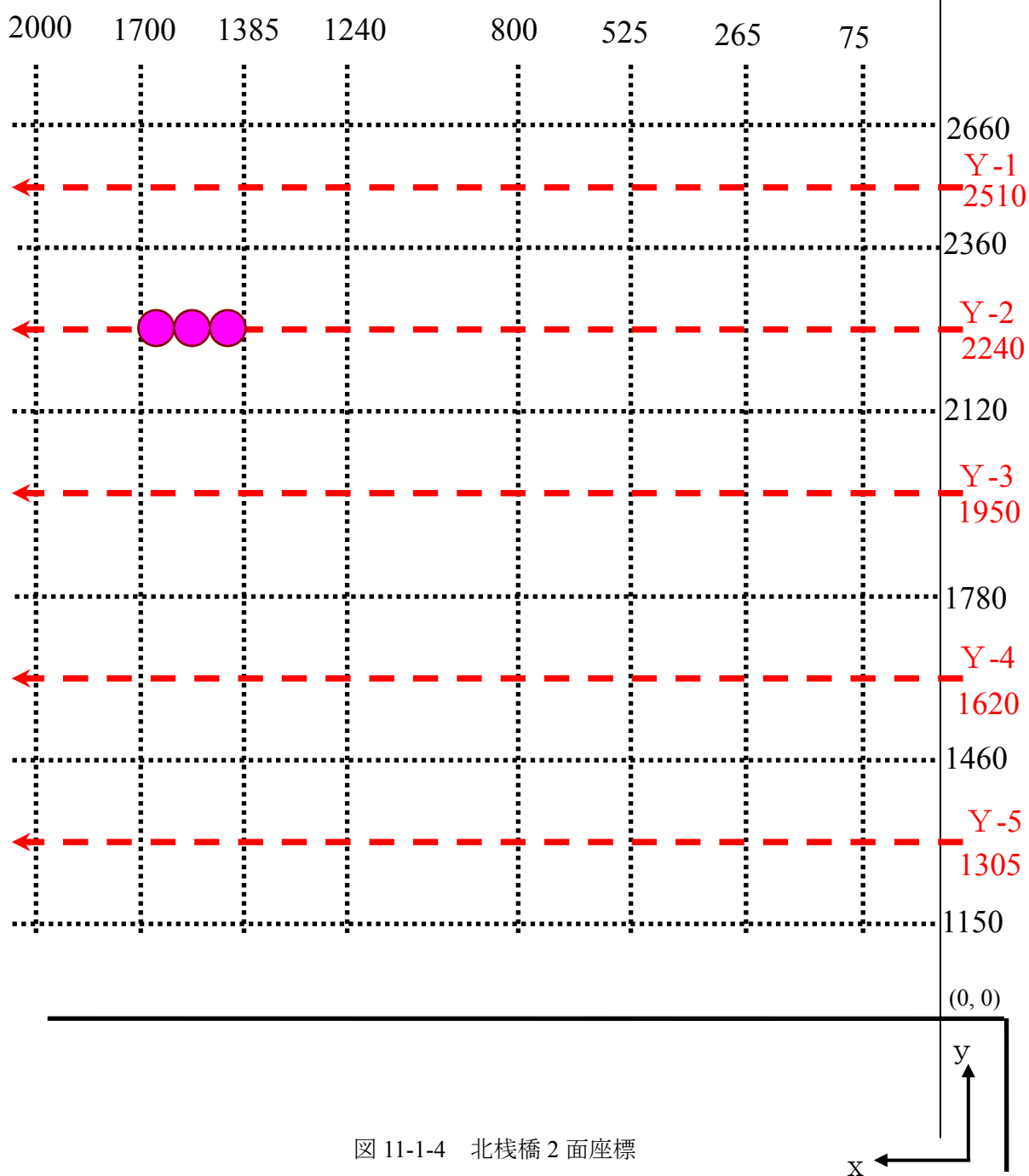
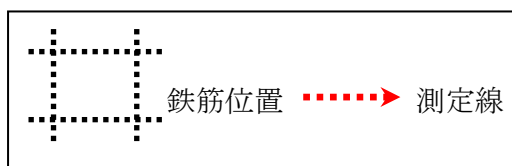


图 11-1-4 北棧橋 2 面座標

北棧橋3面

試料採取位置
(5300, 2350)

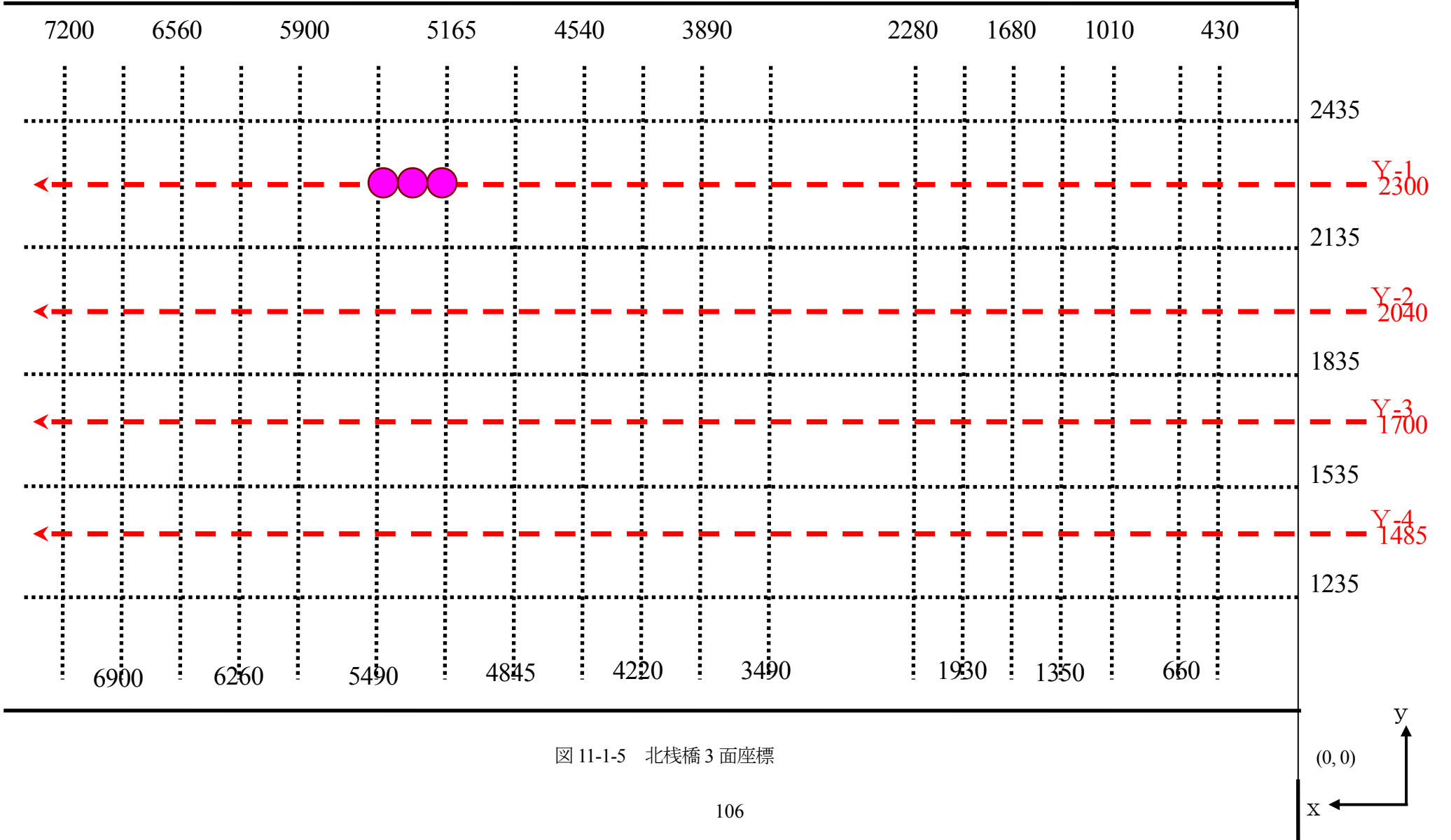


图 11-1-5 北棧橋3面座標

11.1.2 コア試料による塩化物量の実測値

海上デッキにおけるコア A～G の塩化分析結果を図 11-1.6 に、北棧橋 2 面および 3 面のコア A-2 およびコア A-3 の塩分分析結果を図 11-1.7 に示す。

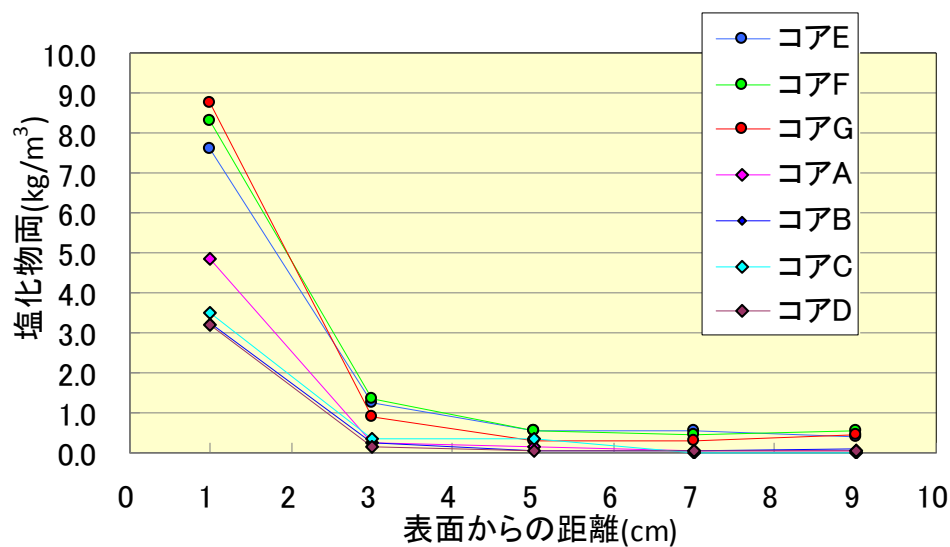


図 11-1-6 海上デッキにおける平均塩化物量の実測値

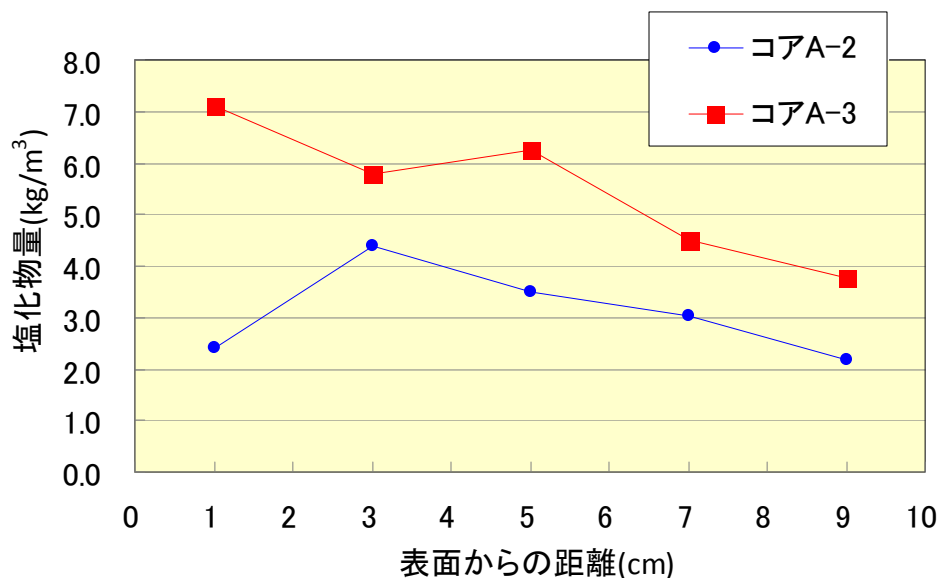


図 11-1-7 北棧橋における平均塩化物量の実測値

11.1.3 経年調査による塩分量推定

磯子火力発電所の調査結果を表 11-1-1 に示す。また、2009 年度のデータから得られた推定式による推定値と 2009 年度と 2010 年度の調査結果を組み合わせる算出した推定値の実測値との比較を図 11-1-8 に示す。さらに、2009 年度と 2010 年度の調査結果から得られた推定式による推定値を 3D 地表マップ作成ソフト（Golden software Surfer）を利用し、広範囲にマッピングした図を 11-1-9～図 11-1-11 に示す。さらに海上デッキの推定塩分量を 3D 化したものを、図 11-1-12 および図 11-1-13 に示す。

表 11-1-1 調査結果

現場	試料名	塩化物 イオン量	振幅	比誘電率	
磯子	海上デッキ A	1.15	7.8	16.9	
	海上デッキ B	1.24	4.3	16.9	
	海上デッキ C	1.22	5.5	16.9	
	A-2	1.48	8.6	13.0	
	A-3	2.75	4.7	14.3	
	2009 海上デッキ		1.04	12.2	14.9
			0.71	12.9	13.3
			0.81	12.2	9.7
			0.68	9.0	17.3

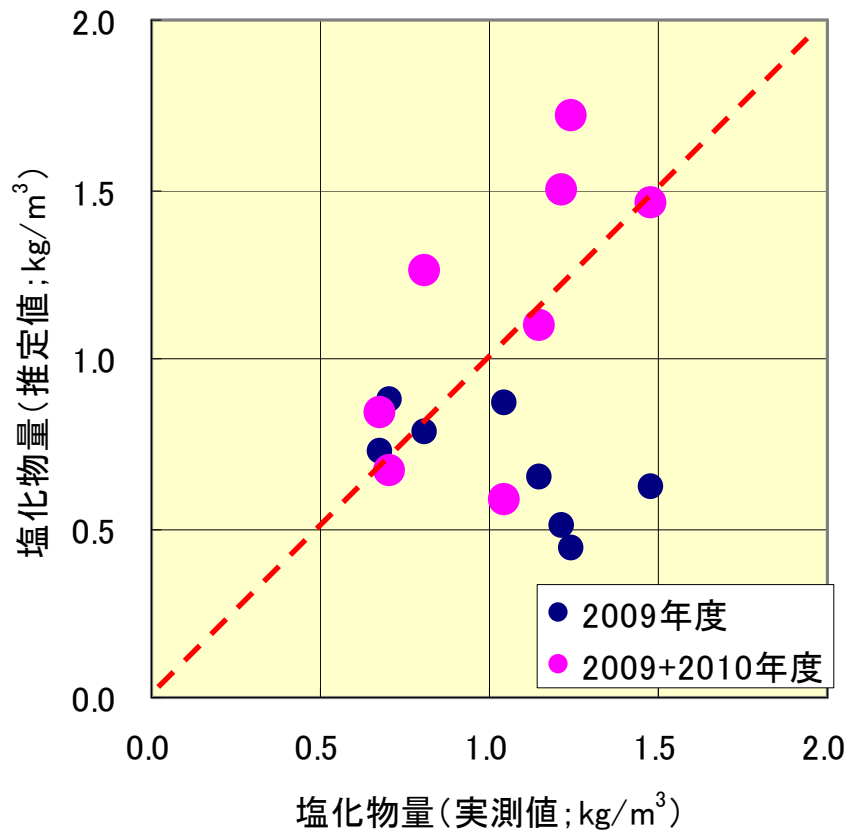


図 11-1-8 推定値と実測値の比較

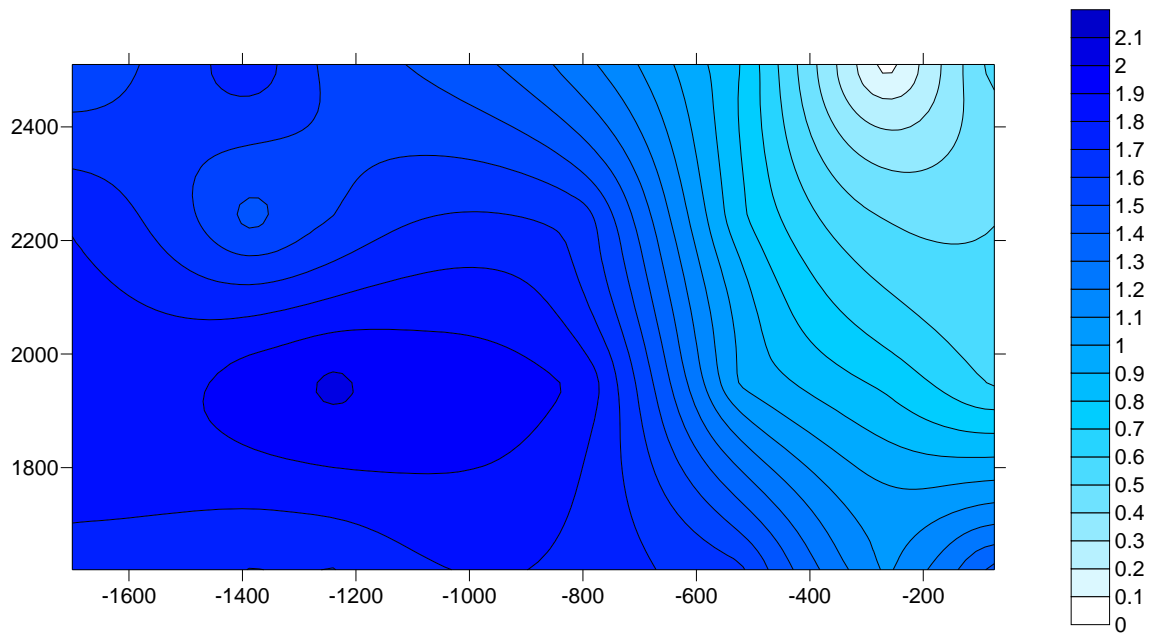


図 11-1-9 北棧橋推定塩分量マッピング図

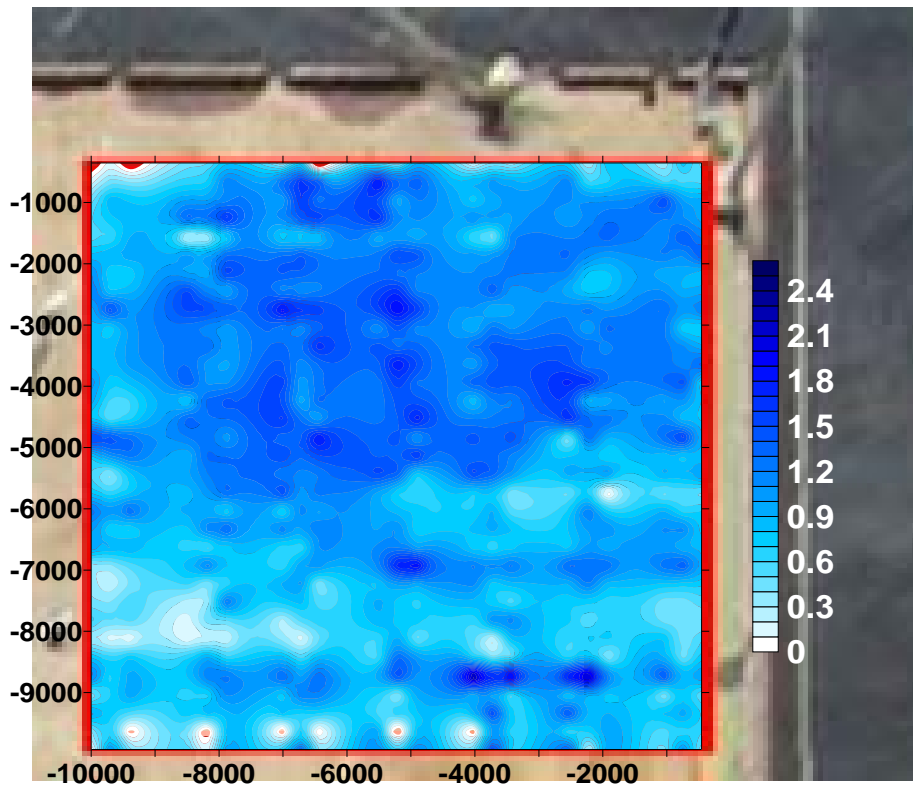


図 11-1-10 塩分量の平面分布と現場写真の合成 (2009 年度)

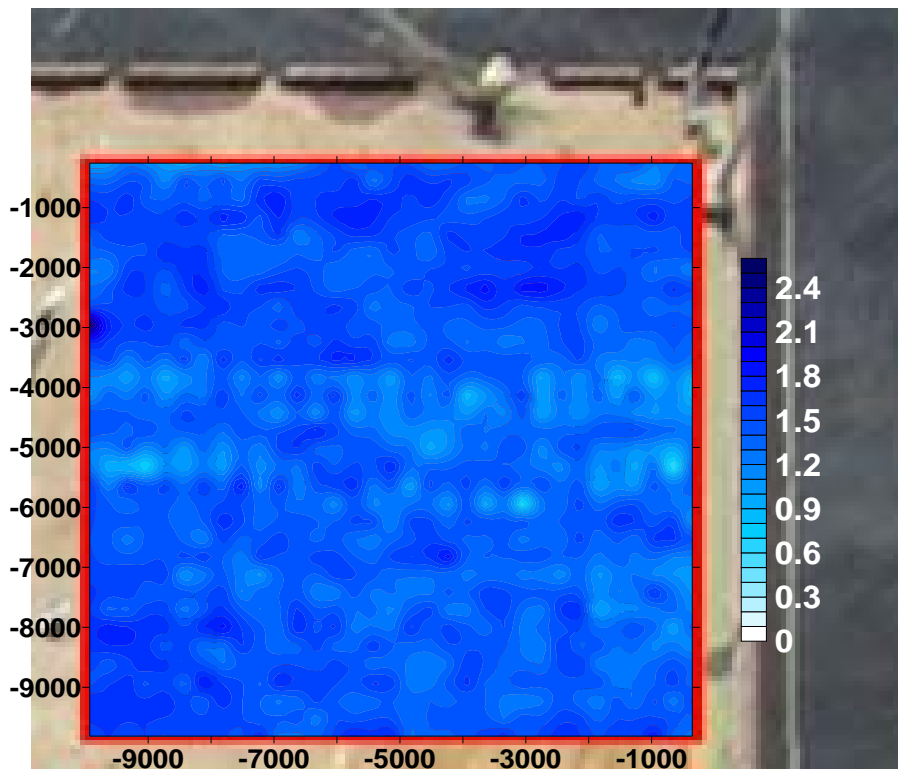


図 11-1-11 塩分量の平面分布と現場写真の合成 (2010 年度)

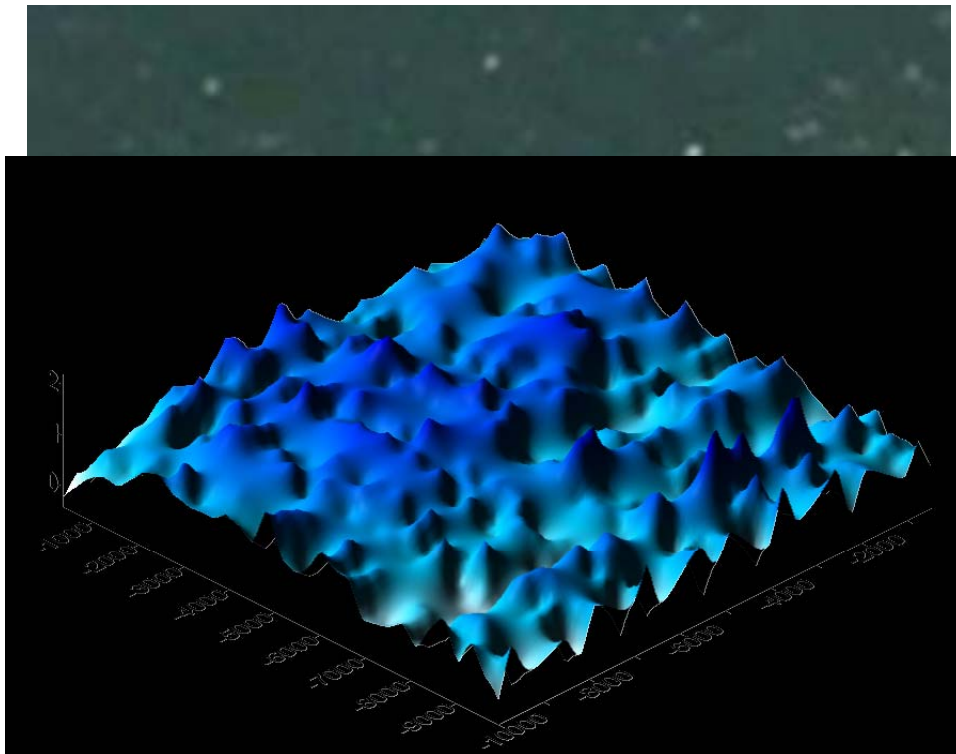


図 11-1-12 塩分量の平面分布と現場写真の合成 (2009 年度)

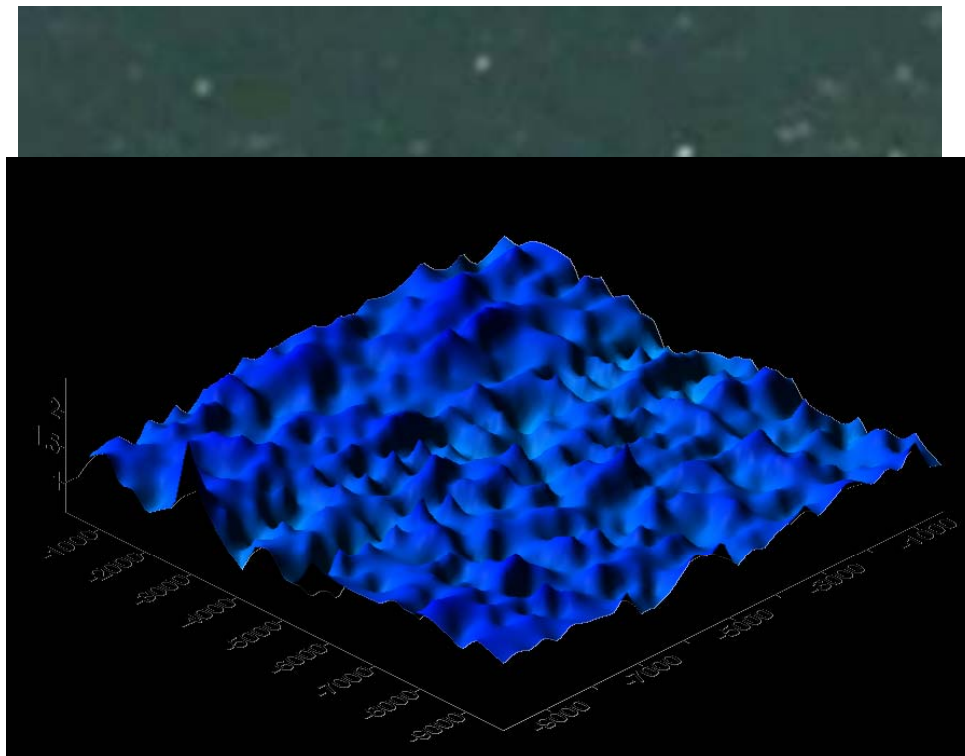


図 11-1-13 塩分量の平面分布と現場写真の合成 (2010 年度)

11.1.4 考察

図 11-1-6 からコア A～コア D を比較するとコア A の塩分量が比較的高い結果となった。これは海水面との距離が影響していると考えられる。図-20 から、塩化物量の低いコア A～コア D と塩化物量の高いコア E～コア G のデータを用いることによって精度の高い推定式を算出できたと思われる。図-21、図-22 から海水面に近い付近（上側）の塩分量が高いことがわかる。経年調査を行い、塩分量の推定分布を作成することにより、塩化物量分布を視覚で捉えることが可能となりどの部分において高濃度であるのかが推定できると考えられる。

11.2 高砂火力発電所

11.2.1 調査結果

表 11-2-1 に高砂火力発電所の調査結果を示す。また、コア試料の塩分分析結果を図 11-2-1 に示す。

表 11-2-1 平均塩化物イオン量と電磁波測定値

現場	試料	塩化物イオン量	振幅	比誘電率
高砂	コア No.1	4.63	9.0	16.5
	コア No.2	4.19	6.7	20
	コア No.3	6.35	13.8	15.4
	コア No.4	5.91	12.6	13.5
	コア No.7	5.50	7.1	21.1
	コア No.8	5.71	5.9	26.6
	コア No.9	3.51	10.2	16.8
	コア No.10	3.35	10.6	13.4
	コア No.13	4.04	12.2	13.9
	コア No.14	8.23	8.7	17.3

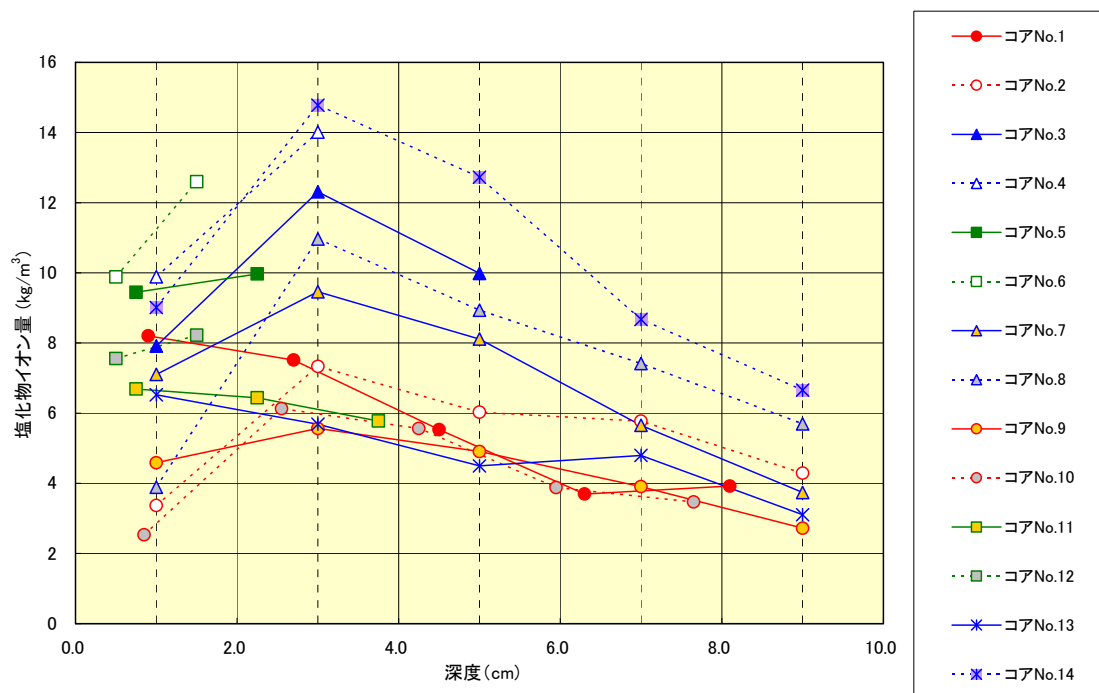


図 11-2-1 平均塩化物物量の実測値

11.2.2 推定式の算出

採取した試料から、上記の 10 箇所の結果を用いて算出した塩化物イオン量推定式と重相関を、以下に示す。

$$C_c = -0.0325\alpha + 0.0114\varepsilon + 2.96 \quad \text{重相関 } 0.280$$

C_c : 塩化物イオン量推定値(kg/m³) α : 振幅値(%) ε : 比誘電率

推定式を算出したところ、重相関が低いものとなった。施工から 40 年以上経過していることもあり、高砂火力の試料に関しては、表面が中性化していることから、塩化物イオン量の拡散分布が箇所によって異なることがわかった。高砂の 10 試料の塩化物イオン量の拡散分布を、中性化が進んでいる試料を図 11-2-2、中性化進行の程度が低い試料を図 11-2-3、浅い層までしか結果が得られていない試料を図 11-2-4 に示す。

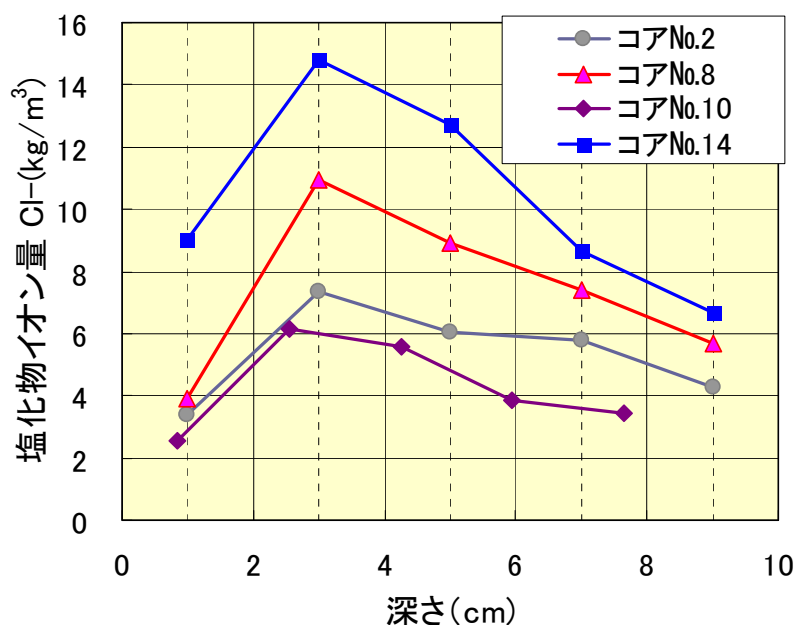


図 11-2-2 中性化が進行している試料

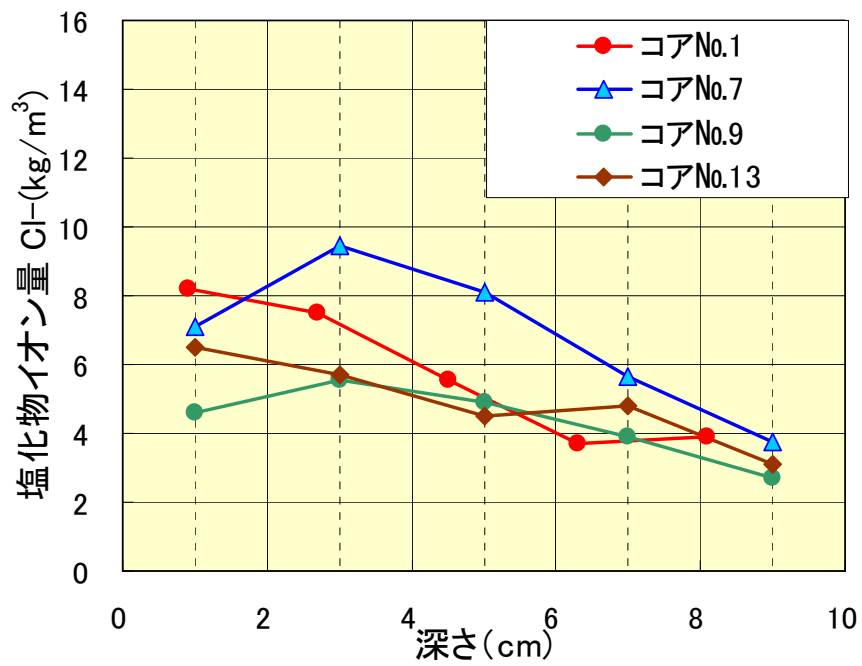


図 11-2-3 中性化の進行の程度が低い試料

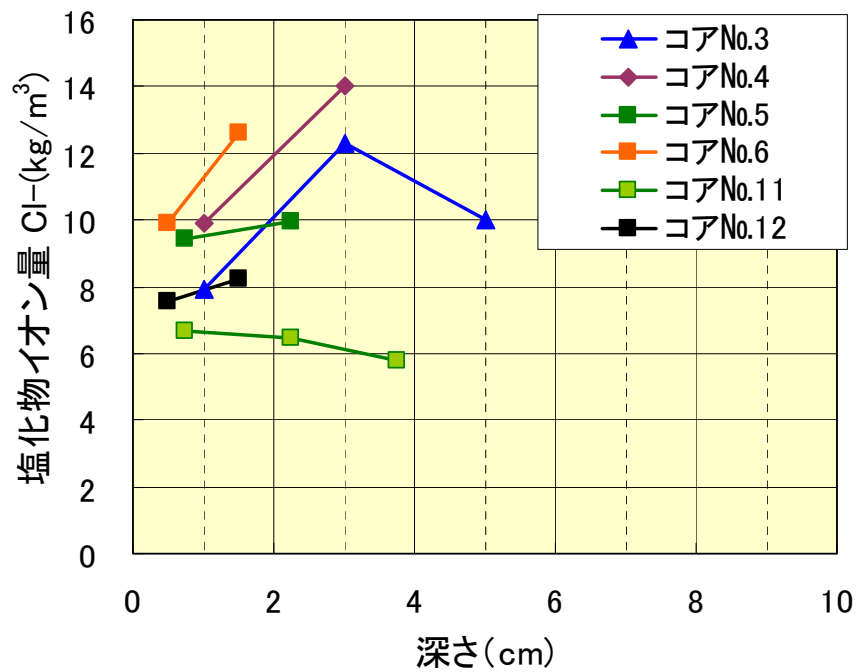


図 11-2-4 浅い層までの結果の試料

表 11-2-1 の 10 試料の結果を用いて算出した塩化物イオン量推定式は、図 11-2-2～図 11-2-4 に示した塩化物イオン量の拡散分布や、採取した層の深さなど、ばらつきの多い範囲を含んでいるために重相関が低くなったと考えられる。この結果から、かぶり深さまで拡散分布が得られている試料の中から、中性化が比較的進んでいないと考えられる図 11-2-3 に示した 4 試料を用いて重回帰分析を行い、塩化物イオン量推定式を算出した。4 試料の詳細を以下の表 11-2-2 に示す。なお、中性化が進んでいない試料は、表層と 2 層目での塩化物イオン量の差が 3kg/m^3 以下であるものとした。

表 11-2-2 平均塩化物イオン量と電磁波測定値

現場	試料名	平均塩化物イオン量(kg/m^3)	振幅	比誘電率
高砂	コアNo.1	4.629	9.0	16.5
	コアNo.7	5.496	7.1	21.1
	コアNo.9	3.510	10.2	16.8
	コアNo.13	4.039	12.2	13.9

上記の 4 箇所の結果を用いて算出した塩化物イオン量推定式と重相関を、以下に示す。

$$C_c = -0.355\alpha - 0.0291\varepsilon + 8.34 \quad \text{重相関 } 0.797$$

C_c : 塩化物イオン量推定値(kg/m^3) α : 振幅値(%) ε : 比誘電率

上記の推定式から、推定値を算出し、実測値との比較を図 11-2-5 に示す。

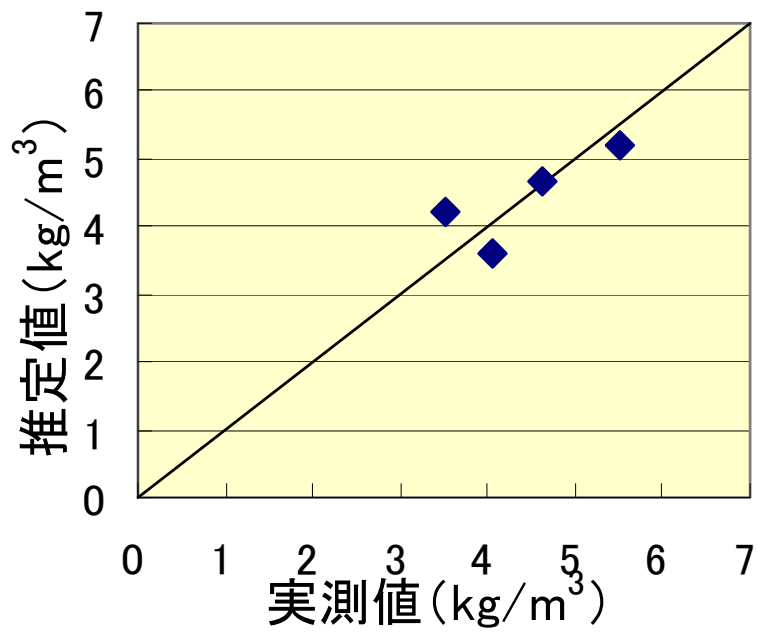


図 11-2-5 塩化物イオン量の推定値と実測値

11.2.3 考察

データが得られている 10 試料で重回帰分析を行ったところ、重相関が低くなる結果となった。高砂火力の現場は中性化が著しく進んでいる箇所があり、塩分分析の結果でも、表層より 2 層目の方が、塩化物イオン量が多い試料があった。中性化の進行があまりみられない 4 試料を用いて重回帰分析を行うと、重相関が 0.797 と向上する結果となった。本検討により、中性化の進行がみられる場合、電磁波測定での塩分量推定にはさらなる検討が必要であると考えられる。

11.3 石川火力発電所

11.3.1 調査結果

表 11-3-1 に石川発電所の調査結果を示す。また、コア試料の塩分分析結果を図 11-3-1 に示す。

表 11-3-1 石川火力 平均塩化物イオン量と電磁波測定値

現場	試料名	塩化物イオン量	振幅	比誘電率
石川	桁-1	3.46	12.2	14.1
	桁-2	5.58	6.7	12.8
	スラブ 1	1.15	11.6	16.6
	スラブ 2	0.98	11.4	18.0
	スラブ 3	1.24	12.9	14.4

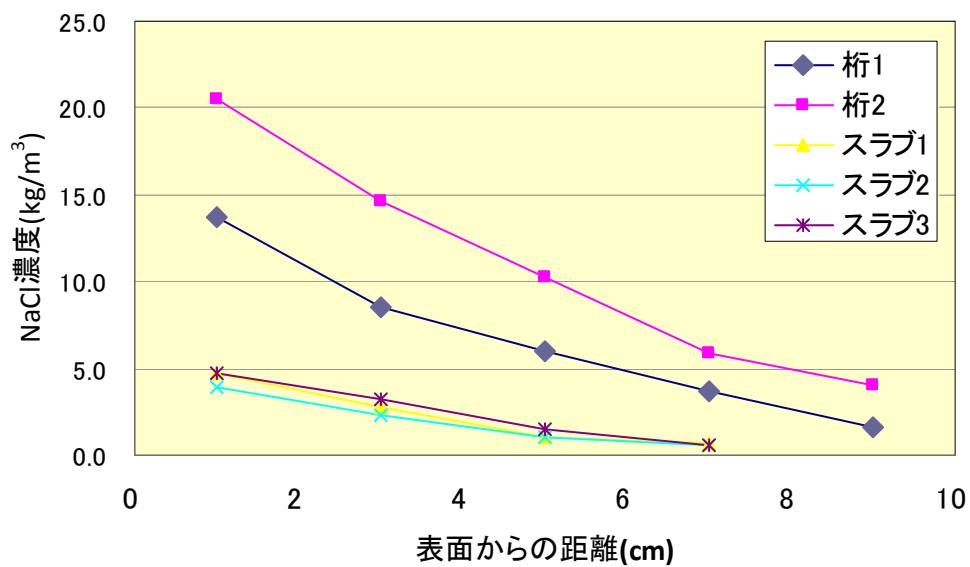


図 11-3-1 平均塩化物量の実測値

11.3.2 推定式の算出

表 11-3-1 の 5 試料の結果を用いて算出した塩化物イオン量の推定式と重相関を、以下に示す

$$C_c = -0.450\alpha + 0.537\varepsilon + 15.531 \quad \text{重相関 } 0.947$$

C_c : 塩化物イオン量推定値(kg/m³) α : 振幅値(%) ε : 比誘電率

上記の推定式から、推定値を算出し、実測値との比較を図 11-3-2 に示す。

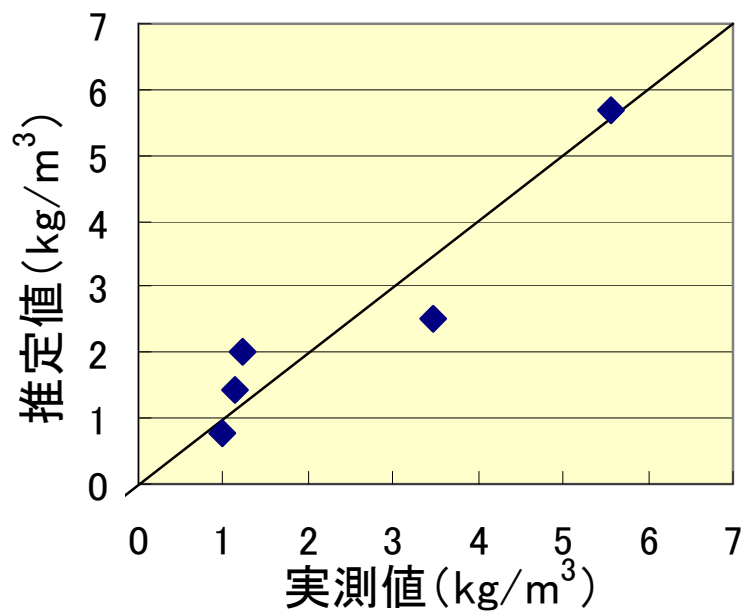


図 11-3-2 塩化物イオン量の推定値と実測値

11.3.3 推定塩化物量のマッピング

石川火力発電所のスラブ上面での測定位置を写真 11-3-1 に、推定塩分量分布を写真 11-3-2 に示す。推定塩分量分布の 3D マッピングを図 11-3-3 に示す。また桁の推定塩分量分布を写真 11-3-3 に、マッピングを図 11-3-4 に示す。



写真 11-3-1 測定位置

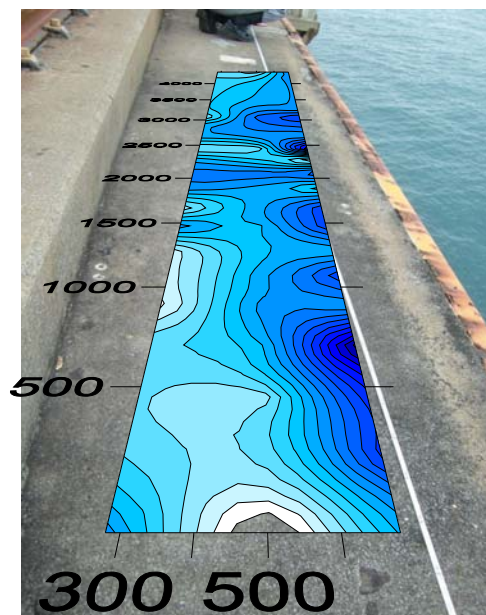


写真 11-3-2 測定位置と推定塩分量分布

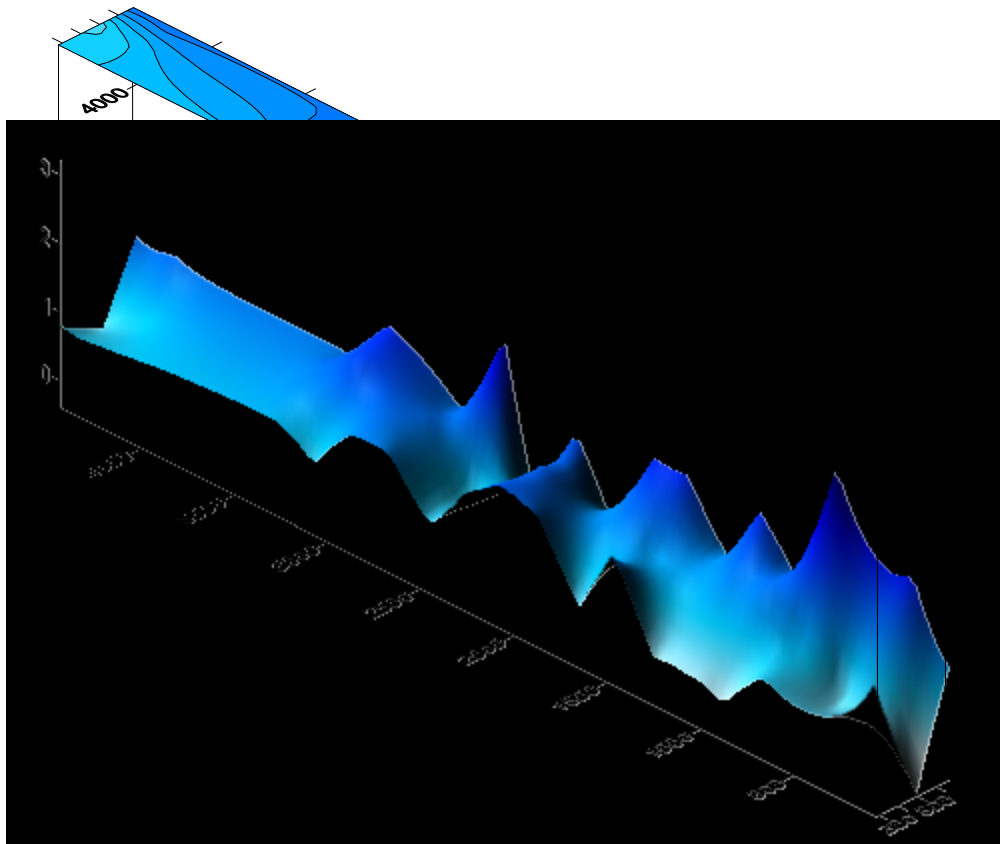


図 11-3-3 推定分布 3D マッピング

桁部

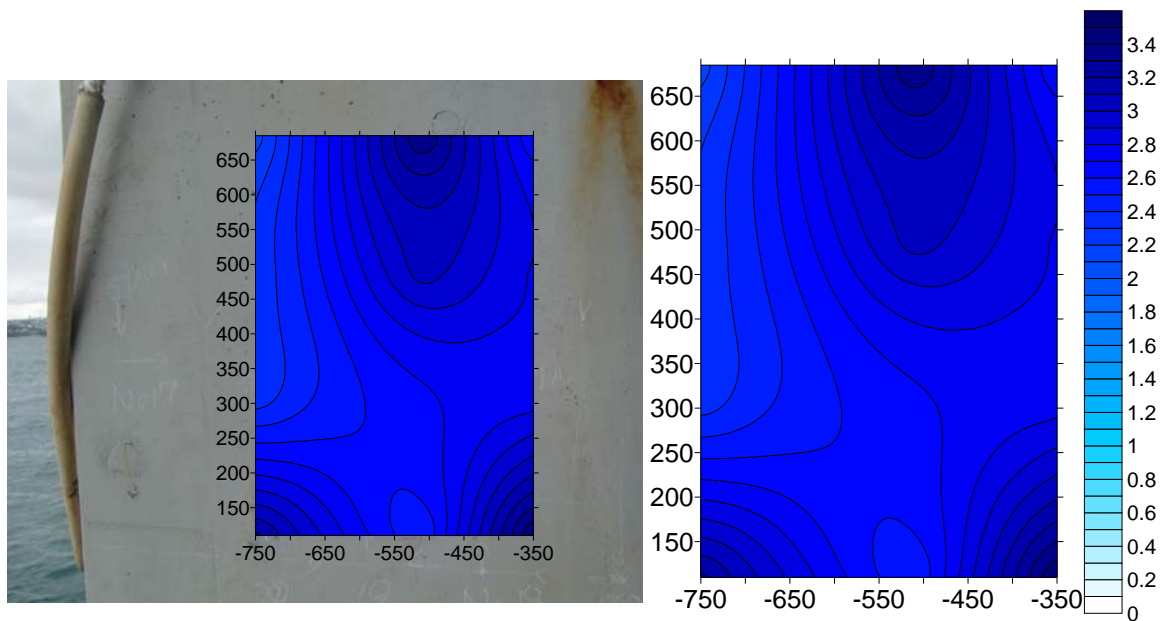


写真 11-3-3 測定位置と推定塩分量分布 図 11-3-4 塩化物イオン量 推定分布

11.3.4 考察

石川火力の試料を用いた重回帰分析の結果は 0.947 となり、今までの現場の中で最も高い相関が得られた。係数に着目すると、振幅値より比誘電率の方が大きくなった。この結果より、含水状態や鉄筋位置を考慮した比誘電率も、振幅値と同等に塩分量推定に関わってくる可能性があるのではないかと考える。図-9.9 と平均塩化物イオン量で見ても、0~5kg/m³ の幅広い塩化物イオン量を含む箇所の試料と電磁波測定値を網羅しており、石川火力内で考えると、どの測定面にも適用できるような汎用性の高い推定式を算出できたのではないかと考えられる。

図 11-3-4 のスラブ上面における推定分布を見ると、海側に近い箇所ほど塩化物イオン量を多く含む結果となった。これは、海水面との距離が近い方が海水の飛沫作用を多く受けるためだと考えられる。

11.4 複数現場での推定

11.4.1 推定式の算出

構造物，4回の調査結果を表 11-4-1 に示す。

表 11-4-1 フィールド調査結果

現場	試料名	塩化物イオン量	振幅	比誘電率	W/C	施工後経過年	
石川	桁-1	3.46	12.2	14.1	55	23	
	桁-2	5.58	6.7	12.8	55	23	
	スラブ1	1.15	11.6	16.6	55	23	
	スラブ2	0.98	11.4	18.0	55	23	
	スラブ3	1.24	12.9	14.4	55	23	
磯子	海上デッキA	1.15	7.8	16.9	45	10	
	海上デッキB	1.24	4.3	16.9	45	10	
	海上デッキC	1.22	5.5	16.9	45	10	
	A-2	1.48	8.6	13.0	45	10	
	A-3	2.75	4.7	14.3	45	10	
	2009 海上デッキ		1.04	12.2	14.9	45	10
			0.71	12.9	13.3	45	10
			0.81	12.2	9.7	45	10
		0.68	9.0	17.3	45	10	
高砂	コアNo.1	4.63	9	10.5	55	40	
	コアNo.7	5.50	7.1	12.3	55	40	
	コアNo.9	3.51	10.2	14.6	55	40	
	コアNo.13	4.04	12.2	13.9	55	40	

表 11-4-1 に示す結果から平均塩化物量推定のための重回帰分析を行った。重回帰分析に用いる説明変数の検討ケースは電磁波レーダから得られる振幅値と比誘電率に加え、水セメント比、施工後経過年とした。得られた推定式を以下に示す。

説明変数：振幅値 比誘電率

↓

$$C_c = -0.193 \alpha - 0.399 \varepsilon + 9.88$$

説明変数：振幅値 比誘電率 水セメント比

$$C_c = -0.322 \alpha - 0.349 \varepsilon + 0.245 W / C - 1.88$$

説明変数：振幅値 比誘電率 水セメント比 施工後経過年

$$C_c = -0.297 \alpha - 0.296 \varepsilon + 0.142 W / C + 0.0498 T + 1.27$$

C_c :塩化物量(kg/m³), α :振幅値, ε :比誘電率, W/C :水セメント比, T :施工後経過年

上記の式を用いた推定値と実測値の比較を図 11-4-1 に示す。また重相関がもっとも高い、振幅値、比誘電率、水セメント比および施工後経過年を用いた推定値をフィールド別に図 11-4-2 に示す。

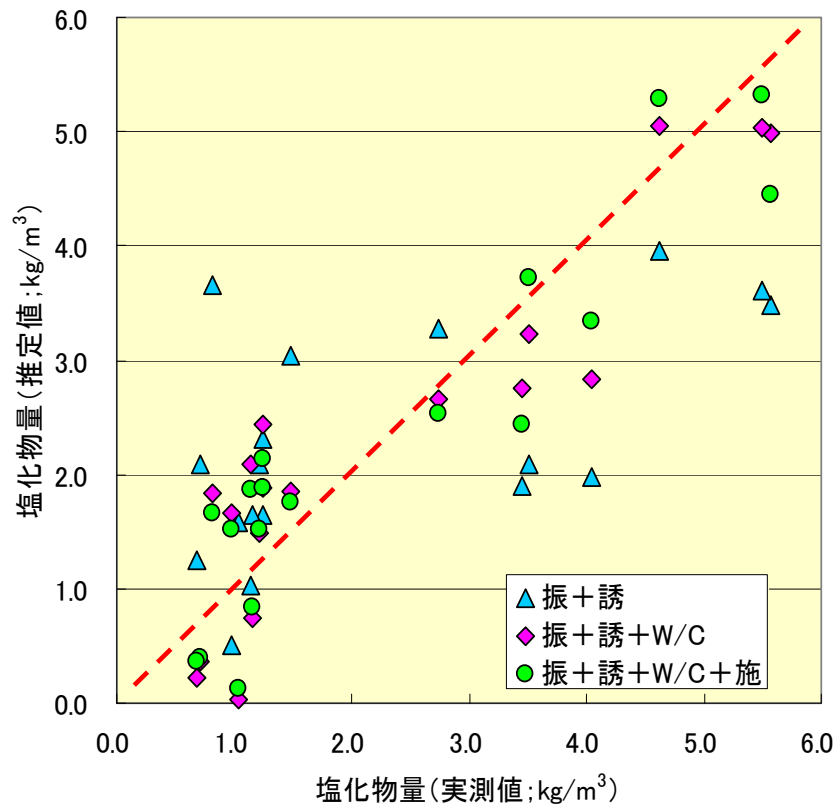


図 11-4-1 塩化物量の推定値と測定値との比較

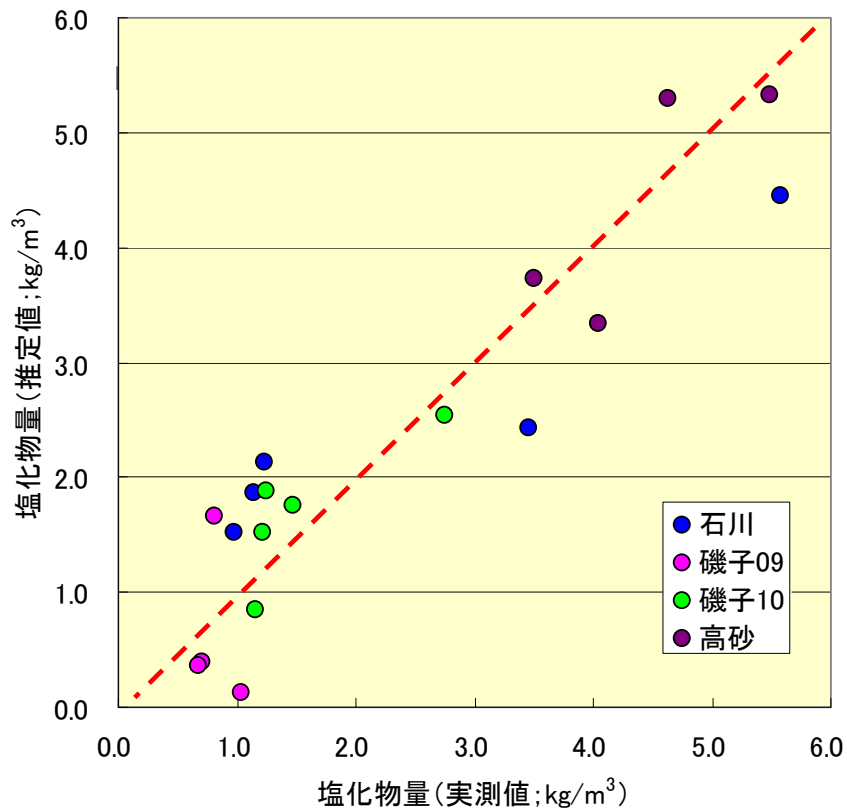


図 11-4-2 塩化物量の推定値と測定値との比較

11.4.2 考察

4箇所フィールドで得られた18試料を用いて、説明変数を振幅値、比誘電率とした時の重相関は0.583であった。さらに説明変数に施工時の水セメント比を加えることで重相関0.908となり、施工後経過年数を加えることで重相関0.922と高い相関関係を示した。

また、振幅値と比誘電率、水セメント比および施工後経過年を説明変数としたもっとも創刊の高い式を用いて、推定した平均塩化物量とコアの化学分析結果から得られた平均塩化物量とを各フィールド別で比較すると、各フィールドの平均塩化物量は $0.68 \text{ kg/m}^3 \sim 5.58 \text{ kg/m}^3$ とバラつきがあるもの高い相関関係を示していることがわかる。

以上より、式(3)を用いて含有塩分量の異なるコンクリート構造物の平均塩化物量を推定することは可能であると思われる。

第 12 章 結論

本研究では、電磁波法及びインピーダンス法によりコンクリート内部の塩分量推定を行い非破壊試験での実構造物への適用を目的とし、室内実験及び実構造物での測定を行った。本研究で得られた結果について以下に示す。

12.1 電磁波法の結果

振幅値は時間の経過に伴って増加傾向にあった。また、水セメント比が大きくなるとともに減少する傾向にあった。そして、塩水浸漬と真水浸漬においては塩水を浸漬させたほうが振幅値は小さくなる傾向にあった。このことから、振幅値は水分、単位セメント量、塩化物イオンにより影響を受けると考える。また、かぶりが深くなるとともに振幅値が減少することが明らかになった。さらに、人工海水と 3%塩化ナトリウム水溶液とで振幅値あまり差異が見られなかったことから振幅値に対する塩素イオン以外のイオンの影響は小さいものと考えられる。

比誘電率については、鉄筋のかぶり深さのみに依存することが明らかとなった。

12.2 インピーダンス法の結果

かぶりが深くなるとともに、実効値は減少することが明らかになった。これは水分の浸漬による影響がでているのではないかと考えられる。また、最大実効値が得られる周波数帯域については 38MHz であった。

塩水よりも真水を浸漬させたほうが、実効値が大きくなる傾向にあった。塩分浸漬によって実効値は低下することが明らかとなった。このことより、実効値は水分及び、塩分の双方の影響を受けることが明らかになった。

12.3 電磁波法およびインピーダンス法による推定

水セメント比 45%および 55%については、推定値と測定値がほぼ一致する結果となったことから面的測定である電磁波法と、点的測定であるインピーダンス法を組み合わせることで塩分量曲線の推定が可能であるといえる。しかし、塩化物量がかぶりよりも深く浸透している水セメント比 65%の場合には推定値と測定値が大きく異なる結果となったことから本研究の推定方法では十分評価することが難しいと考える。

12.4 実構造物への適用

同一現場を経年調査し、得られた実測値を用いて重回帰分析より推定式を算出することで塩害調査の課題であった経時変化を確認することが可能となった。

複数の現場を対象とした場合でも、説明変数に水セメント比や施工経過年を加えることによって高い相関の推定式を算出することができた。

室内試験において、かぶり深さ以降まで塩分が浸漬していなければ、電磁波法およびインピーダンス法を組み合わせることでコンクリート内の塩分量分布を推定することが可能であることを確認できた。また、施工条件や環境条件が異なる実構造物においても、電磁波を用いて塩化物量を推定することが可能であるということが確認できた。

参考文献

- 1) 梅原秀哲, 古木守靖: コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向, 土木学会, pp.41-51, pp141-142, 2003 年
- 2) 藤本恭一, 新井淳一, 須田久美子, 溝淵利明: 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 年
- 3) 神谷武智, 須田久美子, 新井淳一, 溝淵利明: 電磁波を用いた鉄筋コンクリート中の塩分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 年
- 4) 新井淳一, 溝淵利明, 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化物測定に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1515-1520, 2002 年
- 5) 太田資郎, 藤原鉄朗, 松山公年, 金本康宏: レーダ計測法によるコンクリート強度推定方法の開発, こうえいフォーラム, pp.151-157, 1999 年
- 6) S.Oota, T.Fujiwara, K.Matsuyama, Y.Kanemoto: Evaluation of Concrete Strength using Rader Method on Structures, Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000, pp.549-557-1000 年
- 7) 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 (吉村明彦): 委員会報告書 Part II 電磁波法 3.電磁波レーダ法, 日本コンクリート工学協会, pp.132-142, 2001 年
- 8) 小林豊治, 米澤敏男, 出頭圭三: コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ3 小林一輔編集 鉄筋腐食の診断, 森北出版株式会社, pp.174, 1993 年

謝辞

本研究を行うに際しまして、終始御懇篤なる御指導を賜りました溝渕利明教授に厚く御礼を申し上げます。また、多くの御助言および御協力を戴きました満木泰郎教授，鹿島建設(株)技術研究所 芦澤良一様，横関康祐様，リテックエンジニアリング(株) 新井淳一様，(株)開発設計コンサルタント 野嶋潤一郎様に深く感謝いたします。実験に際し，適切な御助言，御配慮を戴きました山本幸雄様，共同で研究を行った，村田和哉氏，池田大樹氏，大森悠起子氏，佐藤涼氏，また法政大学大学院生，今野浩孝氏，綱島隆将氏，松土雄紀氏，室野井敏之氏，小菅望氏，竹内直也氏，細川大介氏，橘夏海氏，多くのご協力を頂いた法政大学コンクリート材料実験室の赤熊宏哉氏，荒谷一樹氏，大野拓真氏，黒部瑛介氏，小島龍樹氏，多田里美氏，寺田弘基氏，橋本亮良氏，日野陽太氏，吉田昇平氏に御礼申し上げます。

法政大学大学院 工学研究科 建設工学専攻
09R5115 田中 峻