法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-13

非破壊試験法を用いたコンクリート内部の塩分量分布の推定に関する研究

佐竹, 伸康 / SATAKE, Nobuyasu

(発行年 / Year)
2007-03-24
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2007-03-24
(学位名 / Degree Name)
修士(工学)
(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)

2006 年度　修士論文

非破壊試験法を用いたコンクリート内部の塩分量分布の推定に関する研究

法政大学大学院　工学研究科

建設工学専攻　修士課程

０５Ｒ５１０６　　佐竹（サタケ）　伸康（ノブヤス）

（指導教員：溝渕　利明教授）

非破壊試験法を用いたコンクリート内部の塩分量分布の推定に関する研究

法政大学大学院　工学研究科　建設工学専攻　修士課程
05R5106　　佐竹　伸康

2007 年 2 月 20 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・検討及び，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作成できる可能性が見出せた.

STUDY ON PRESUMPTION OF DISTIBUTION OF SALINITY IN CONCRETE STRUCTURES BY USES OF NONDESTRUCTIVE TESTING METHOD

By
05R5106 Nobuyasu SATAKE

Graduate Course of Civil and Environmental Engineering , Hosei University,

20th February, 2007

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 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　背景　・・1
1.2　目的　・・2

第2章　既往の研究
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　・・・１８
2.8　埋設電極を用いた交流インピーダンス法の提案　・・・・・・・・・・・・１９

第3章　使用材料及び実験方法
3.1　使用材料　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２７
3.2　配合条件　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２９
3.3　供試体概要　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２９
3.4　実験方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３０

第4章　電磁波法の結果
4.1　埋設される鉄板筋かぶり深さ毎の比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・３６
4.2　スランプ毎の比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４２
4.3　水セメント比毎の比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４６
4.4　塩水浸漬と真水浸漬の比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５２
4.5　浸漬水溶液の濃度別比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５７

第5章　インピーダンス法の結果
5.1　埋設される電極深さ毎の実効値の変化　・・・・・・・・・・・・・・・・・６１
5.2　スランプ毎の最大実効値の変化　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６８
5.3　水セメント比毎の最大実効値の変化　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７８
5.4　電極深さ方向における最大実効値の変化　・・・・・・・・・・・・・・・・８７
5.5　塩水浸漬と真水浸漬の比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９１
5.6　浸漬水溶液の濃度別比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０４
5.7　かぶり深さ 10cm との差分　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０９

第6章　塩分量の推定値及び，実測値との比較
6.1　コア採取データによる試験結果　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１４
6.2　塩分量の推定方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１７
6.3　インピーダンス法の実験データを用いた塩分量推定結果　・・・・・１１８
6.4　電磁波法の実験データを用いた塩分量推定結果　・・・・・・・・・・１２１
6.5　電磁波法及び，インピーダンス法を用いた塩分量の推定曲線　・・・１２４

第7章　実構造物での実験結果
7.1　目的　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２７
7.2　実施場所及び，実施条件　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２７

7.3　試験方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２８
7.4　実施箇所における塩分量分布の推定　・・・・・・・・・・・・・・・・１２９
7.5　コア採取データによる試験結果　・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３３
7.6　推定値と実測値との比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３５

第8章　結論
8.1　結論　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３９

参考文献

謝辞

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，非破壊試験である電磁波反射法及び，インピーダンス法によるコンクリート構造物内部の塩化物イオン量の把握を目的とし，研究を行う。

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。

$$\varepsilon r = \varepsilon' - i\varepsilon'' \qquad (2.1)$$

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間隙率，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
砕石	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気的性質（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

$$V=\frac{C}{\sqrt{\varepsilon_r}} \qquad (2.2)$$

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

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

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，手順を遡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－ΔＬ）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－ΔＬ）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，（Ｔｒ－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Ｖc で割ることにより求められるとしている。また，Ｔr，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（Ｔｒ－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Ｖｇ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。

$$\begin{aligned} Vg &= D/\{(T_1-Tr)-(T_0-Tr)\} \\ &= D/\{(T_1-Tr)-(\Delta L/Vc)\} \qquad (2.4) \end{aligned}$$

ここで，Ｄは送受信アンテナ間距離を示す。

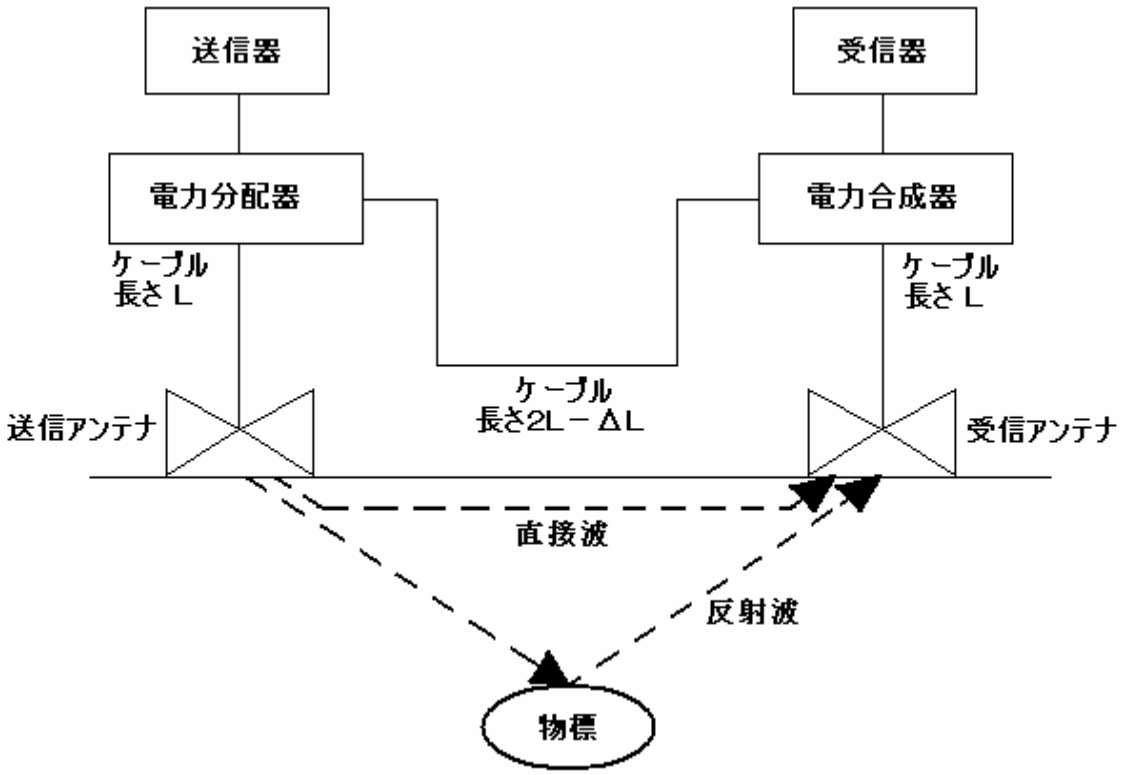


図 2-2-1　電磁波レーダーの概要

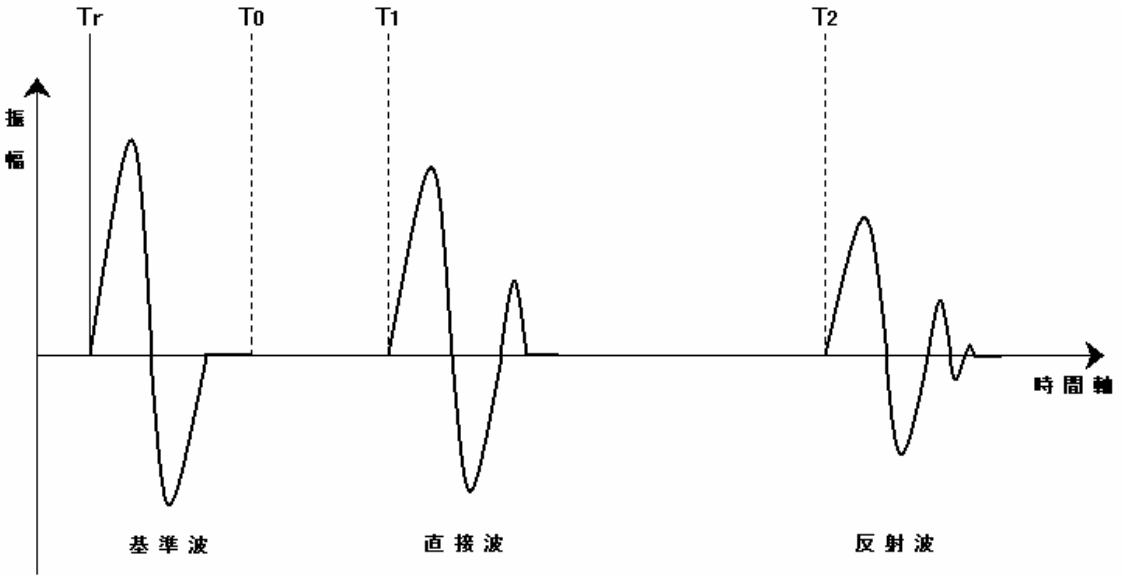


図 2-2-2　モデル化受信波形

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。

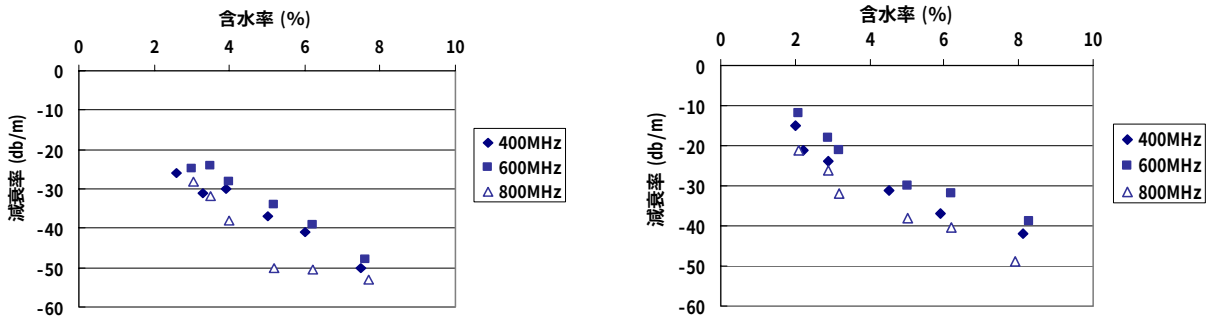
一方，複素誘電率の虚数部と体積水分率の傾きは，コンクリートの空気量と体積水分率の変化によって大きく異なる。すなわち，複素誘電率の実数部がコンクリートの体積水分率に影響し，虚数部がコンクリートの有効間隙率に影響する。

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。

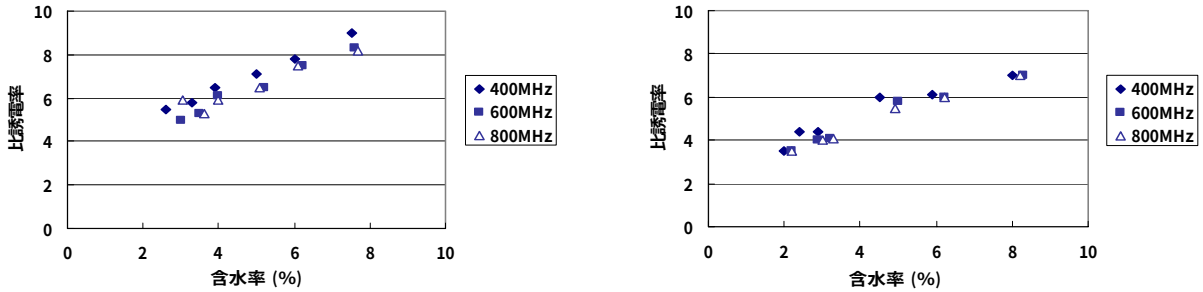
コンクリート強度[N/mm²]＝0.5×（実数部）+1.7×（虚数部）+1.0　（2.5）

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 50 ㎜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 2-4-1 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。

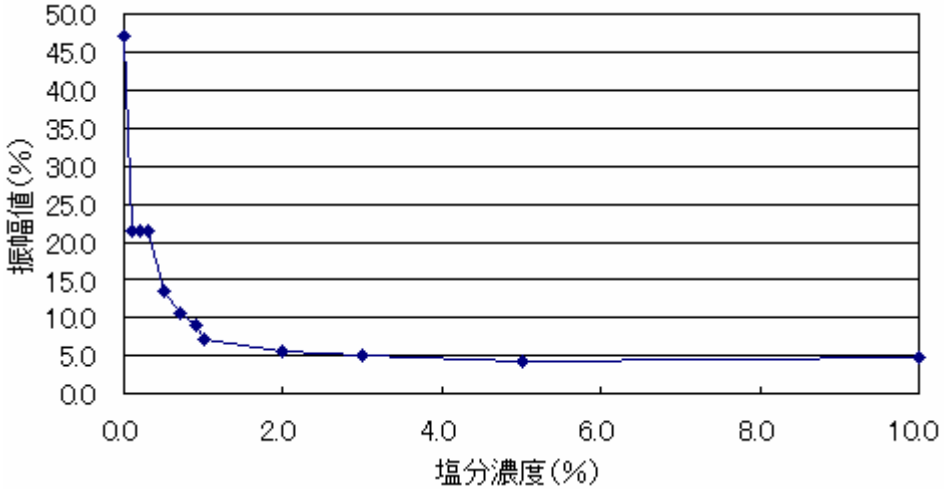


図 2-5-1　塩化物イオン濃度-振幅値との関係

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/m^3～6kg/m^3)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。

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

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。

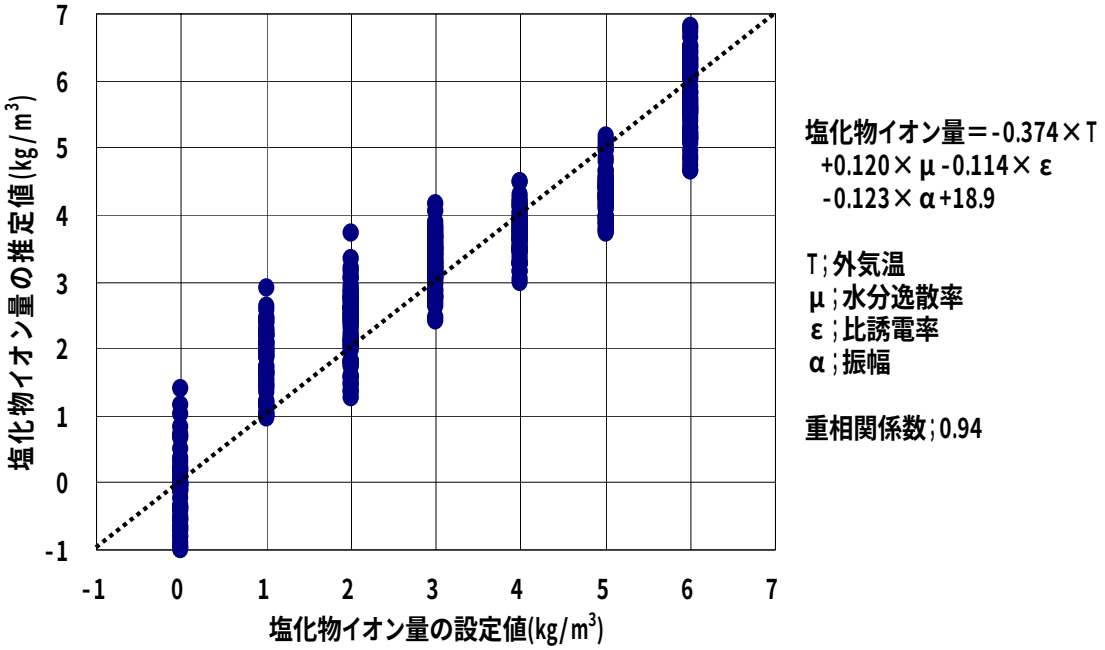


図 2-5-2　塩化物イオン量に関する重回帰分析の結果

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。

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

ここで，a_1～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，100×100×400mm 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 0～3kg/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

<table>
<tr><th>セメントの種類</th><th>骨材</th><th>スランプ(cm)</th><th>空気量(%)</th><th>水セメント比(%)</th></tr>
<tr><td rowspan="9">普通ポルトランド</td><td rowspan="7">砕石</td><td rowspan="5">12</td><td>2</td><td rowspan="3">50</td></tr>
<tr><td>6</td></tr>
<tr><td rowspan="12">4</td></tr>
<tr><td>40</td></tr>
<tr><td>30</td></tr>
<tr><td rowspan="3">18</td><td>50</td></tr>
<tr><td>40</td></tr>
<tr><td>30</td></tr>
<tr><td>人口軽量</td><td rowspan="4">12</td><td rowspan="2">50</td></tr>
<tr><td rowspan="5">高炉Ｂ種</td><td rowspan="4">砕石</td></tr>
<tr><td>40</td></tr>
<tr><td>30</td></tr>
<tr><td>18</td><td>50</td></tr>
</table>

フライアッシュ B 種		12		
		18		
低熱ポルトランド		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。

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

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

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。

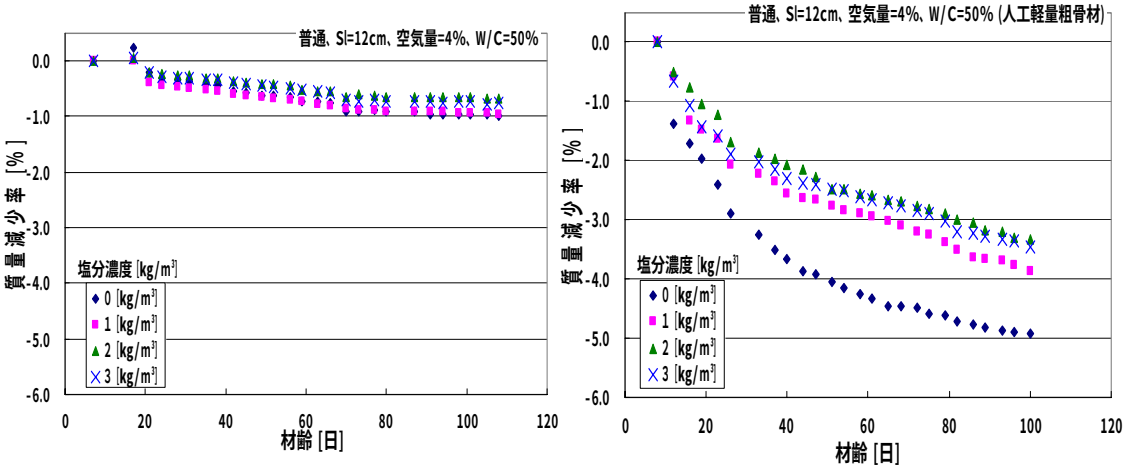


図 2-6-1　質量減少率の経時変化

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。

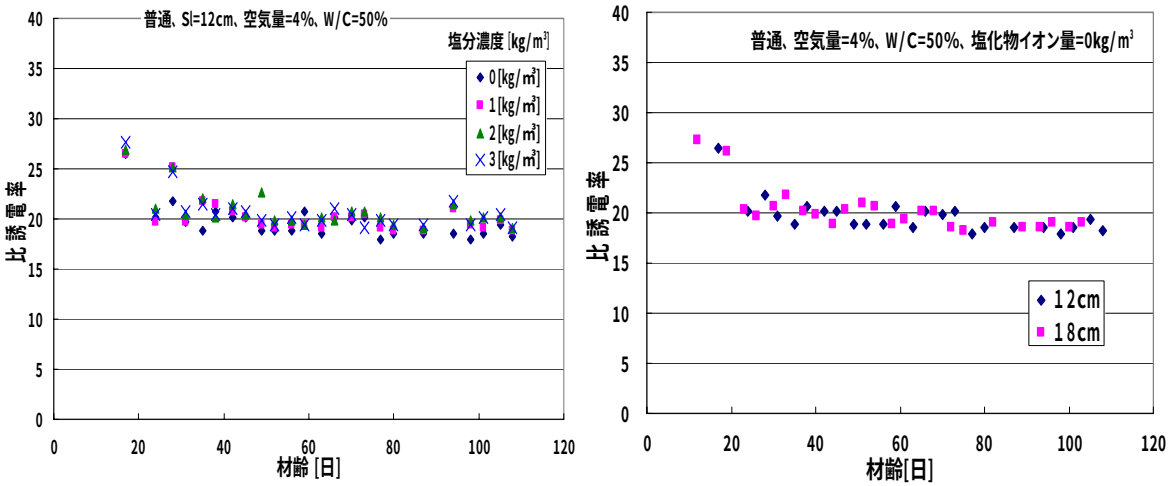


図 2-6-2　比誘電率の経時変化

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。

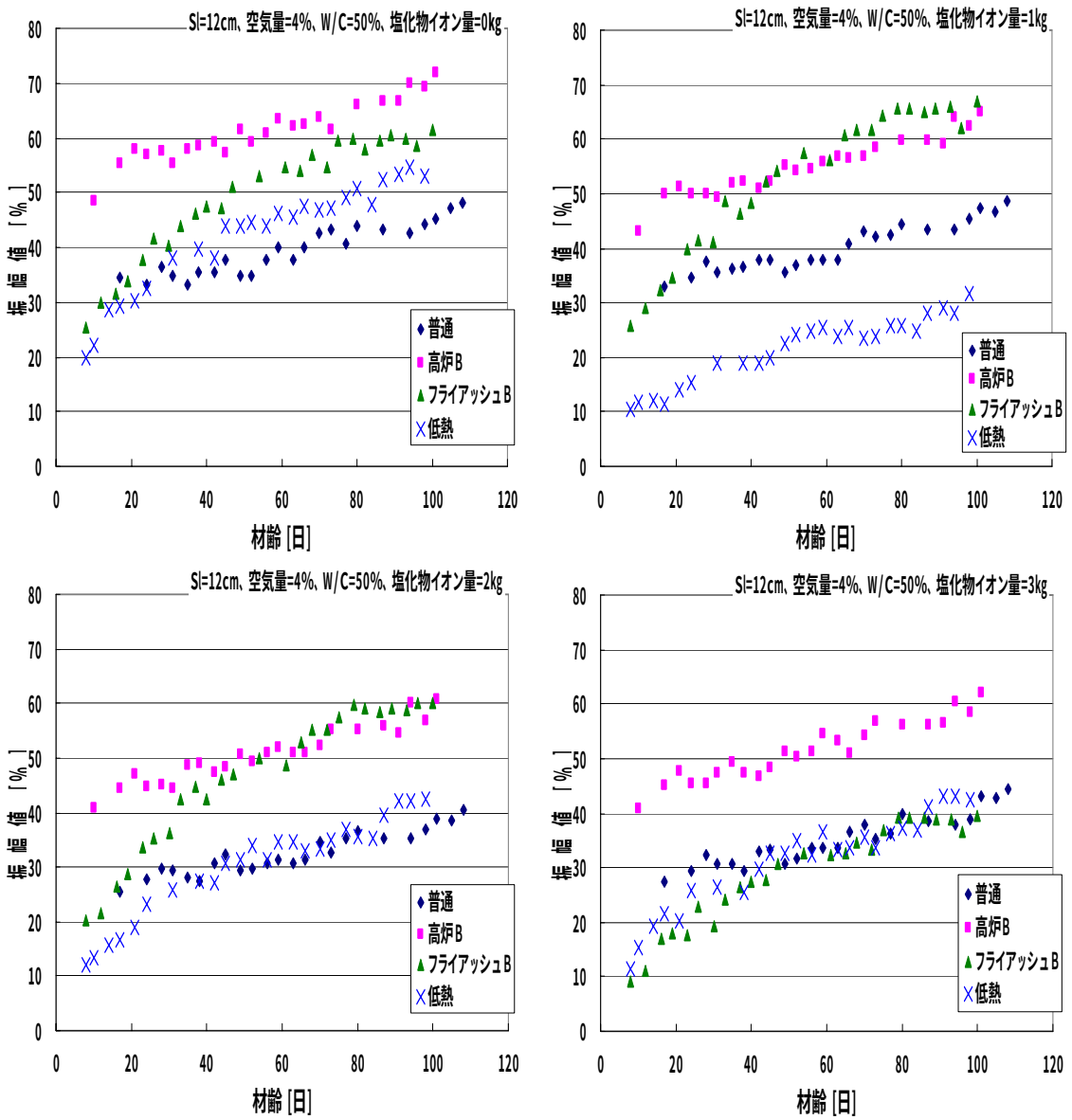


図 2-6-3　セメント種類別の振幅値の経時変化

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。

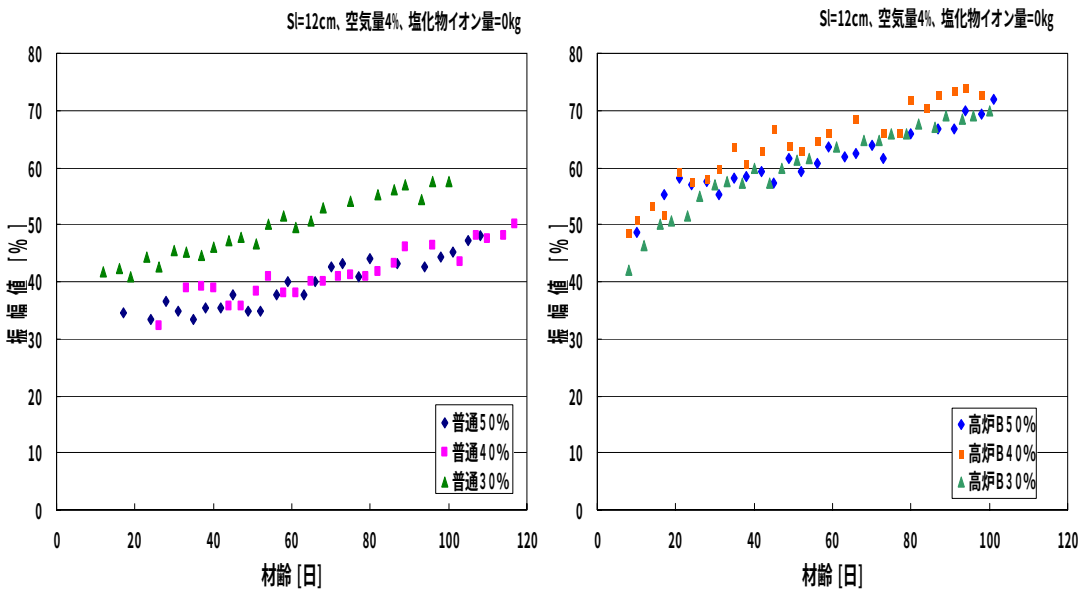
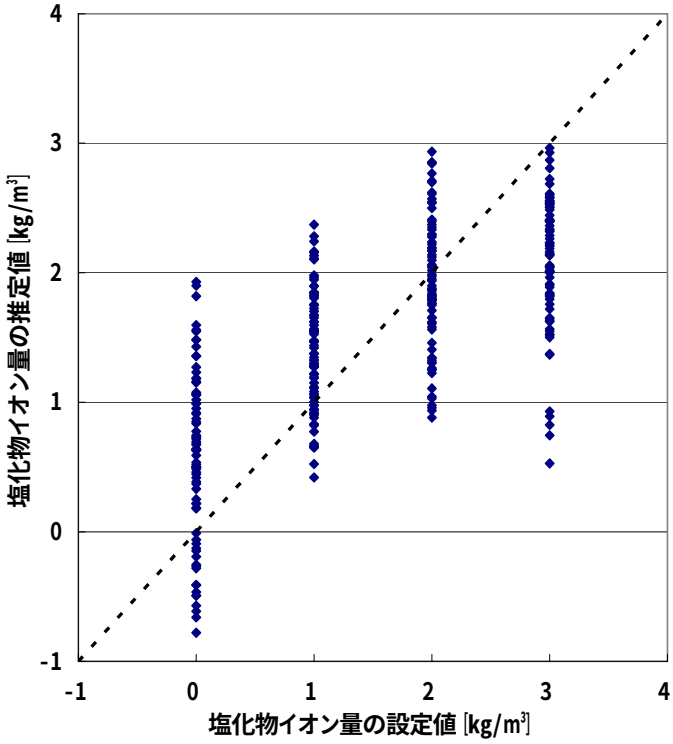


図 2-6-4　水セメント比別の振幅値の経時変化

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。

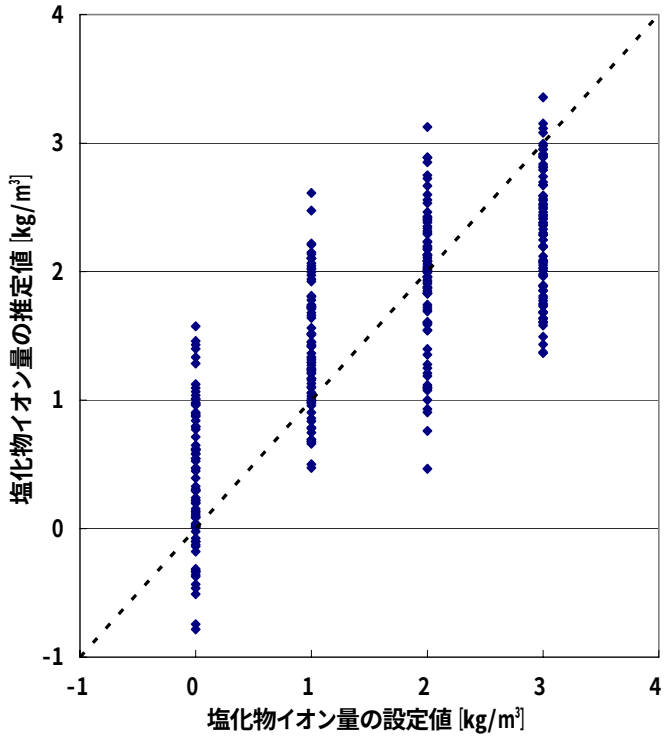


塩化物イオン量＝-0.133×T+0.0293×T_{Iron}
+1.87×W_w+0.329×ε
-0.0978×α +2.901

T ；外気温
T_{Iron} ；アンテナ内部温度
W_w ；質量減少率
ε ；比誘電率
α ；振幅値

重相関係数；0.706

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）



塩化物イオン量=-0.181×T +0.0373×T_{Iron}
+1.64×W_w+0.417×ε
-0.0957×α+0.375×AIR
+0.0210×W/C+0.0273×Sl
-1.152

T ；外気温
T_{Iron} ；アンテナ内部温度
W_w ；質量減少率
ε ；比誘電率
α ；振幅値
AIR ；空気量
W/C；水セメント比
Sl ；スランプ

重相関係数；0.783

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）

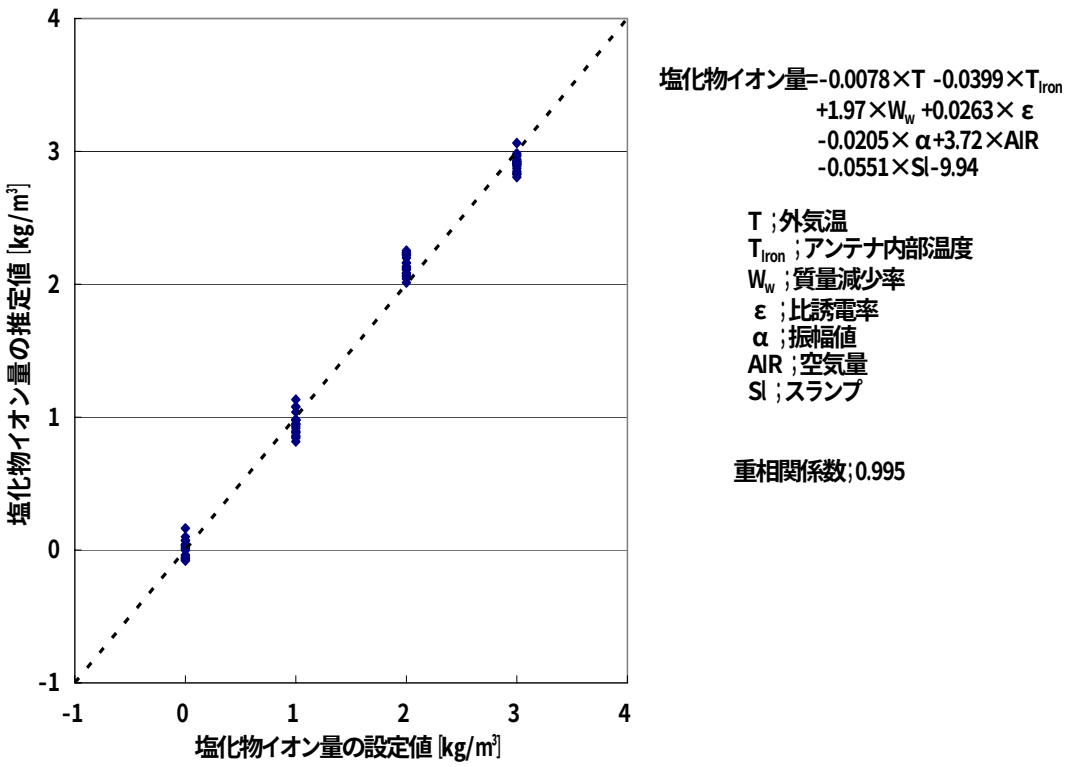


図 2-6-7　塩化物イオン量に関する重回帰分析結果（すべての配合を考慮）

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，100×100×400mm の無筋コンクリート供試体を用い，0～3kg/m³ 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。

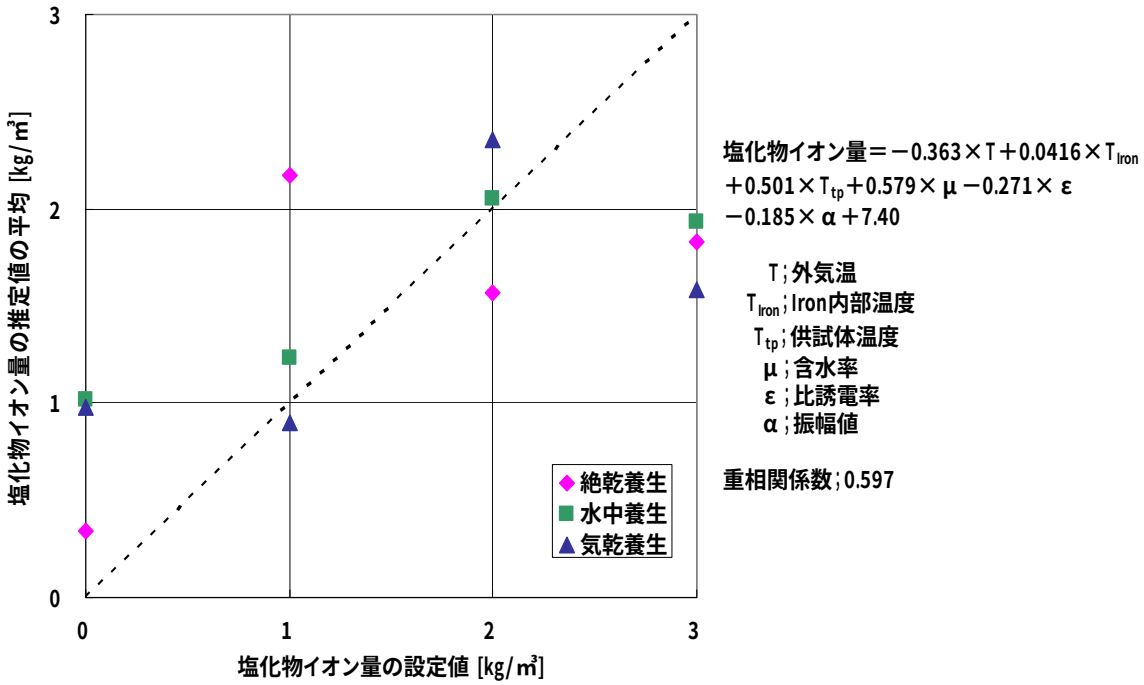


図 2-7-1　塩化物イオン量に関する重回帰分析結果

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係する抵抗値（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，腐食速度に関係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，先ず，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 9-1 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 9-2 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（Rp）の逆数は，腐食反応に伴い流れる電流（腐食電流，Icorr）と次式の関係がある。

$$Icorr = k \cdot (1/Rp) \qquad (9\text{-}1)$$

ここに，$Icorr$ ：腐食電流　(A/cm^2)

k　：換算係数　(V)

Rp　：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(9-1)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(9-2)に示すファラデーの法則により式(9-3)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。

$$Icorr / Fa = Vcorr / (M / 2) \quad (9\text{-}2)$$

ここに，Fa ：ファラデー定数　（96500 クーロン）

M　　：Fe の原子量　（55.8）

$Vcorr$　：腐食速度　$(g / cm^2 / \sec)$

$$Vcorr = \alpha\,(1 / Rp) \quad (9\text{-}3)$$

$$\alpha = (M / 2)(k / Fa) \quad (\Omega \cdot g / \sec)$$

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(9-3)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(9-3)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(9-4)の関係が導かれ，定数αを実験的に求めることができる。

$$G = \alpha \int (1 / Rp)\,dt \quad (9\text{-}4)$$

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 9-3 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，φ4mm）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（φ0.5mm）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 9-1 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，$10 kg / m^3$ 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平年相対湿度(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℃一定とした。我が国の各地の月別平均気温（1961～1990 の平均値）は 5.7℃（釧路）から 22.4℃（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℃～15℃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平年気温を参考にし，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℃に設定した。

（２）試験体

実験に用いた試験体は，図 9-3 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 9-2 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/㎥ ）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%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/㎥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/㎥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 9-4 に示す。養生後の試験体を恒温恒湿槽（気温：40℃，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℃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 9-5 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(9-5)により計算し，腐食減量の実測値と比較した。結果を図 9-6 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(9-6)により分極抵抗から腐食速度を算出できる。

$$S = \Sigma \varDelta S_n \qquad (n=1・・・N) \qquad (9\text{-}5)$$

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

ここに，S ：分極抵抗の逆数の時間積分値(sec/Ω/cm^2)

$\varDelta S_n$ ：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(Ω・cm^2)

t_n ：n 回目の測定時刻（sec）

N ：最大測定回数

$$Vcorr = 0.0337(1/Rp) \qquad (9\text{-}6)$$

ここに，Vcorr：腐食速度（mg/cm^2/sec）

Rp ：分極抵抗 (Ω・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 Vcorr）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。

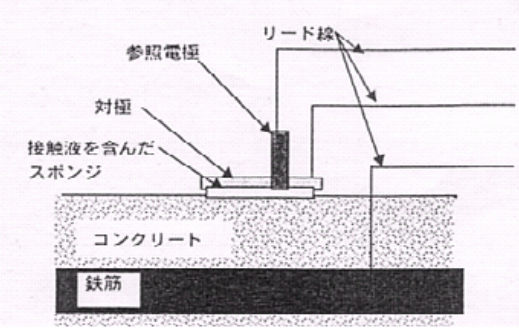
この研究で得られた主な結果を纏めると次の通りである。

●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。



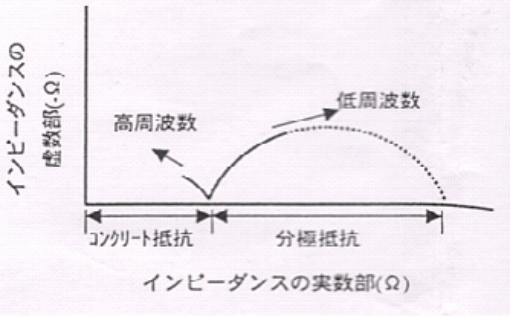


図 3-1　通常の交流インピーダンス法の測定方法　　図 3-2　インピーダンス軌跡の形状

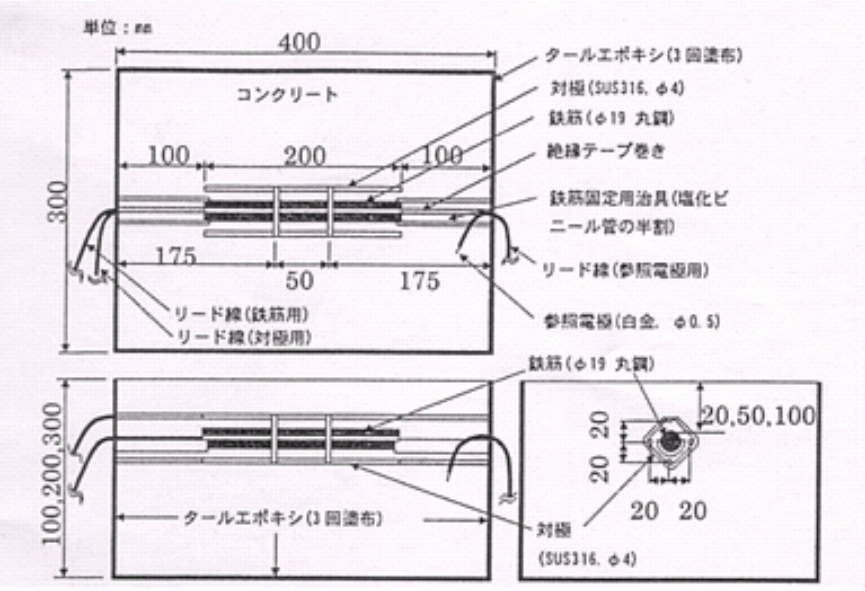


図 3-3　埋設電極を使用した試験体の形状

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/m^3, かぶり5cmの場合8kg/m^{3}を上限とした.

表 3-1　腐食速度評価実験の要因

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (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

表 3-2　コンクリートの配合

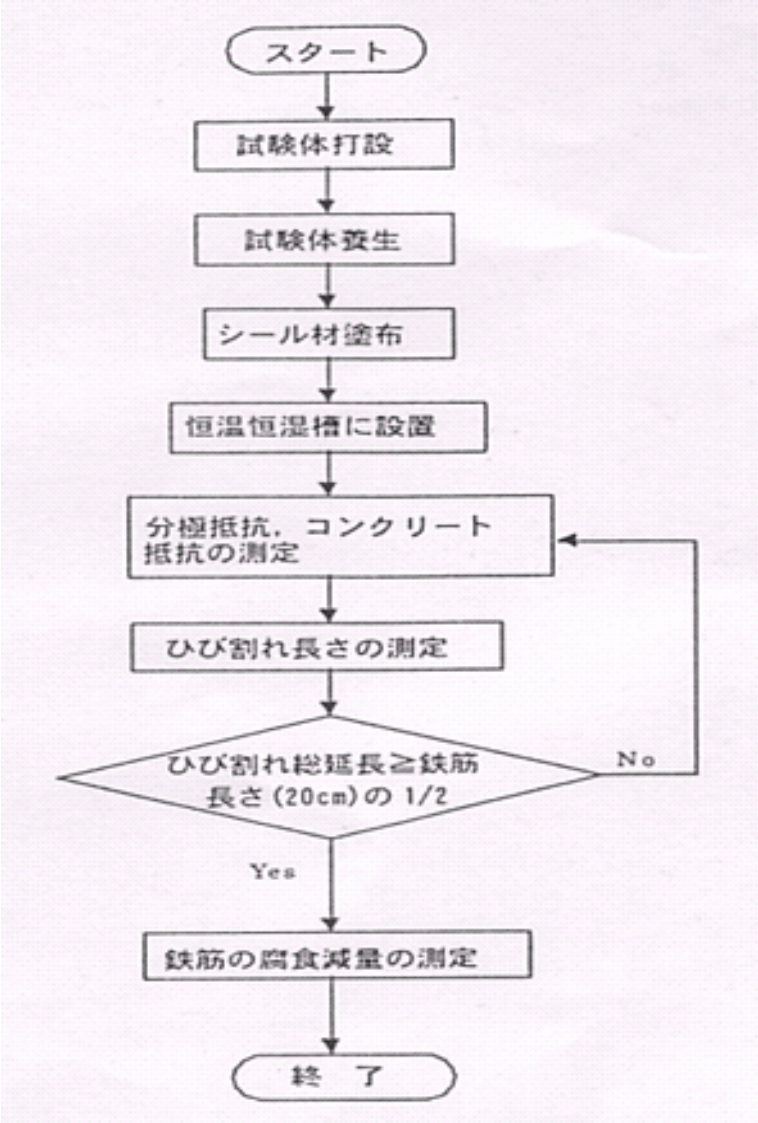


図 3-4　腐食速度評価実験の工程

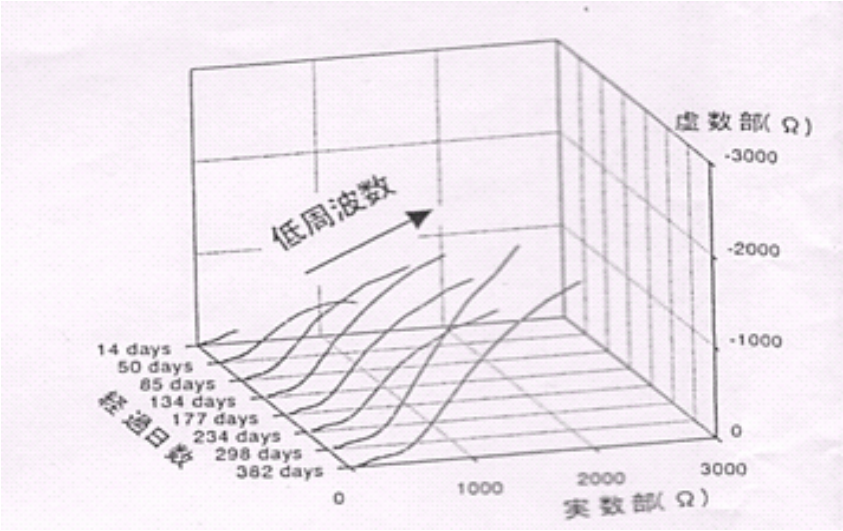


図 3-5　測定されたインピーダンス軌跡の例（かぶり 5cm，塩化物イオン濃度 4kg/m³）

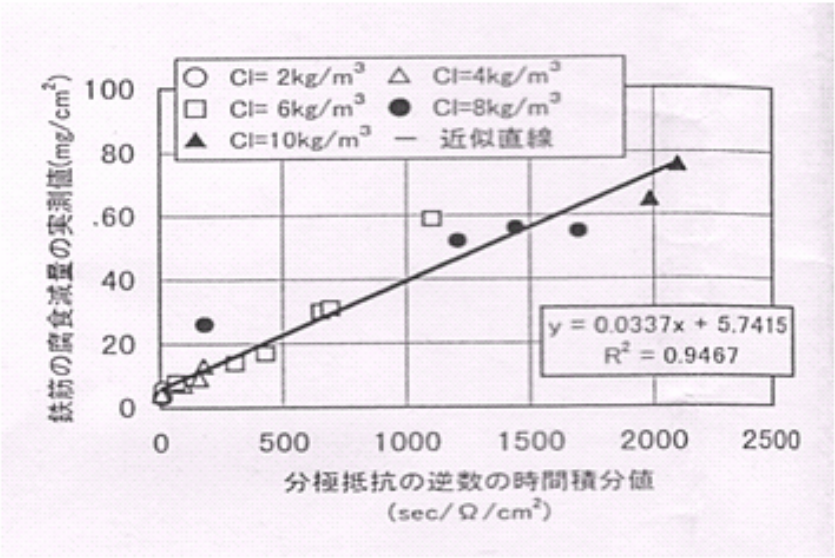


図 3-6　分極抵抗係数の逆数の時間積分値と腐食減量の関係

第 3 章　使用材料・配合条件及び，使用機器・方法

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

本実験には，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

品質 ＼ 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)
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	—	(1-54)
	終結 h-min	10h以下	3-44	—	4-47
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，直ちに茶箱に入れ状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。

表乾比重 (kg/㎥)	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

表 3-1-2　細骨材の性質

(3)　粗骨材

本実験に使用した粗骨材は，青梅産の砕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。

表乾比重 (kg/㎥)	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

表 3-1-3　粗骨材の性質

(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。

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/m³)				単位量 (g/m³)	
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤	AE減水剤
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/m³)				単位量 (g/m³)	
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤	AE減水剤
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/m³)				単位量 (g/m³)	
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤	AE減水剤
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

3.3　供試体概要

供試体寸法は W300×H200×D400（mm）。

浸漬させるために供試体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（厚さ 3mm）で囲った。

電磁波用の供試体には，鉄板（厚さ 6mm）を供試体上面から 30mm，50mm，70mm，100mm の位置に埋設した。

かぶり深さ，水セメント比，スランプを考慮し，塩分浸漬させる供試体は合計 45 個。

真水浸漬させる供試体は, W/C=55%, スランプ 12cm, かぶり深さ 0, 30, 50, 70, 100mm の合計 5 個。

インピーダンス用の供試体には，1 対の銀電極（長さ 150mm）を供試体表面から 10，20，30，40，50，70，100mmの位置に埋設した。

水セメント比，スランプ，塩水浸漬，真水浸漬を考慮し，合計 18 個。

図 3-3-1　供試体の外観

3.4　実験方法

電磁法及びインピーダンス法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。水セメント比，スランプ，かぶり深さ各々の供試体を用いて実験を行った。また，90 サイクル以降に塩分浸漬を促進させるために，W/C=65%，スランプ 21cm において塩分濃度 10%として実験を行った。

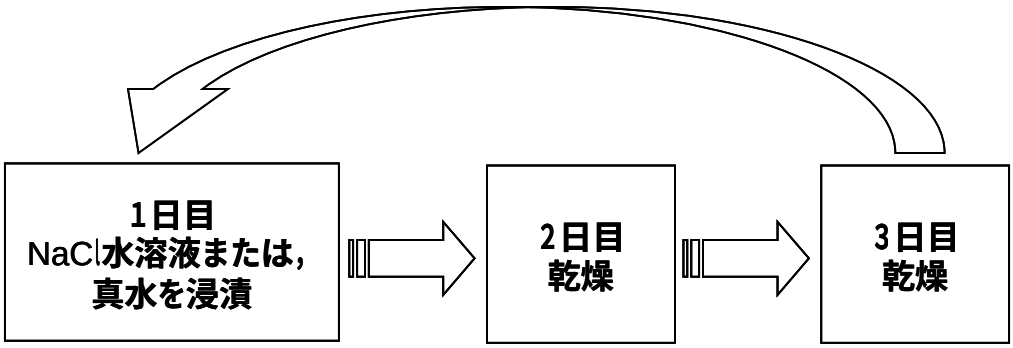


図 3-4-1　1 サイクルの工程

3.4.1　電磁波法による実験方法

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 を用いて室内実験では時間計測機能及び，実構造物においては距離計測機能を用いて測定を行った。測定は，無筋のコンクリート供試体と反射対象物が各かぶり深さ）に埋められたコンクリート供試体で行い，測定から得られた波形から無筋コンクリート供試体の波形を減算して比誘電率および振幅値を算出し，比較・検討を行った。サイクルは 1Cycle/3days とする。また，実構造物における距離測定でも同様に減算処理を行い，推定した塩分量については Golden Software の SURFER32 というソフトを用いて比較・検討を行った。

(1)　時間測定及び，距離測定に用いた実験器具について以下に示す。

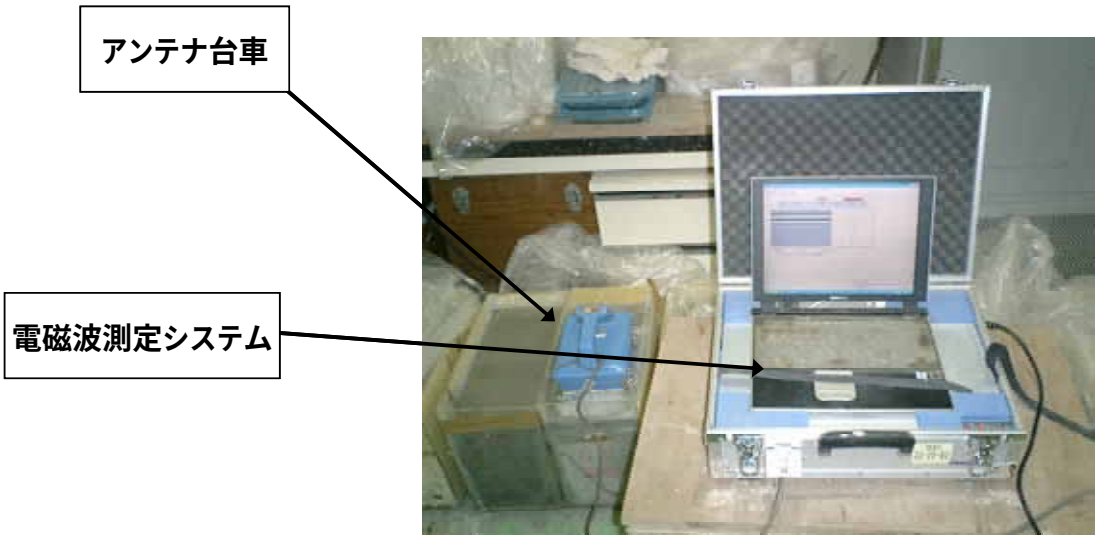


図 3-4-2　実験器具の概要

(2)　測定方法

時間測定

時間測定機能用いての測定は，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以下に示す。

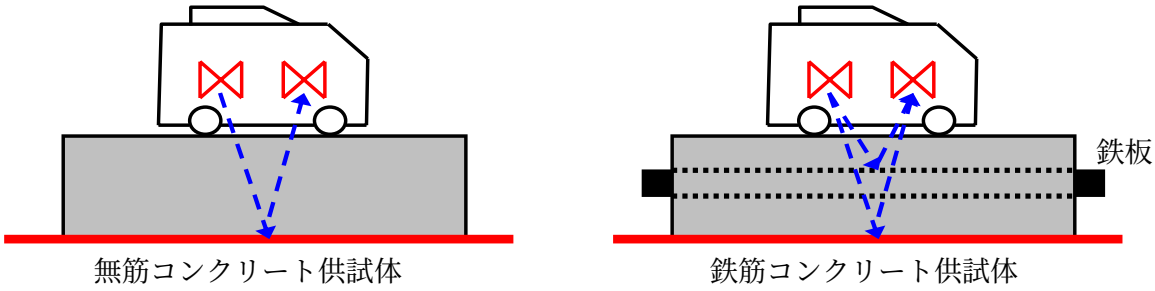


図 3-4-3　時間測定の概要

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査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。

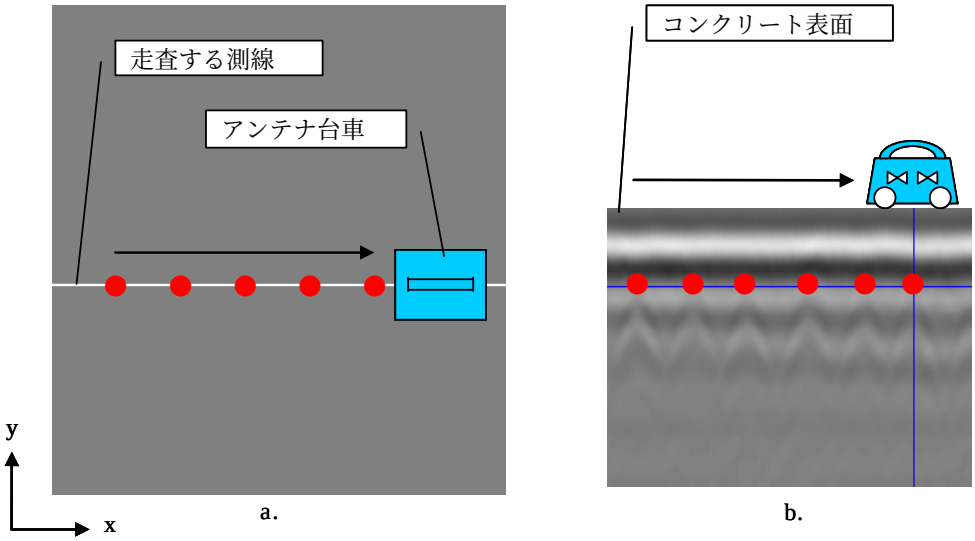


図 3-4-4　走査により得られる測定断面

(3)　室内解析

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。

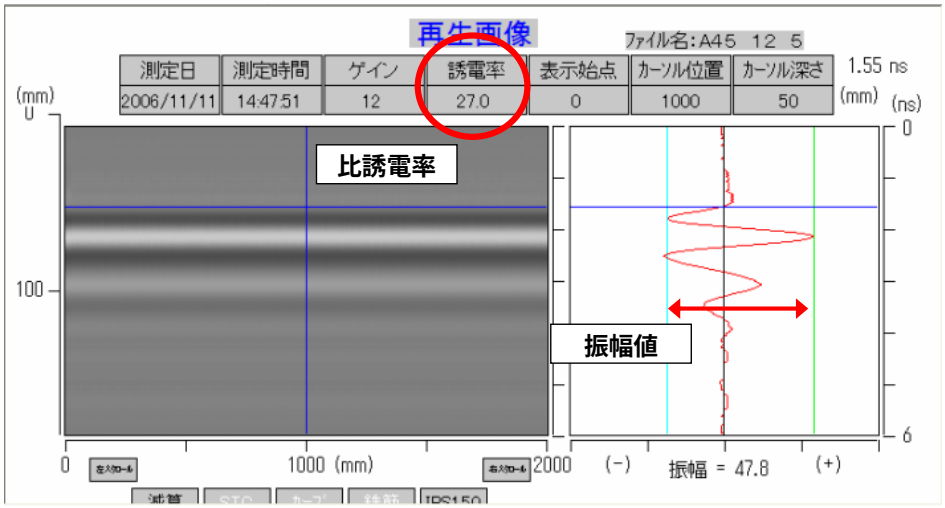


図 3-4-5　時間測定の解析画面

距離測定

図 3-4-6 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。

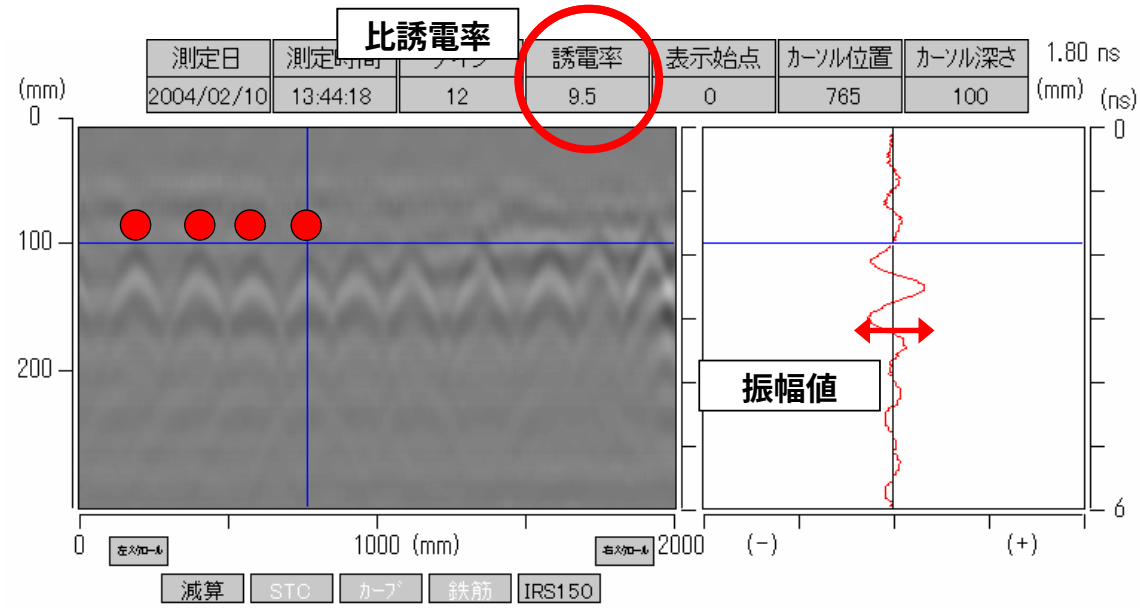


図 3-4-6　距離測定の解析画面

3.4.2　インピーダンス法の実験方法

コンクリート供試体各深さに埋設した 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。サイクルについては，電磁波法と同様に 1Cycle/3days とする。また，表面の測定については専用の簡易アタッチメントを作成し測定を行った。測定回路図については以下に示す。

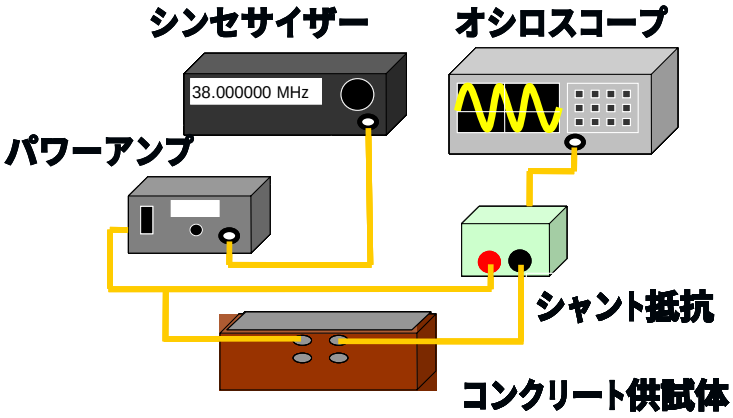


図 3-4-7　インピーダンス測定回路

3.4.3　電位差滴定法

塩分分析は、ＪＩＳＡ1154「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、ＪＩＳＡ1154 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（図 3-4-8）は、図 3-4-9 の電動カッターを用いてコアをスライスに切断した後(図 3-4-10)、ＪＩＳＡ1154 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 10ｇずつを全塩化物量試験及び温水抽出塩化物量試験に用いる。

図 3-4-8　採取したコア試料

図 3-4-9　電動カッター

図 3-4-10　スライスしたコア試料

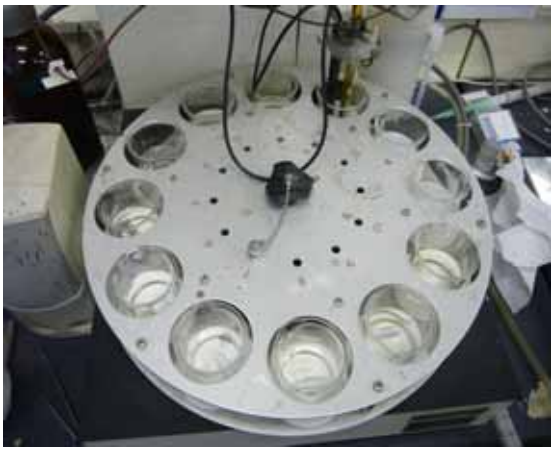


図 3-4-11　電位差滴定試験

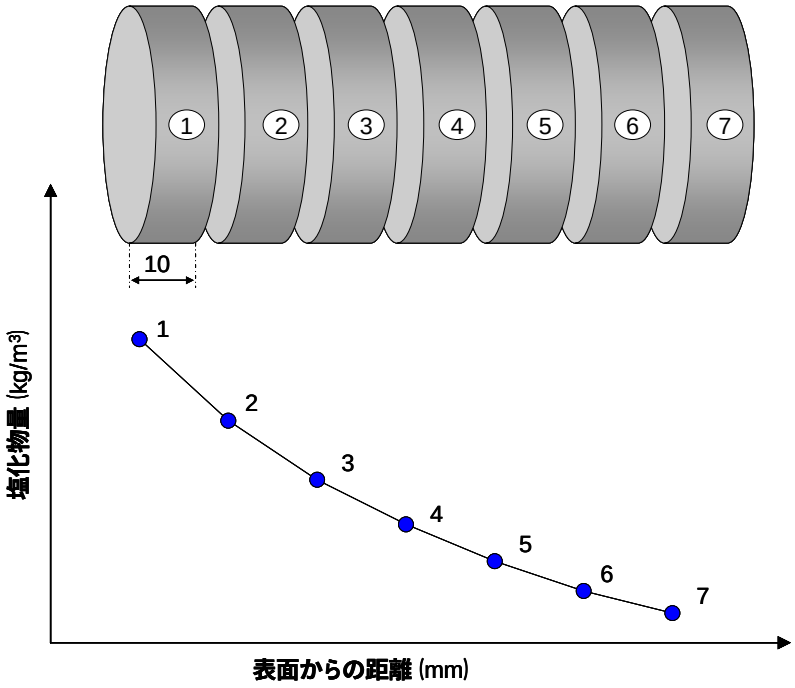


図 3-4-12　試験結果概要

第4章　電磁波法の結果

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。

4.1　埋設される鉄板深さ毎の比較

塩分浸漬させた W/C=45%の鉄板のかぶり深さ毎に得られる振幅値の経時変化を図 4-1-1 に示し，同様に W/C=55%についての振幅値を図 4-1-2 に，W/C=65%についての振幅値を図 4-1-3 に示す。浸漬させる塩分濃度 10%，スランプ 21cm の振幅値の結果を図 4-1-4 に示し，真水のみを浸漬させた振幅値の結果を図 4-1-5 に示す。比誘電率については図 4-1-6～4-1-10 に示す。

<u>結果・考察</u>

図 4-1-1～4-1-3 についてだが，全体的に徐々にではあるが振幅値の増加傾向にある。既往の研究では，時間の経過に伴って振幅値は増加するとあり，既往の研究と同じ傾向がみられる。しかし，増加傾向であるが，値の増減が激しい結果となっている。この要因は，塩化物イオンによる減少傾向と含水量の変化による増加傾向などの影響を受けて変化しているものだと考えられる。どの水セメント比においても鉄板深さ 5cm は他の鉄板深さよりも振幅値の変化が大きい傾向にあるのは，鉄板深さ 5cm までの塩化物イオンや水分イオンの移動が大きいためではないかと考えられる。また，どの水セメント比においても鉄板のかぶりが深くなるとともに振幅値は小さくなるという結果が得られた。この要因は反射対象物から受信する距離が長いため反射波の振幅が小さくなると考えられる。図 4-1-4 における浸漬させる濃度 10%の結果についても同様の結果が得られた。塩分濃度の変化が対象深さに与える影響はないとわかった。図 4-1-5 における真水浸漬においても鉄板かぶり深さ毎に小さくなることは変わらない結果であった。しかし，塩分浸漬よりも振幅値の増減が大きく特に鉄板かぶり深さ 5cm の増減が大きい結果となった。この要因は, 先にも述べたが, 含水量の影響が大きく，表面の乾燥か湿潤かの状態が大きく影響しているのだと考えられる。

図 4-1-6～4-1-10 の比誘電率についてであるが，経時変化は全体的に平行線ではあるが，若干の誤差が生じている。おそらく，人為誤差というのもあるが，コンクリート表面の状態も少なからず影響しているのではないかと考えられる。また，鉄板のかぶりが深くなるとともに小さくなる結果は振幅値と同様の結果が得られた。

振幅値

塩分浸漬

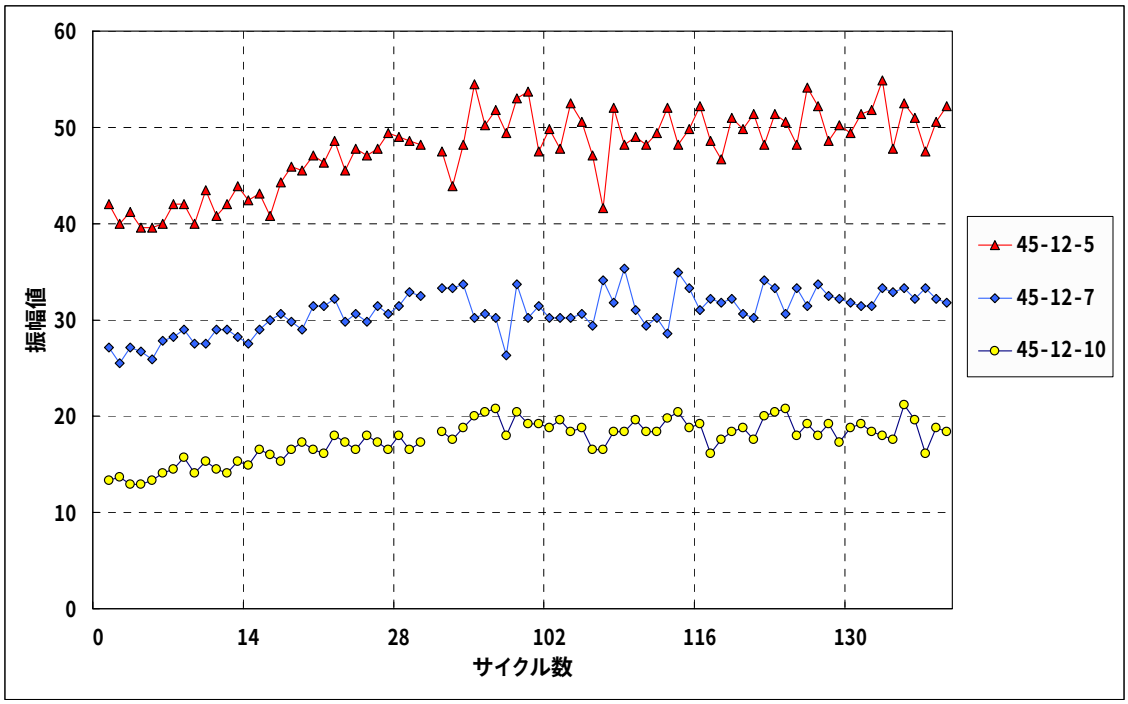


図 4-1-1　鉄板深さごとの振幅値の変化（W/C=45%）

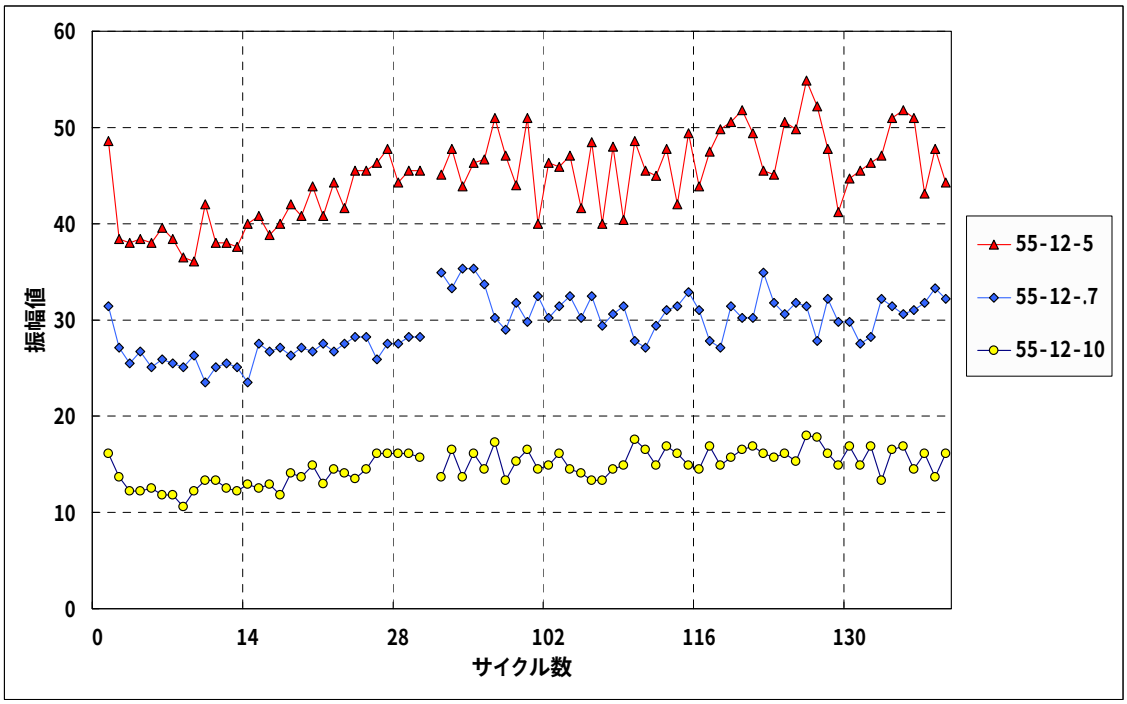


図 4-1-2　鉄板深さごとの振幅値の変化（W/C=55%）

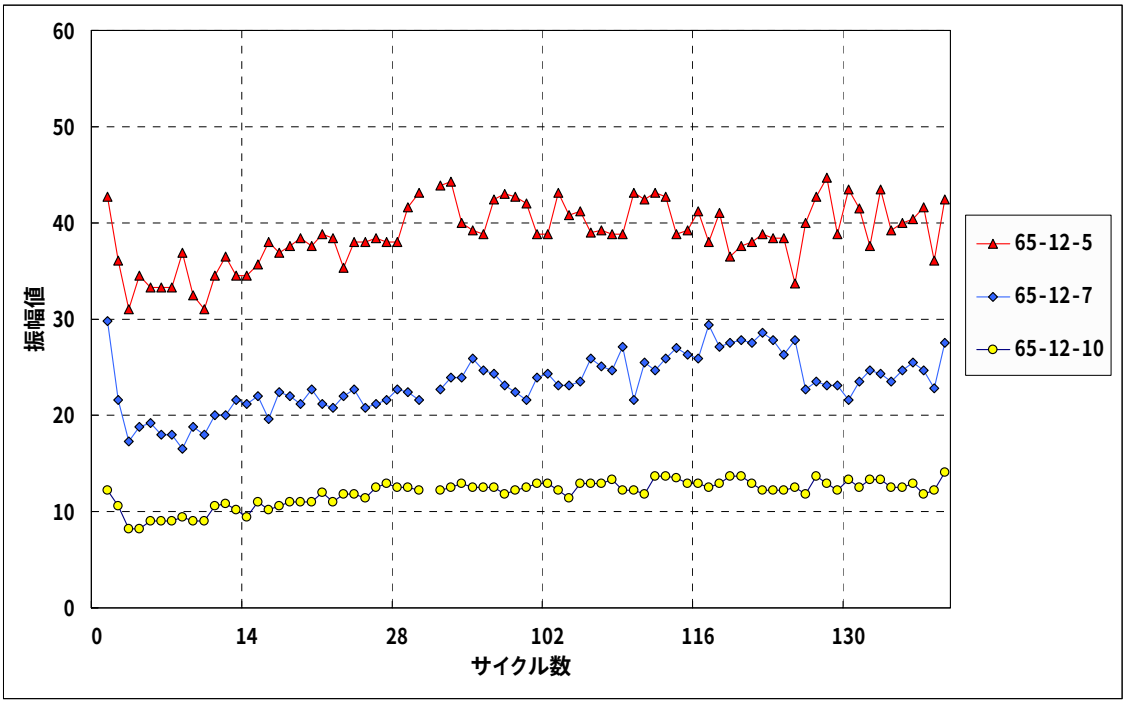


図 4-1-3　鉄板深さごとの振幅値の変化（W/C=65%）

塩分濃度 10%　スランプ 21cm

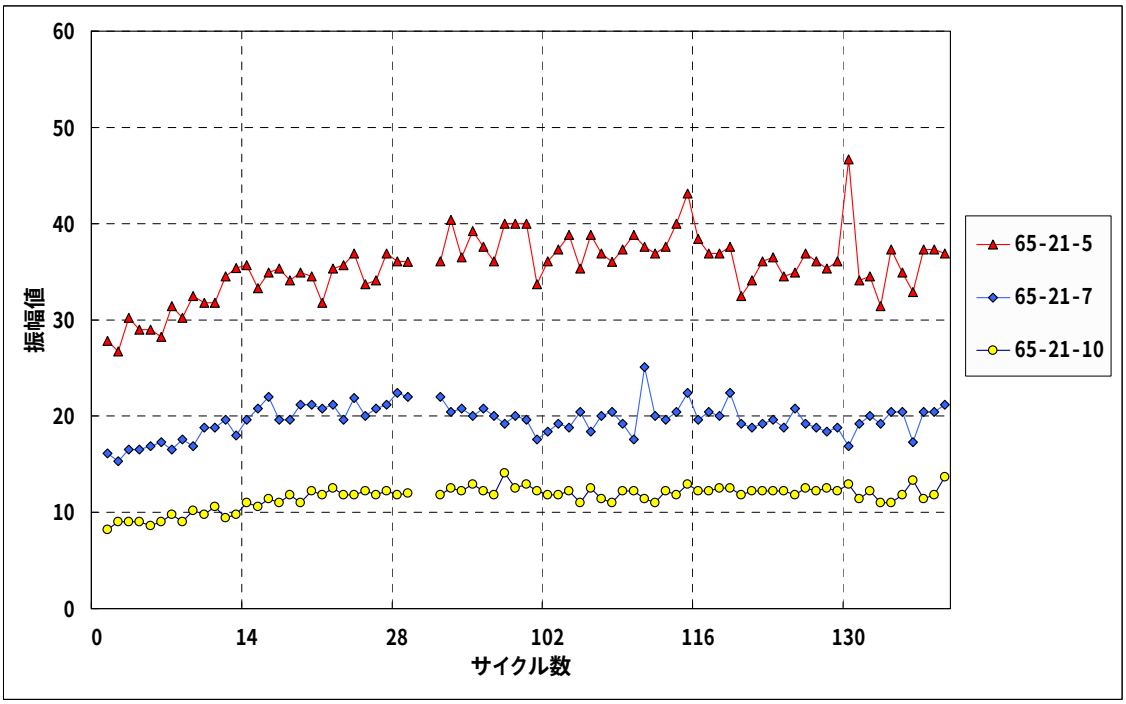


図 4-1-4　鉄板深さごとの振幅値の変化（W/C=65%，スランプ 21cm）

真水浸漬

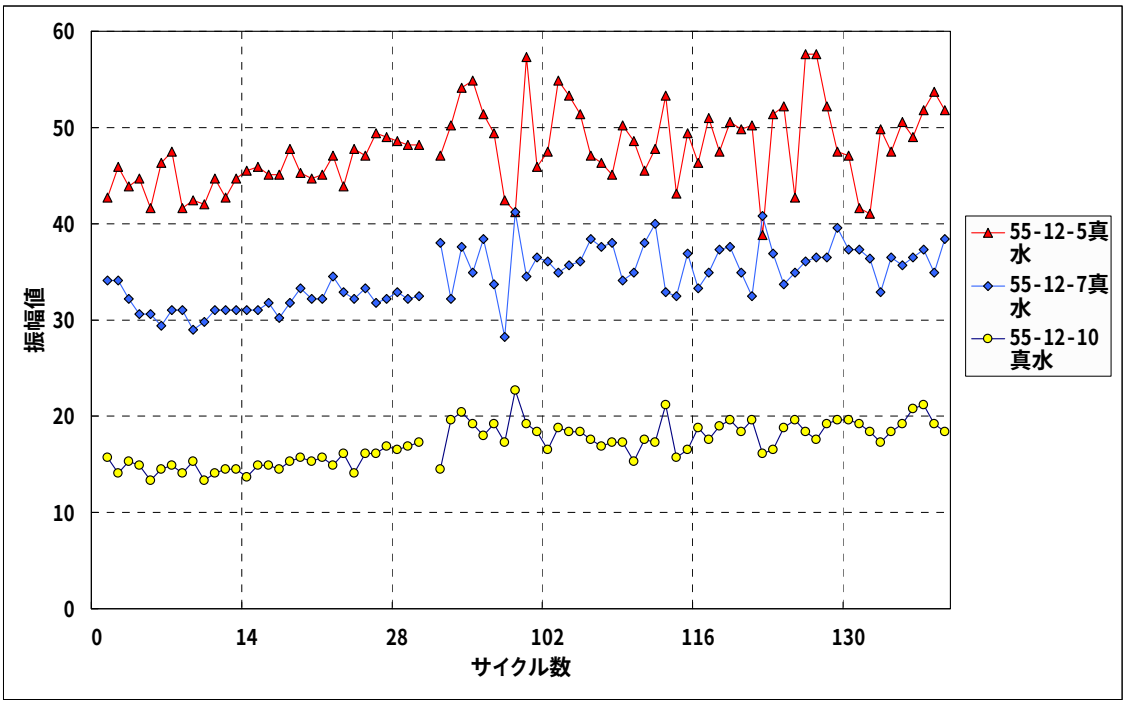


図 4-1-5　鉄板深さごとの振幅値の変化（W/C=55%，真水浸漬）

比誘電率

塩分浸漬

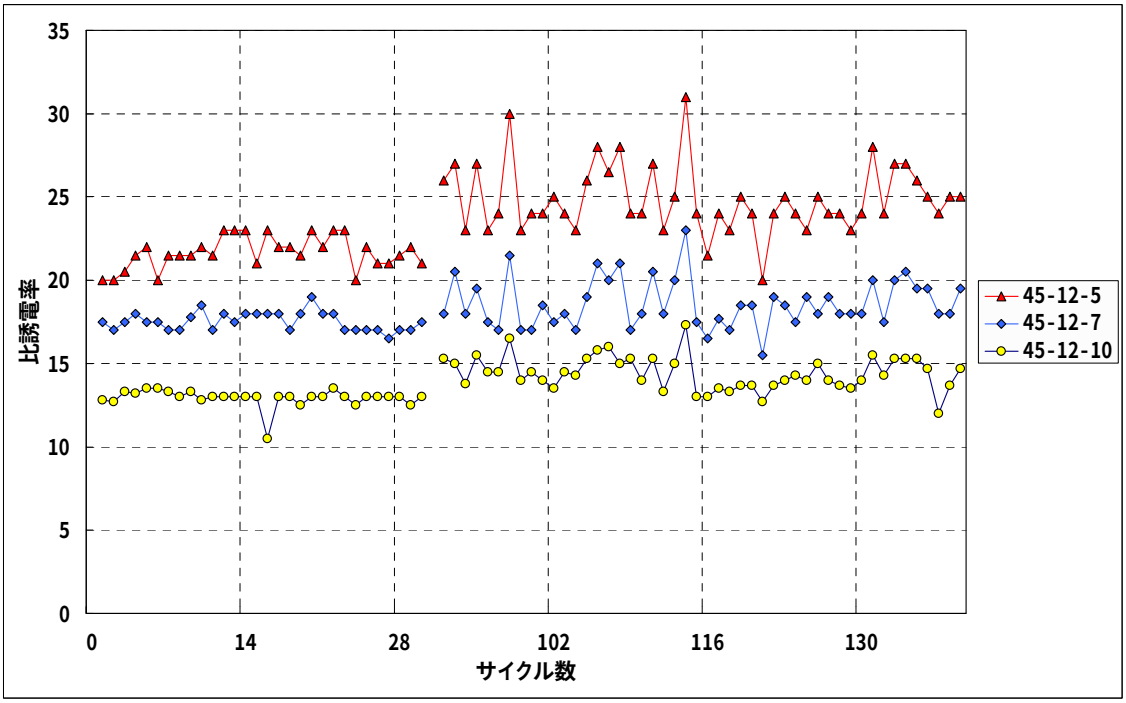


図 4-1-6　鉄板深さごとの比誘電率の変化（W/C=45%）

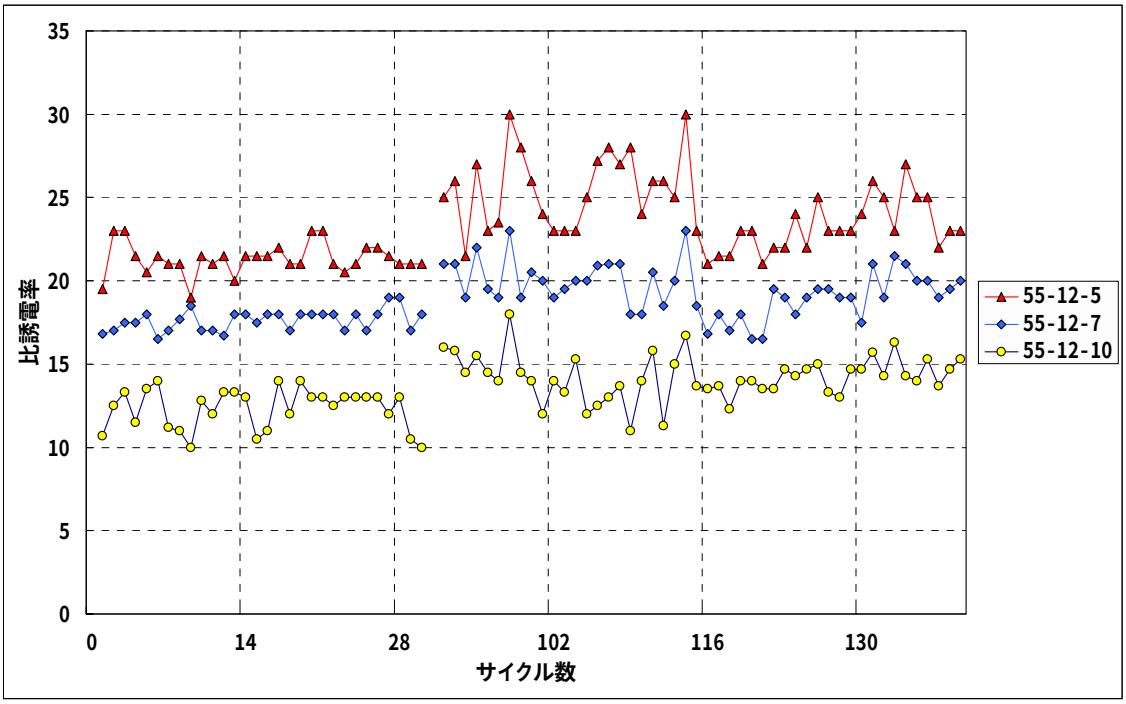


図 4-1-7　鉄板深さごとの比誘電率の変化（W/C=55%）

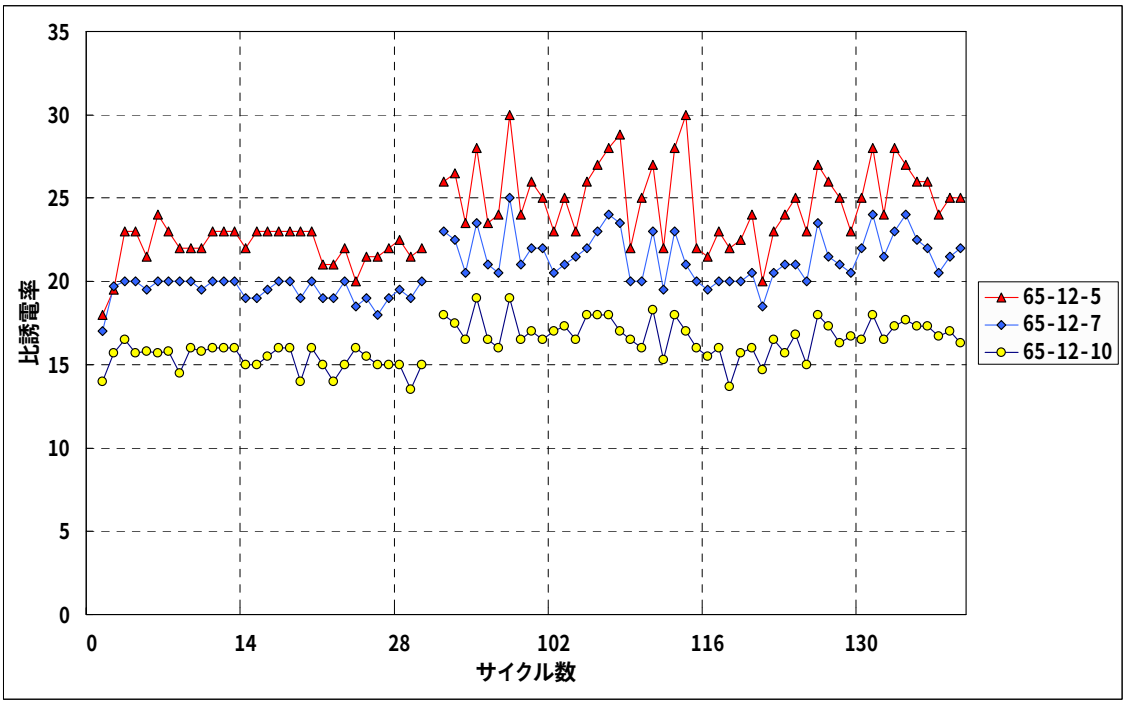


図 4-1-8　鉄板深さごとの比誘電率の変化（W/C=65%）

塩分濃度 10%　スランプ 21cm

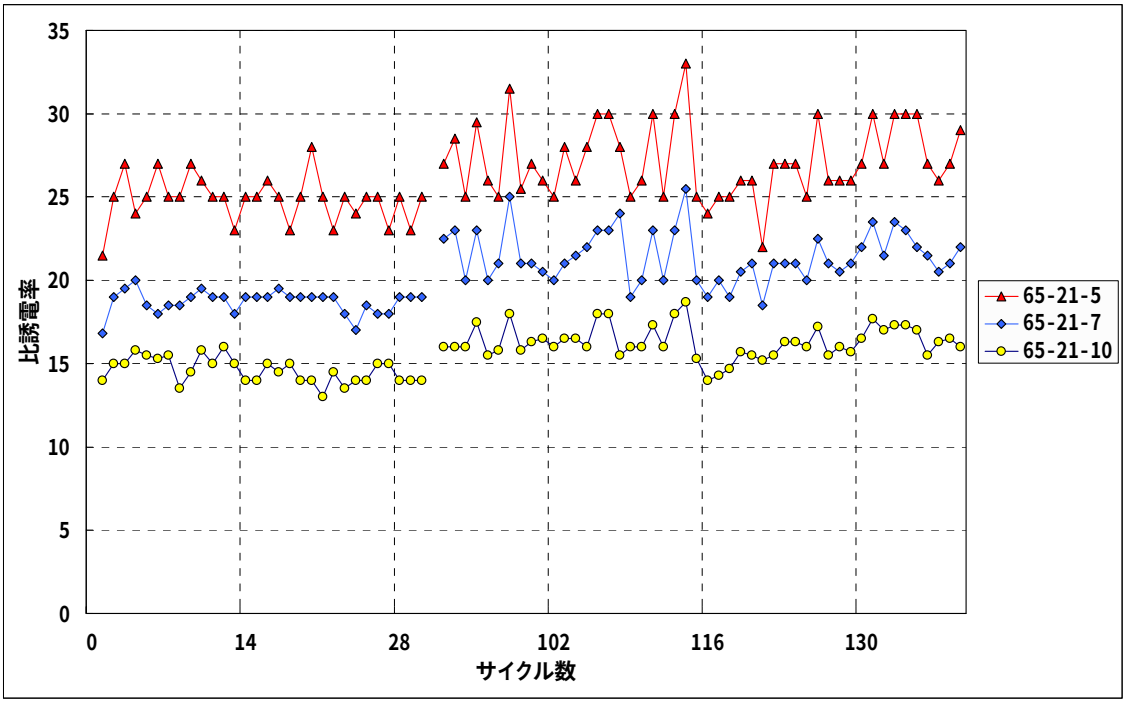


図 4-1-9　鉄板深さごとの比誘電率の変化（W/C=65%）

真水浸漬

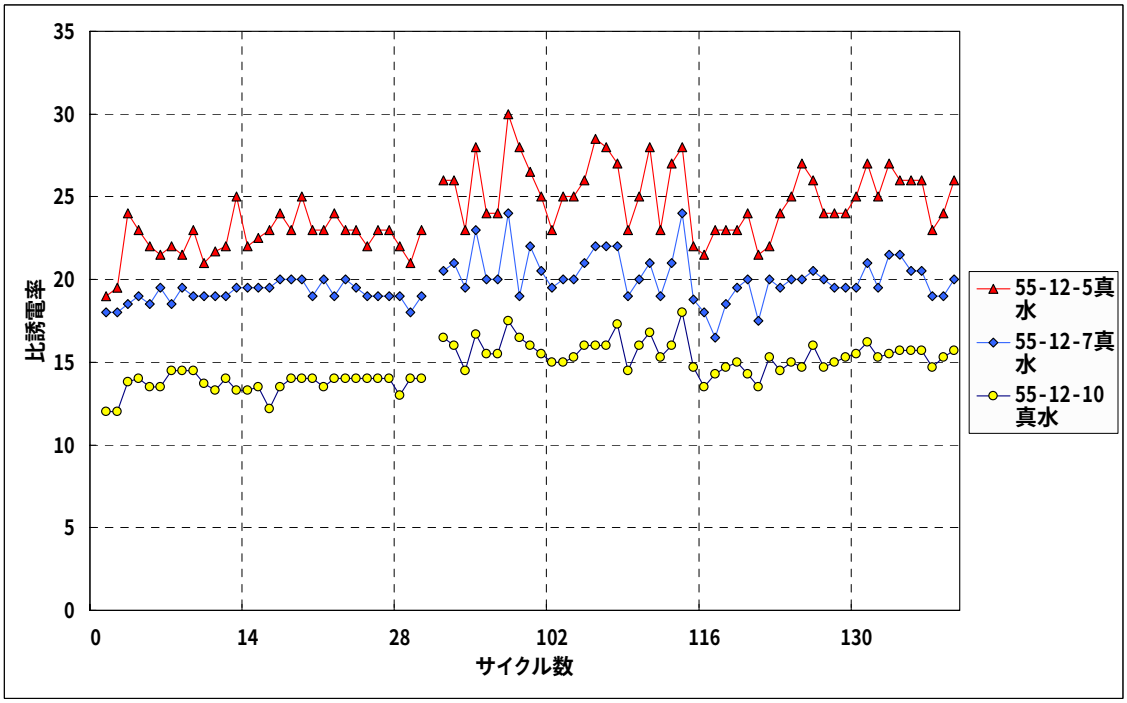


図 4-1-10　鉄板深さごとの比誘電率の変化（W/C=55%，真水浸漬）

4.2　スランプ毎の比較

スランプによる変化をみるため，同一水セメント比，鉄板かぶり深さにおける振幅値の経時変化を図 4-2-1～4-2-3 に示す。同様に, 比誘電率の経時変化を図 4-2-4～4-2-6 に示す。

<u>結果・考察</u>

スランプの影響について，振幅値は値にばらつきがありはっきりとした傾向ではないが，若干スランプが大きくなるほど小さくなる傾向があった。単位水量の影響が若干ではあるが，影響しているのであると考えられる。特に，W/C=65%におけるスランプ 5cm と他のものとの差が大きくなる結果からも同様のことが考えられる。かぶり深さ 5cm と 21cm における比較を行うと，どの結果も 21cm のほうが小さくでる傾向にある。つまり，単位水量が大きいほど振幅値は小さくでると考えられる。

上記のことから既往の研究による時間の経過とともに振幅値が増加するというのは，コンクリート内部の含水量に起因しており，含水率が小さくなるとともに振幅値が増加していったと考えられる。この結果より振幅値はコンクリート内部の含水量に大きく影響を受けると考えられる。

比誘電率においては，スランプの変化による傾向はなく，どの鉄板かぶり深さにおいても同程度の結果を示した。この結果より，スランプによる影響は比誘電率にはないと考えられる。図 4-2-5 におけるスランプ 5cm の値が全体的に小さい値をとっているのは，埋設される鉄板のかぶりが 10cm よりも若干下に埋設されてしまっているためであると考えられる。

比誘電率は振幅値のような傾向が見られず，コンクリート内部の含水量によって変化はないと考えられる。

振幅値

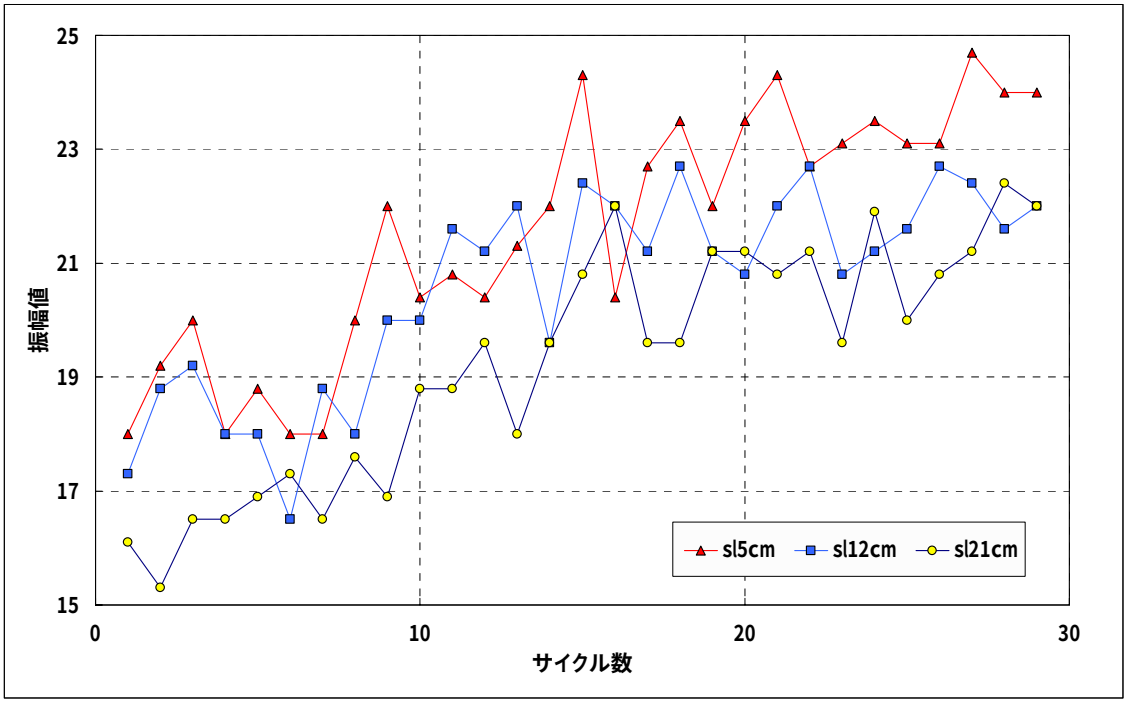


図 4-2-1　スランプ毎の振幅値の経時変化（W/C=65%，鉄板かぶり深さ 5cm）

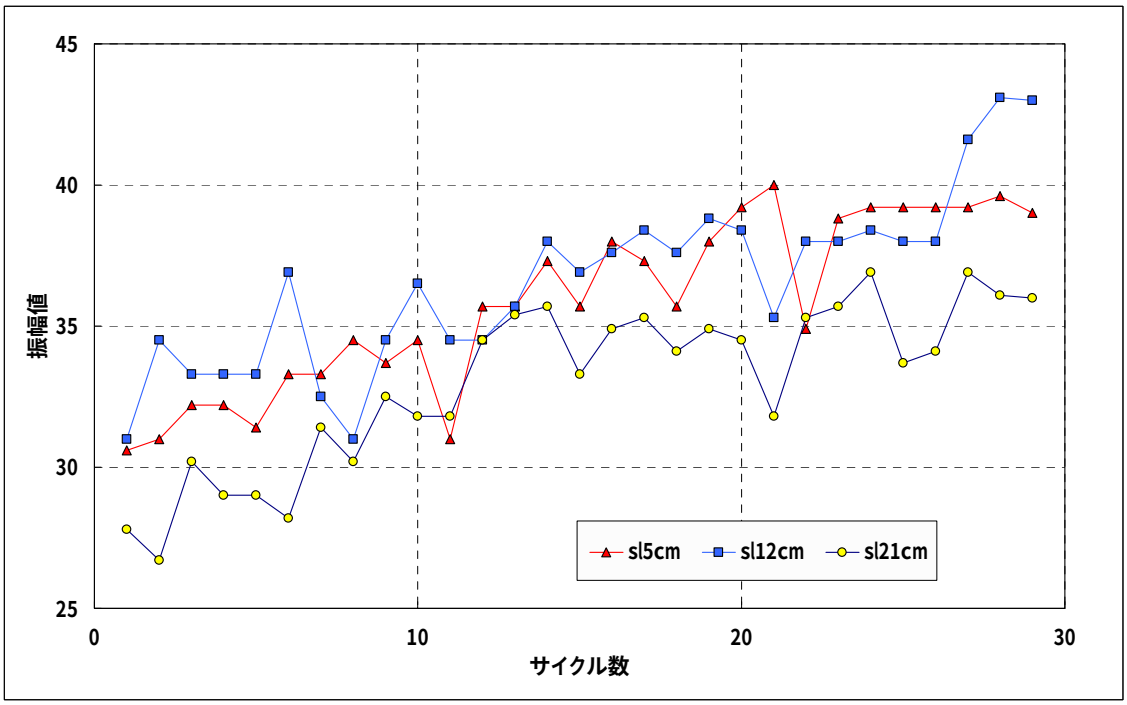


図 4-2-2　スランプ毎の振幅値の経時変化（W/C=65%，鉄板かぶり深さ 7cm）

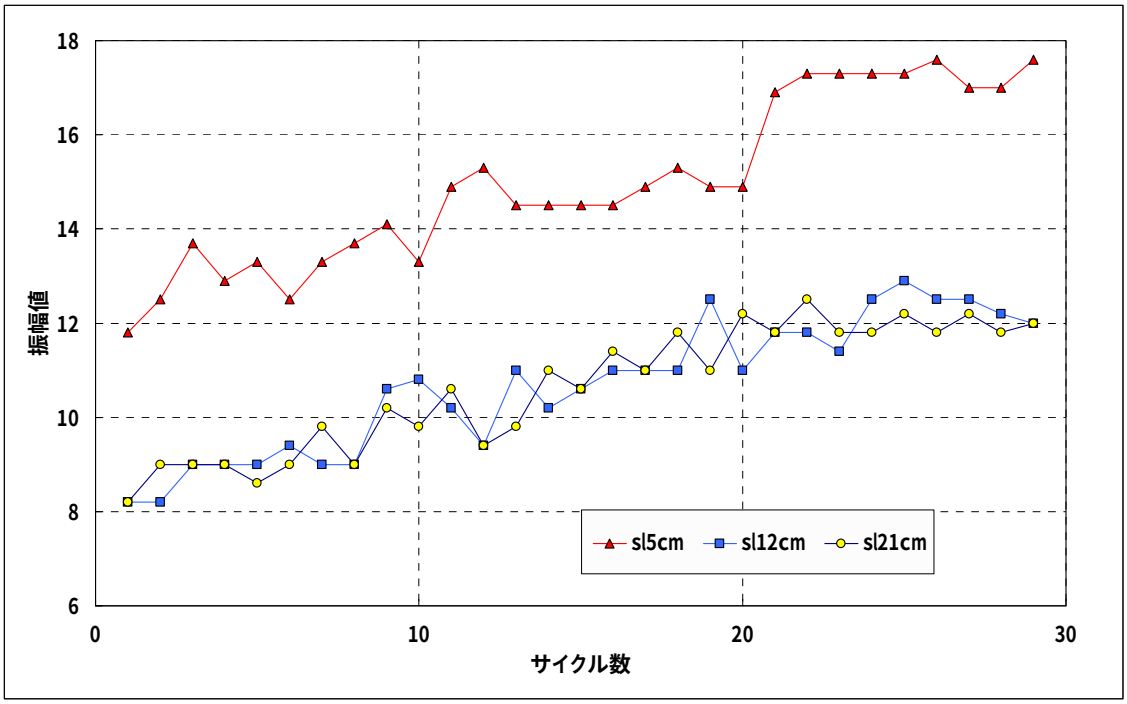


図 4-2-3　スランプ毎の振幅値の経時変化（W/C=65%，鉄板かぶり深さ 10cm）

比誘電率

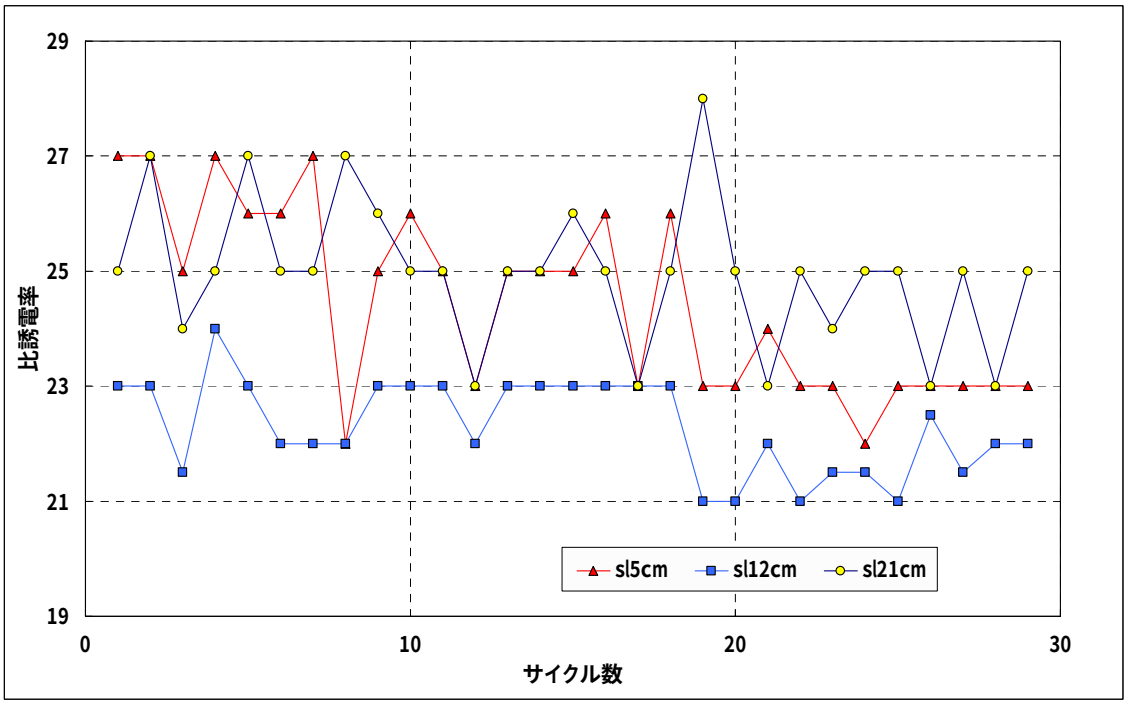


図 4-2-4　スランプ毎の比誘電率の経時変化（W/C=65%，鉄板かぶり深さ 5cm）

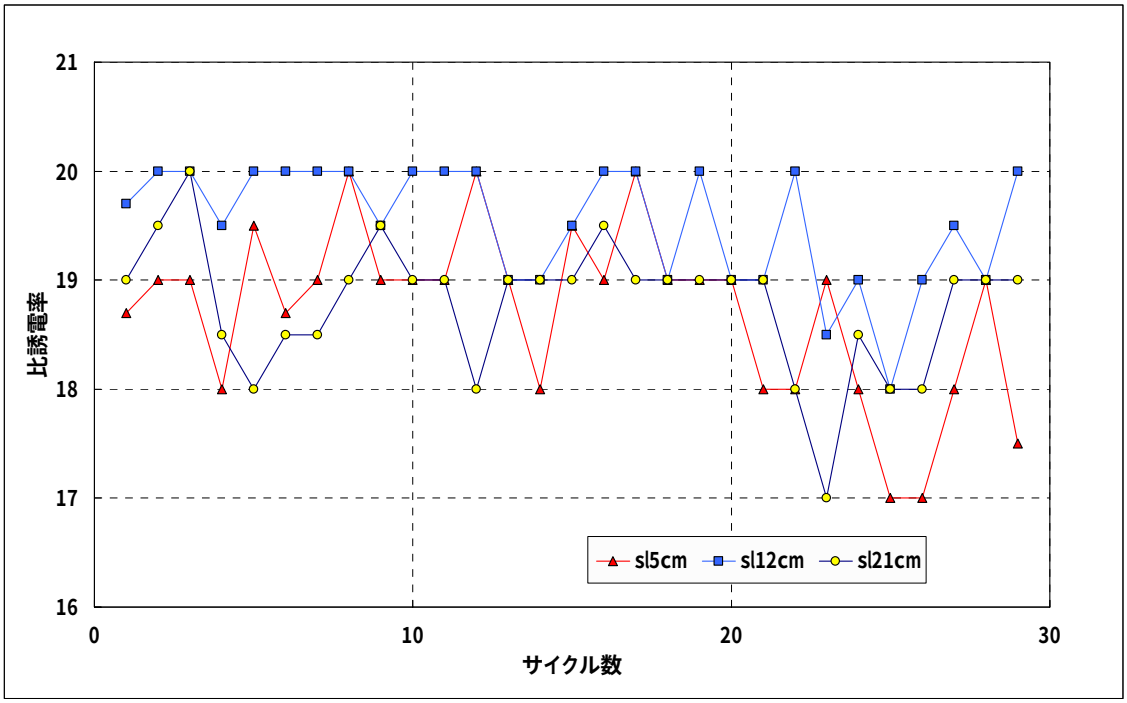


図 4-2-5　スランプ毎の比誘電率の経時変化（W/C=65%，鉄板かぶり深さ 7cm）

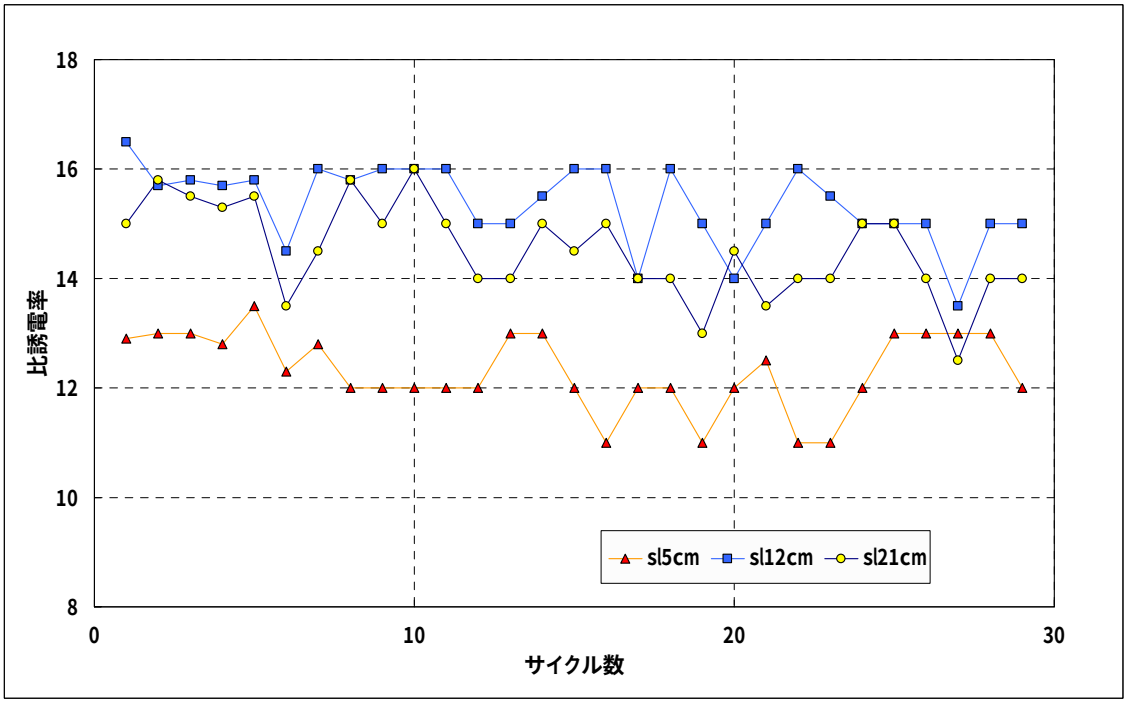


図 4-2-5　スランプ毎の比誘電率の経時変化（W/C=65%，鉄板かぶり深さ 10cm）

4.3　水セメント比毎の比較

水セメント比の変化が及ぼす振幅値の経時変化を鉄板かぶり深さ別に図 4-3-1～4-3-3 に示し，同様に比誘電率について図 4-3-4～4-3-6 に示す。また，変化がわかりやすいように 5Cycle 毎の平均的な経時変化について振幅値は図 4-3-7～4-3-9 に示し，比誘電率は図 4-3-10～4-3-12 に示す。

<u>結果・考察</u>

振幅値についてだが，全体的に，水セメント比が大きくなるにつれ振幅値は小さくなる傾向にあった。この要因は，含まれる単位セメント量の影響があり，セメント量が多くなると振幅値が大きくなると考えられる。また，鉄板深さが深くなるにつれ水セメント比毎の差異が減少している。もしくは，鉄板深さが浅いほど差異が大きいことから，塩分浸漬の影響がでているのではないかと考えられる。

また，図 4-3-1，4-3-2 において W/C=55%の振幅値が若干他のよりも全体的に大きくでる傾向にあった。この要因としては，表面の含水状態が他のものよりも小さくなっていたため大きくでたという可能性，または，もともと鉄板かぶり深さが若干対象深さよりも表面側に埋設せれており振幅値が大きくでたのではないかと考えられる。

比誘電率については，値のばらつきが大きいため図 4-3-7～4-3-9 に 5Cycle 間の平均経時変化を比較すると鉄板深さ 5cm において，ほとんど変化はなく同程度である。比誘電率には水セメント比が及ぼす影響はほとんどないと考えられる。しかし，他の鉄板かぶり深さにおいて特に水セメント比 65%において値が大きくなる傾向にあった。この結果については，先にも述べたが，正確なかぶり位置に埋設されていないことや，表面に付着しているシリコンなどの影響も少なからずでてしまっているのではないかと考えられる。また，94Cycle 目から若干値が増加した要因は人為誤差によるもので，測定者により若干の誤差が生じているのであると考えられる。

振幅値

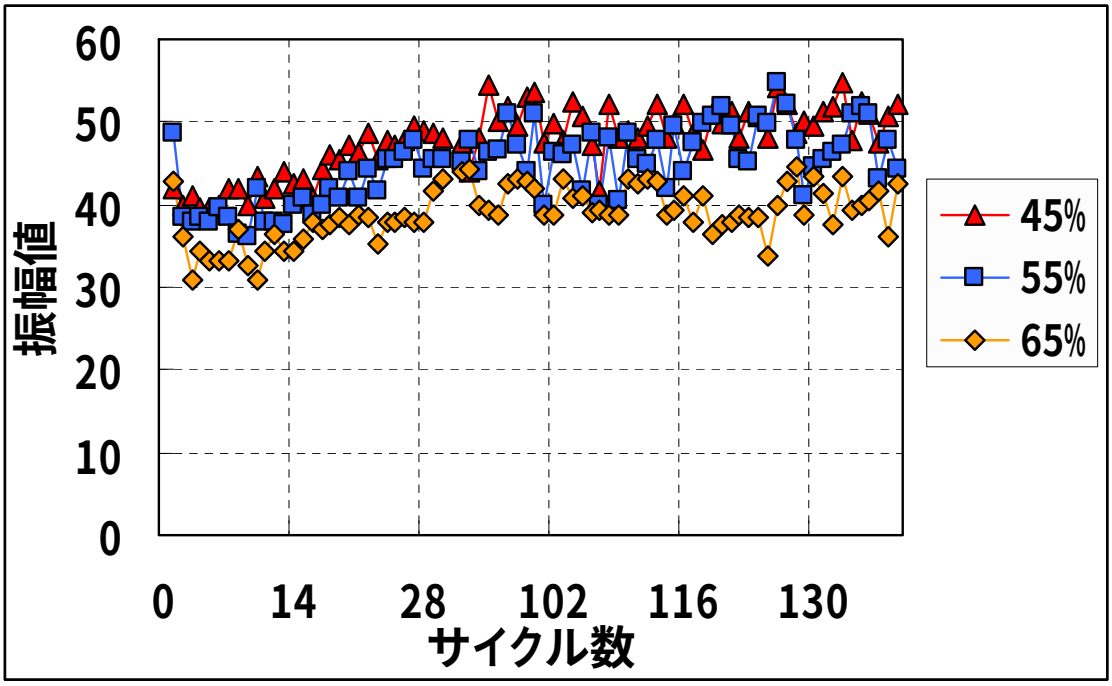


図 4-3-1　水セメント比毎の振幅値の変化（鉄板深さ 5cm）

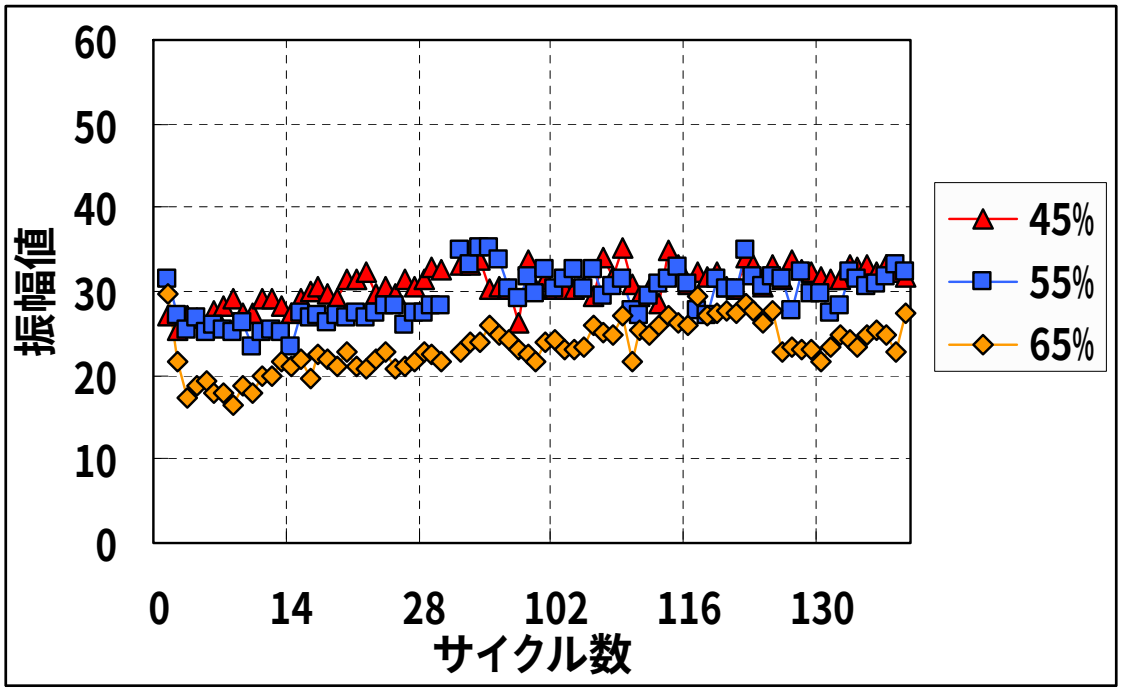


図 4-3-2　水セメント比毎の振幅値の変化（鉄板深さ 7cm）

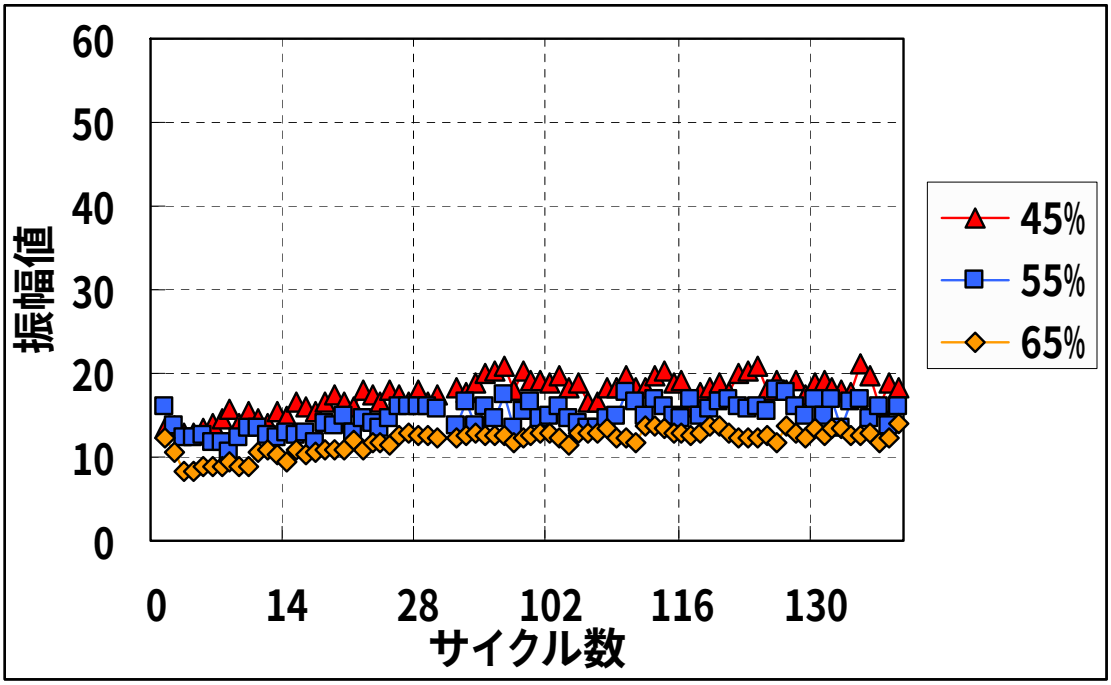


図 4-3-3　水セメント比毎の振幅値の変化（鉄板深さ 10cm）

比誘電率

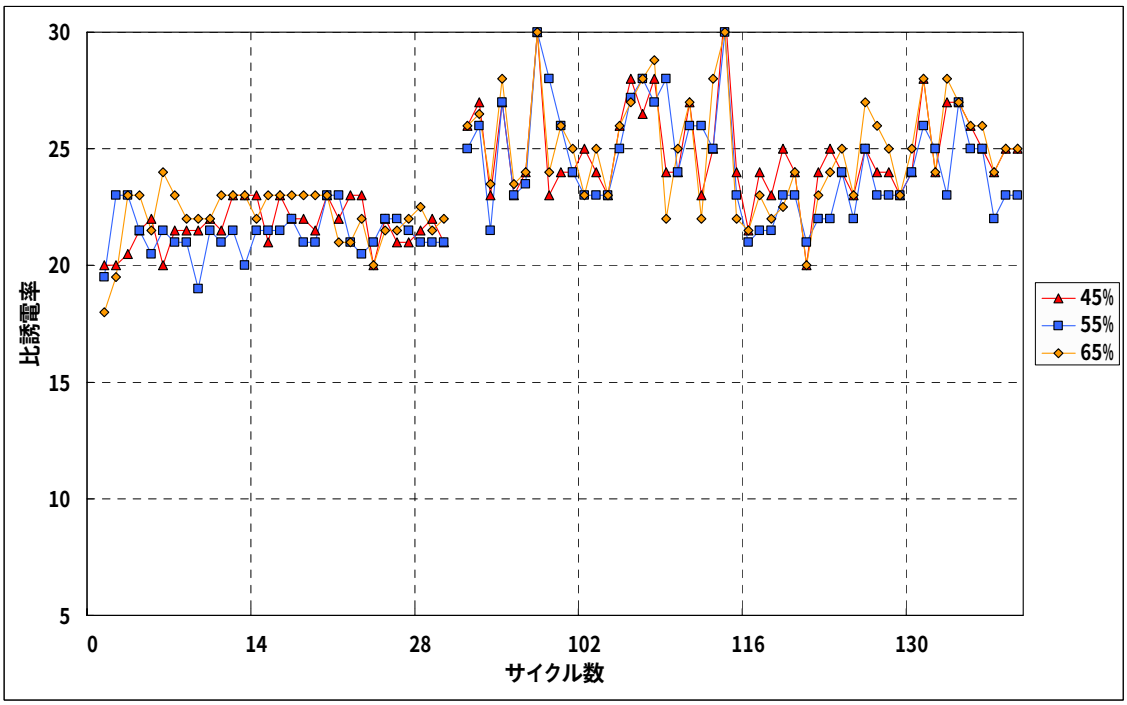


図 4-3-4　水セメント比毎の比誘電率の変化（鉄板深さ 5cm）

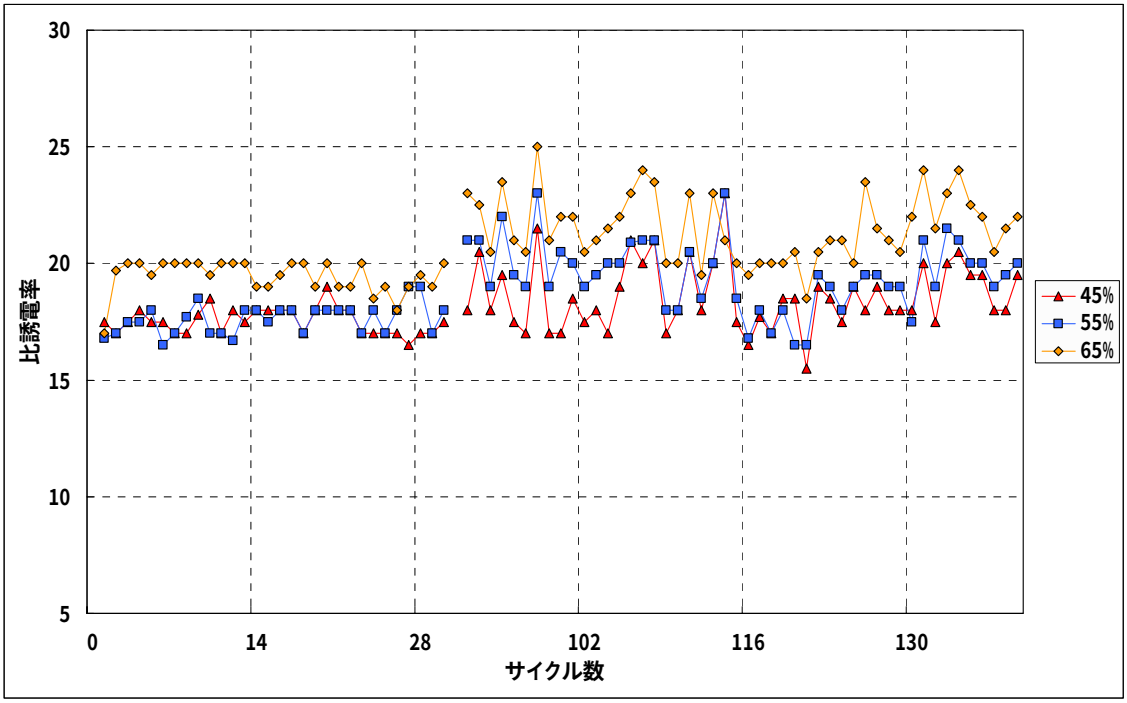


図 4-3-5　水セメント比毎の比誘電率の変化（鉄板深さ 7cm）

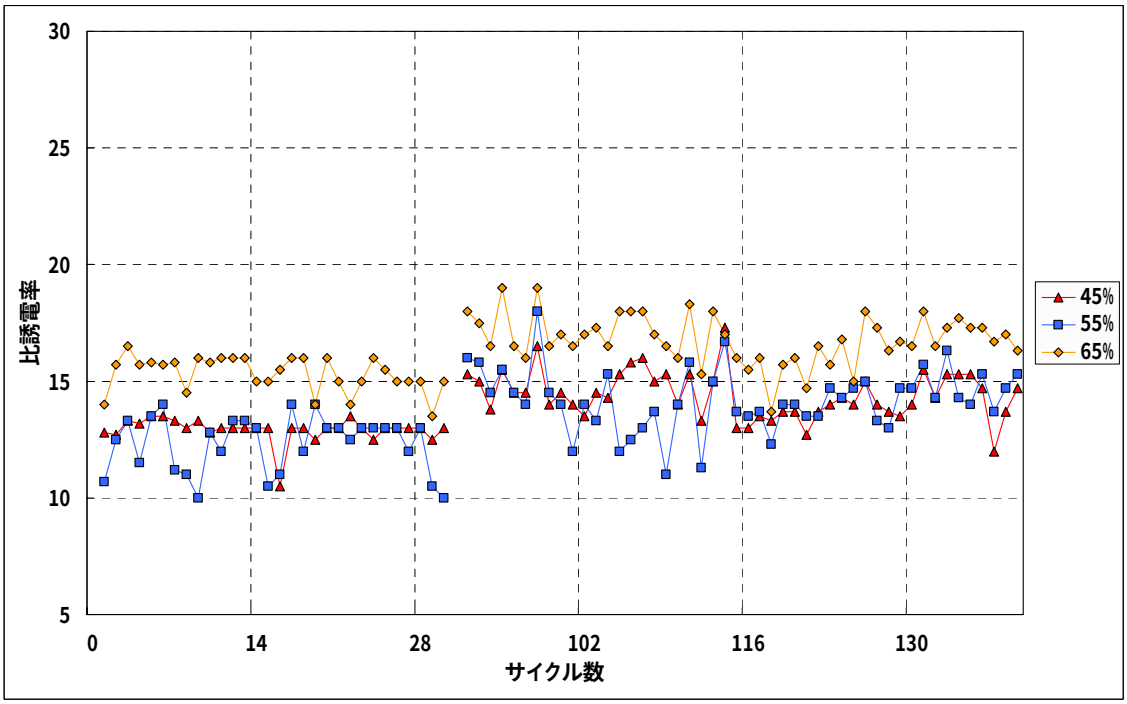


図 4-3-6　水セメント比毎の比誘電率の変化（鉄板深さ 10cm）

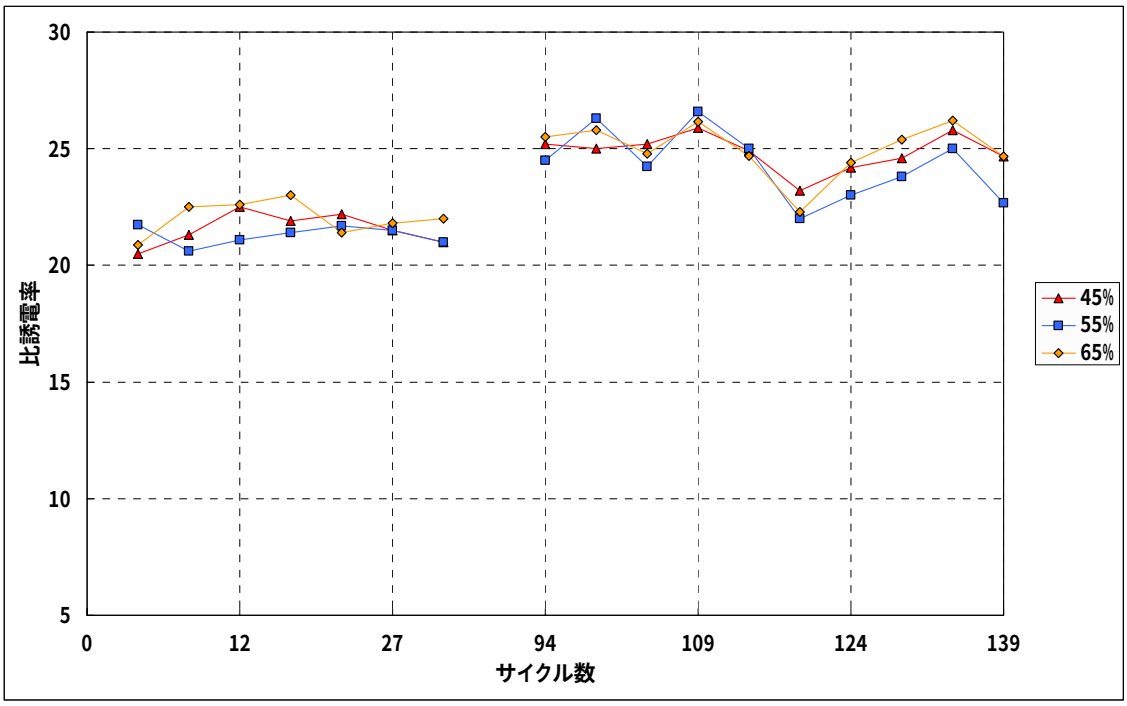


図 4-3-7　5Cycle 毎の比誘電率の平均変動（鉄板深さ 5cm）

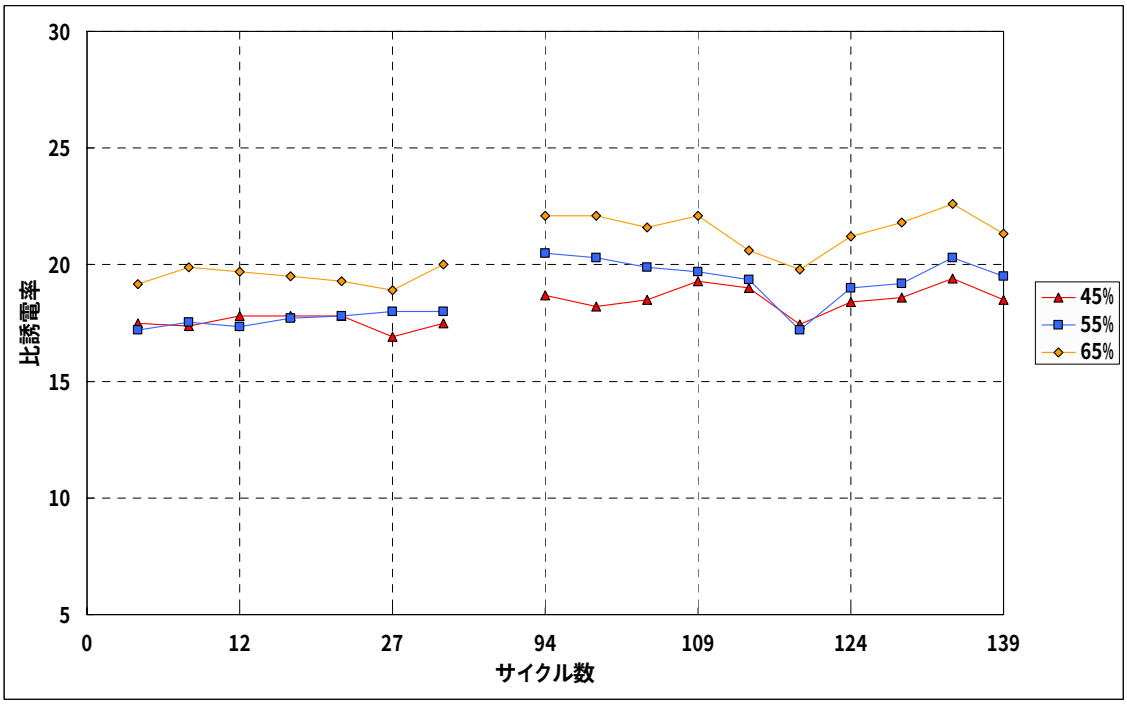


図 4-3-8　5Cycle 毎の比誘電率の平均変動（鉄板深さ 7cm）

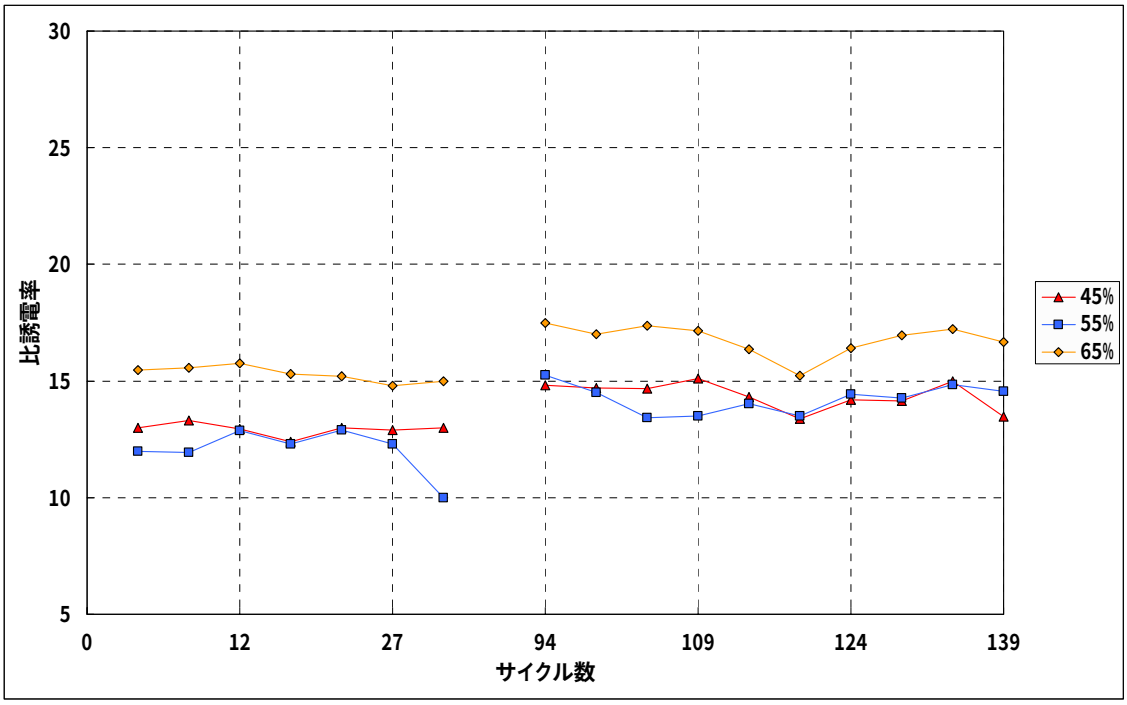


図 4-3-9　5Cycle 毎の比誘電率の平均変動（鉄板深さ 10cm）

4.4　塩水浸漬と真水浸漬の比較

塩分濃度 3%を浸漬させたものと，真水を浸漬させたものの振幅値に及ぼす影響について鉄板かぶり深さ毎に表したものを図 4-4-1～4-4-3 に示し，比誘電率については図 4-4-4～4-4-6 に示す。また，塩水と真水の差について新たな傾向をみつけるため振幅値の差分について図 4-4-7 に示す。

<u>結果・考察</u>

振幅値について，まずどの鉄板深さにおいても真水浸漬の方が塩分浸漬よりも大きくなる傾向がある。塩化物イオンが影響して真水よりも振幅値が小さくなったのだと考えられる。鉄板かぶり深さ 5cm において，塩水浸漬と真水浸漬とが同程度の値をとり，また，同一サイクルにおいて同様の増減を示している。この要因は，表面の含水状態による影響が大きいためであると考えられる。また、鉄板かぶり深さ 7cm では，他のかぶりの中で最も顕著に差異が表れている。表面含水状態にほとんど影響されない位置であり，平均化されるなかで最も差異が表れる位置であると考えられる。鉄板かぶり深さ 10cm においても同様に差異が顕著に表れているが，7cm よりも差異が小さい結果となった。この要因は，先にも述べたが，平均化される距離が長くなるほど，振幅値が小さくでるためであると考えられる。

比誘電率では，実験値にばらつきがあるがほぼ同程度の増減を示しており，塩化物イオンの影響はないものと考えられる。ばらつく要因については，微小な範囲での変動であるため，人為誤差が考えられる。

図 4-4-7 について，どの鉄板深さにおいてもばらつきが大きいためはっきりとした傾向はないが鉄板深さ 7cm 及び，10cm については若干ではあるが増加傾向にある。含水状態による影響が大きいため，表面の含水状態を測定時に一定に保つことができれば，差異が大きくでるのではないかと考えられる。また，測定継続によりはっきりとした傾向がみられたときは重回帰分析を行う上で新たな説明変数を加えることができると考えられる。

振幅値

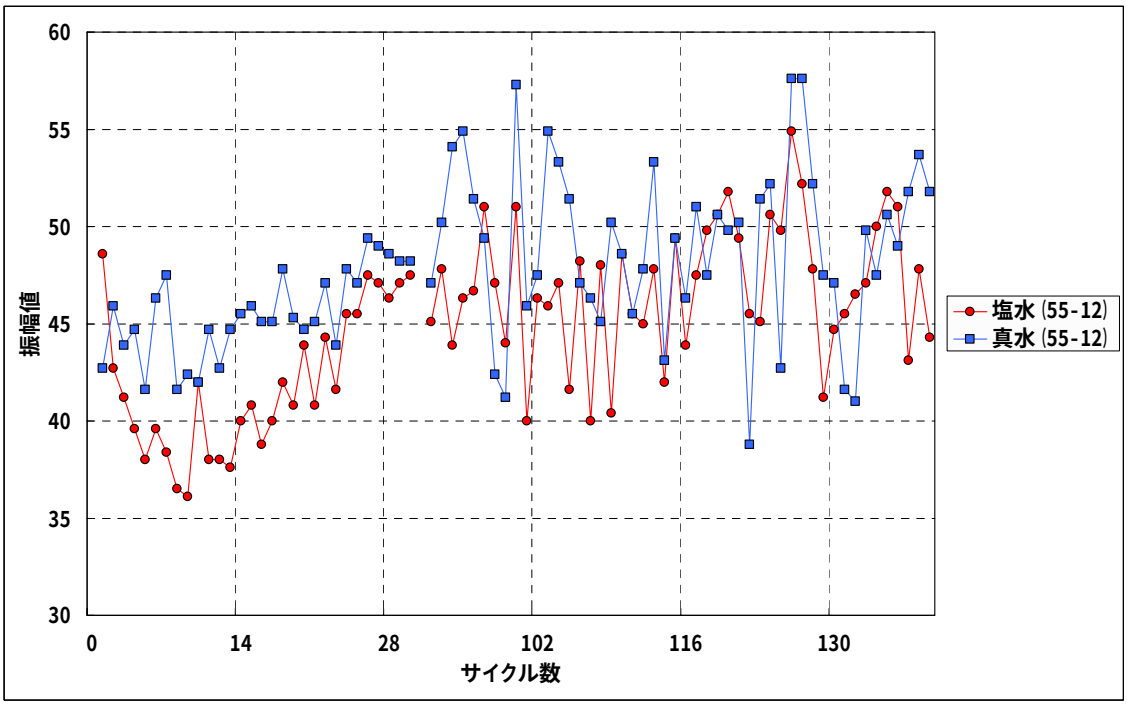


図 4-4-1　塩水と真水による振幅値の変化（鉄板深さ 5cm）

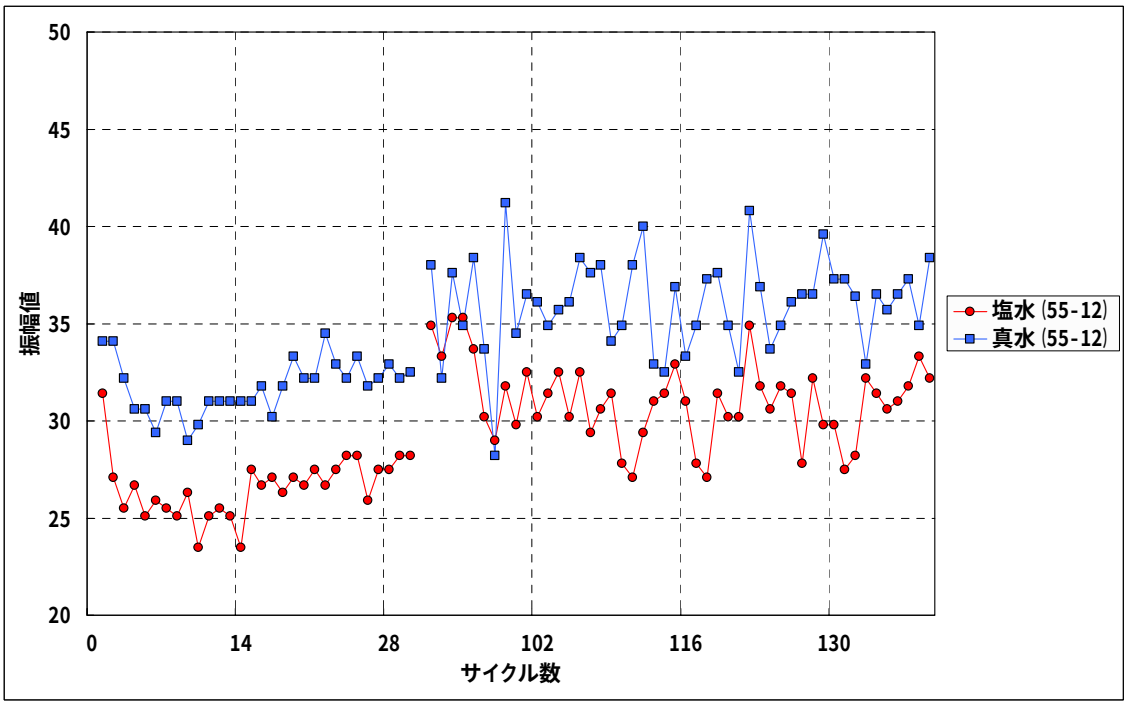


図 4-4-2　塩水と真水による振幅値の変化（鉄板深さ 7cm）

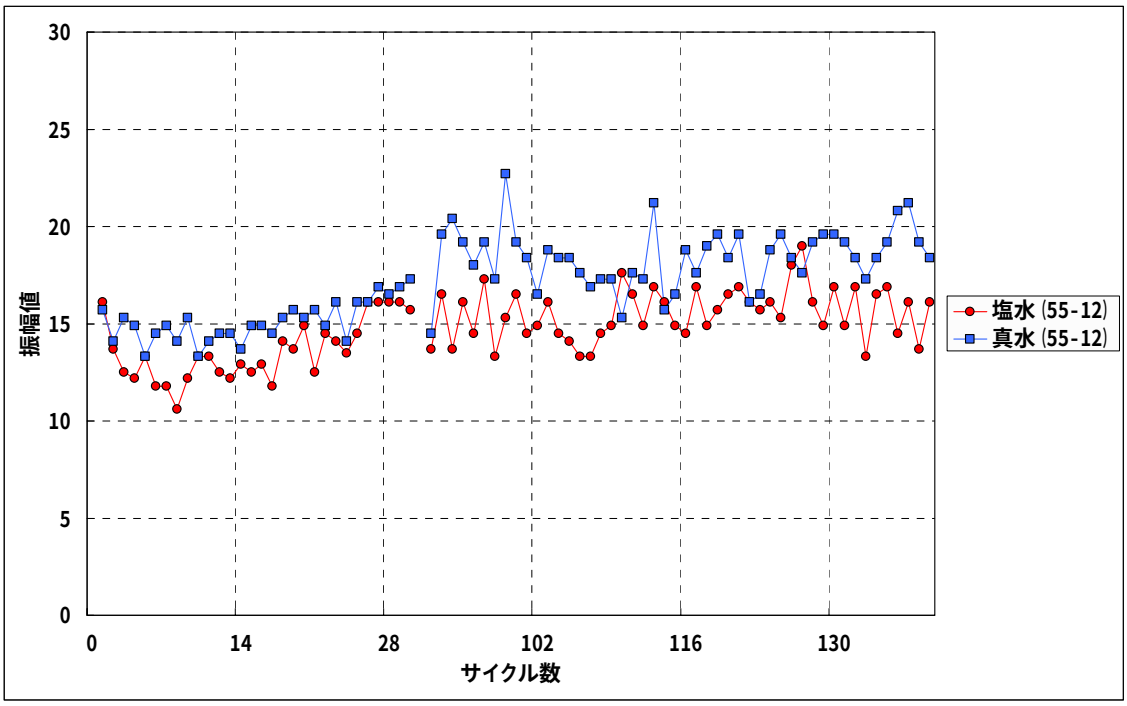


図 4-4-3　塩水と真水による振幅値の変化（鉄板深さ 10cm）

比誘電率

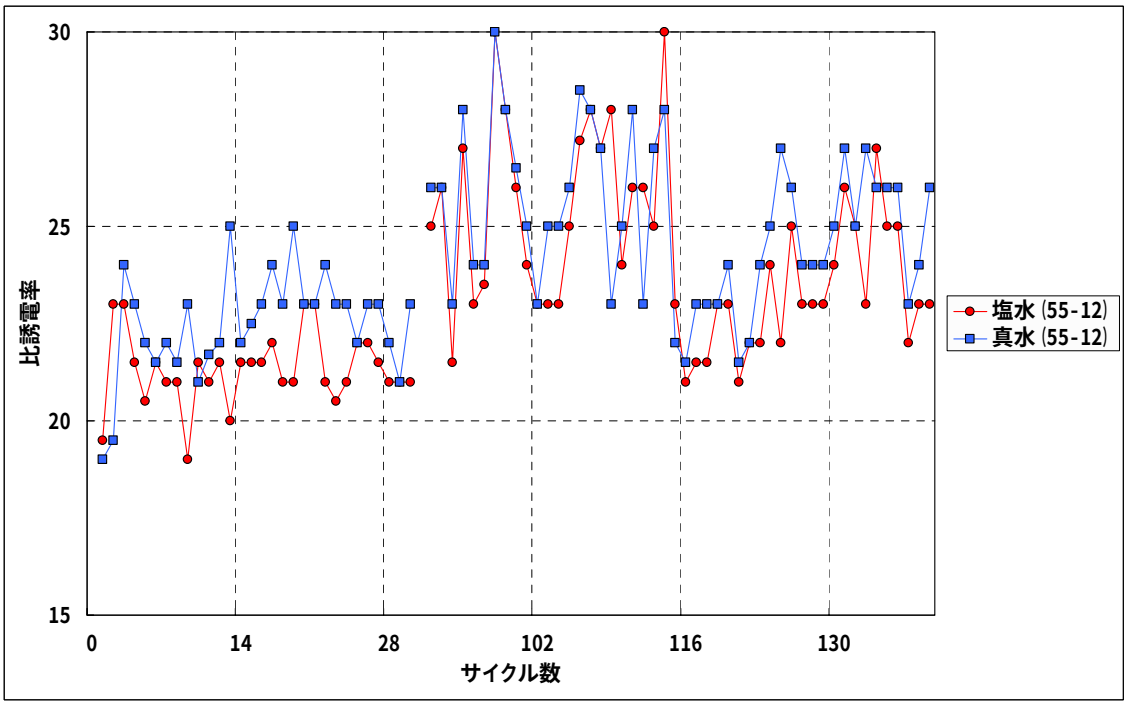


図 4-4-4　塩水と真水による比誘電率の変化（鉄板深さ 5cm）

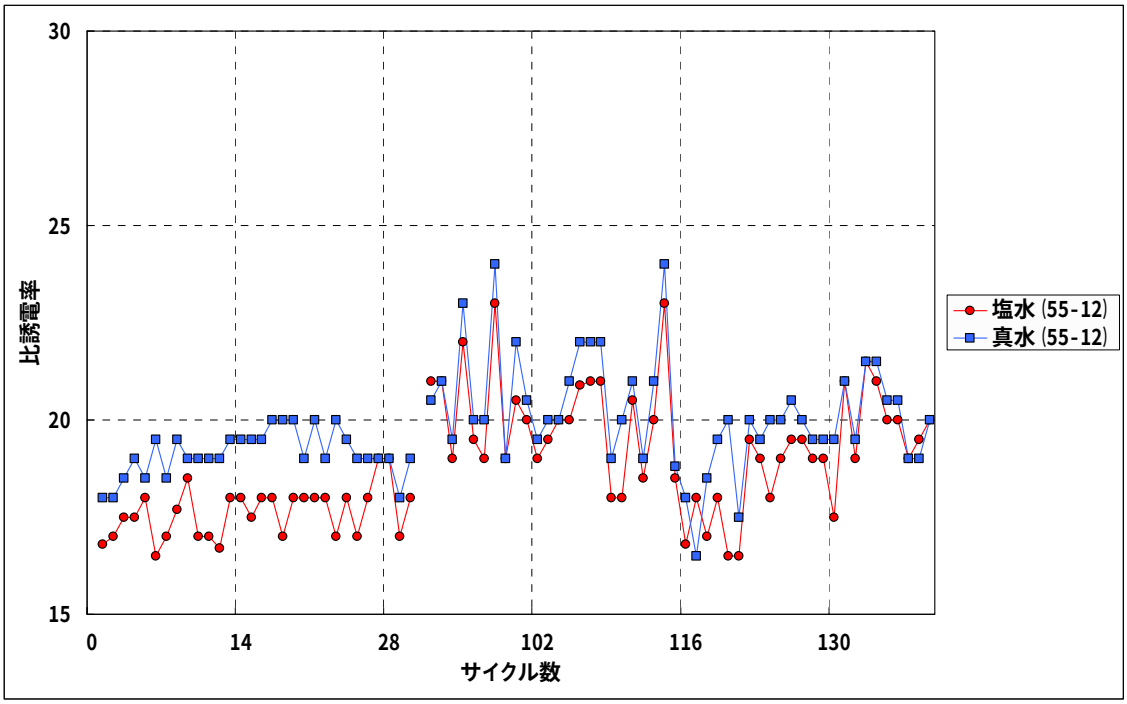


図 4-4-5　塩水と真水による比誘電率の変化（鉄板深さ 7cm）

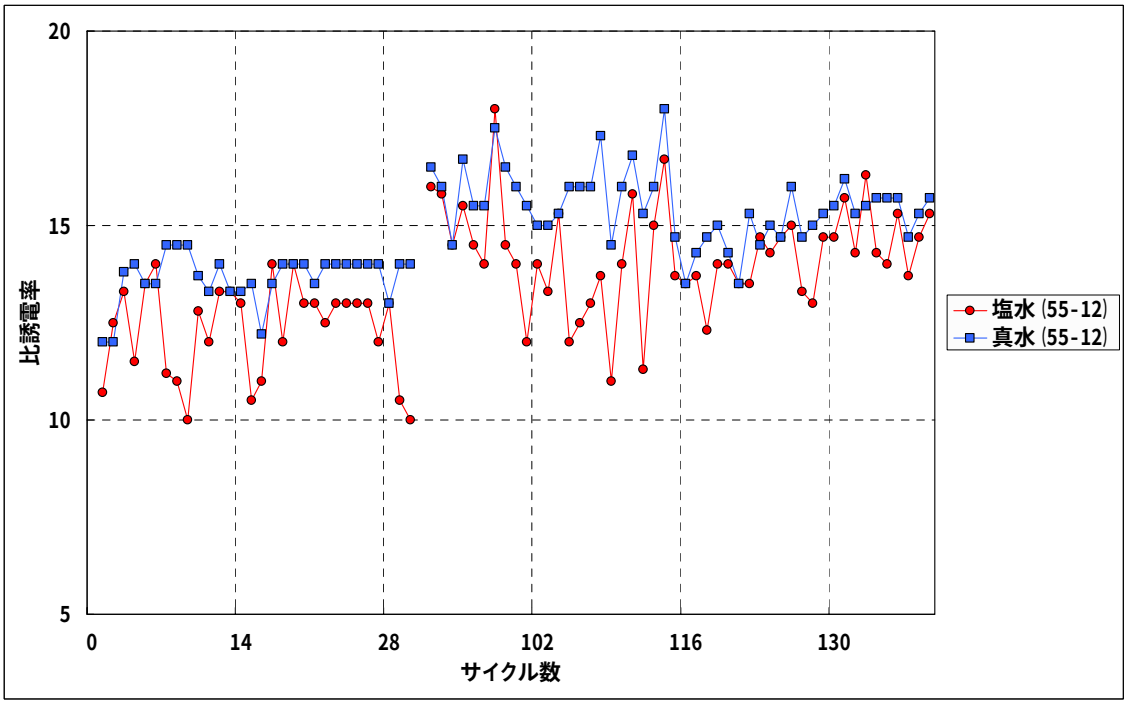


図 4-4-6　塩水と真水による比誘電率の変化（鉄板深さ 10cm）

振幅値

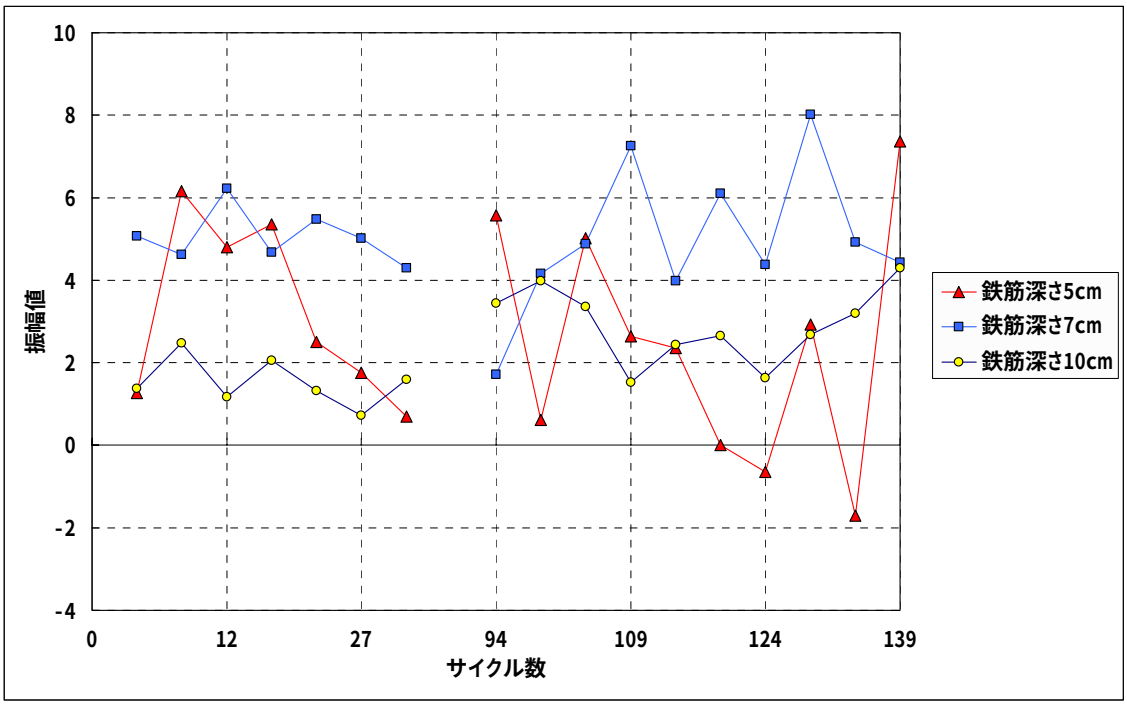


図 4-4-7　塩分浸漬と真水浸漬の差分

4.5　浸漬水溶液の濃度別比較

0Cycle から 30Cycle まではどちらも塩分濃度 3%であるが，実験途中から同水セメント比においてスランプ 21cm のみに塩分濃度 10%の塩水を浸漬させ，浸透の促進を促した。鉄板かぶり深さ毎の振幅値の経時変化について図 4-5-1～4-5-3 に示し，同様に比誘電率の経時変化について図 4-5-4～4-5-6 に示す。

<u>結果・考察</u>

図 4-5-1 に示す鉄板かぶり深さ 5cm についての振幅値は他の結果と同様に塩分濃度 3%と 10%では高濃度のほうが小さい傾向がでている。4.4 での結果にある塩水と真水同様に塩化物イオン量による影響で振幅値が小さくでるのではないかと考えられる。図 4-5-2 に示す鉄板かぶり深さ 7cm においては濃度による違いが顕著に表れており，時間の経過とともに差が大きくなる傾向がでている。この要因は，塩化物イオン量の影響であると考えられる。塩分濃度 10%程度の高濃度になると含水量の影響よりも大きいのではないかと考えられる。図 4-5-3 に示す鉄板かぶり深さ 10cm における結果についてだが，同程度の振幅値を示しており，現段階では対象位置まで塩分濃度 10%の水溶液が浸漬していないからであると考えられる。

比誘電率については，どの鉄板かぶり深さにおいても顕著な傾向がみられず，同程度の値を示す結果となった。4.4 における塩水と真水の結果と同様に塩化物イオンによる影響はないと考えられ，比誘電率のばらつきは人為誤差などによる影響だと考えられる。

振幅値

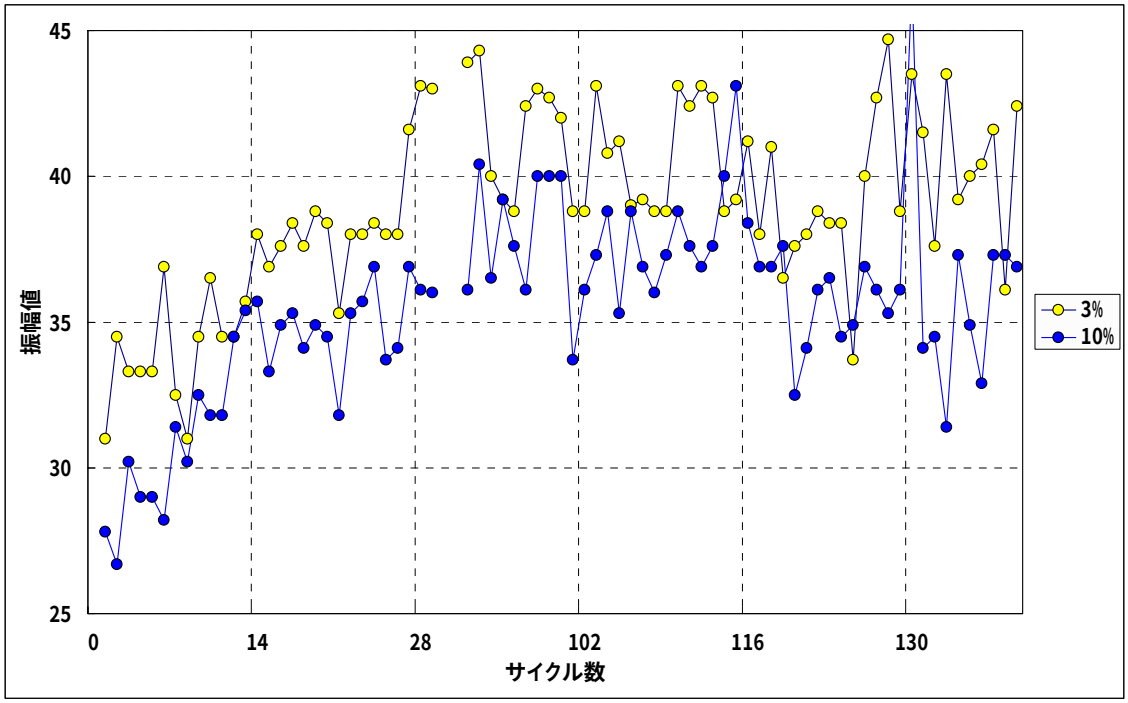


図 4-5-1　塩分濃度 3%と 10%の振幅値比較（鉄板かぶり深さ 5cm）

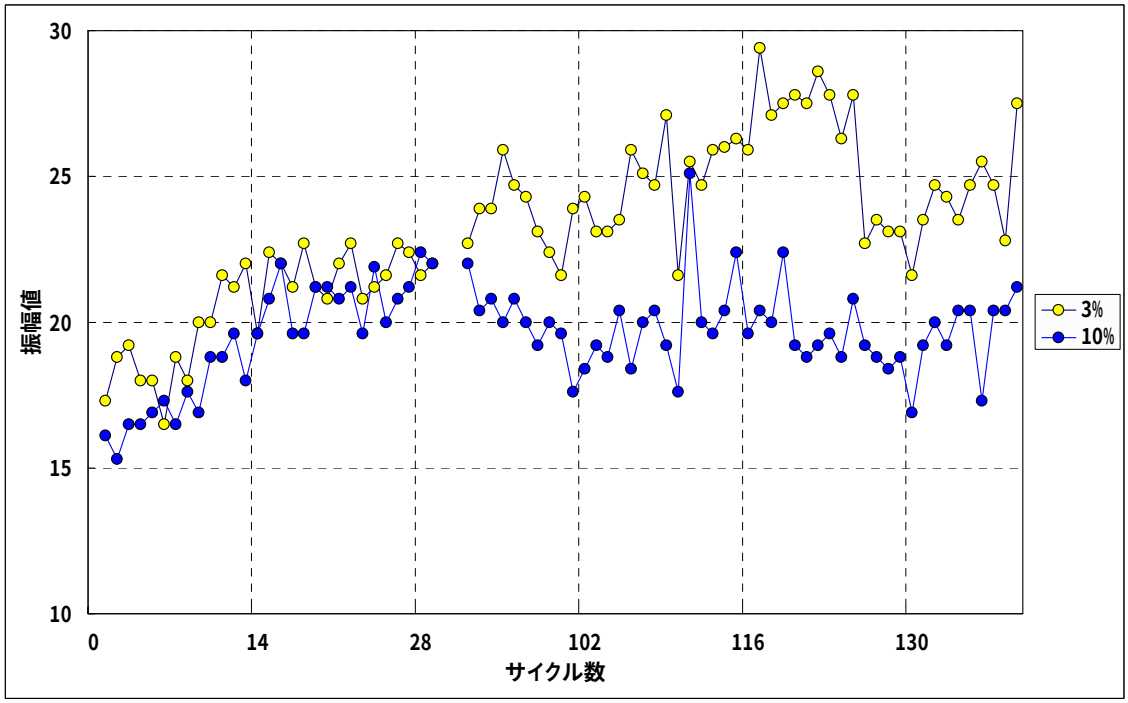


図 4-5-2　塩分濃度 3%と 10%の振幅値比較（鉄板かぶり深さ 7cm）

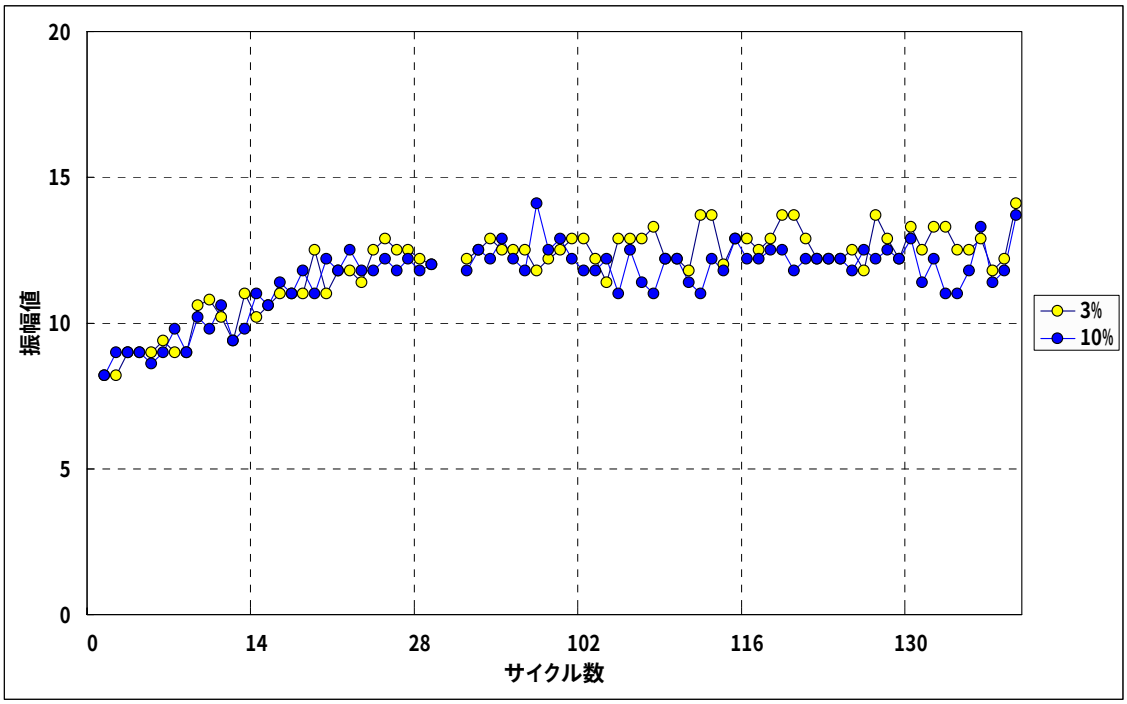


図 4-5-3　塩分濃度 3%と 10%の振幅値比較（鉄板かぶり深さ 10cm）

比誘電率

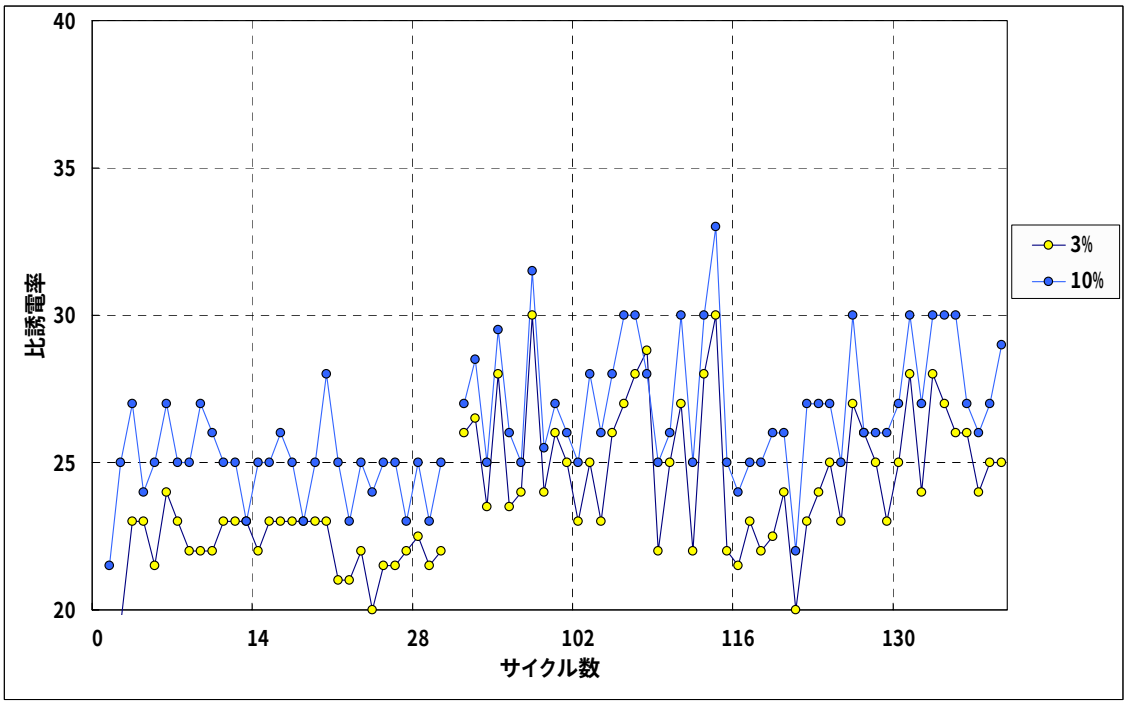


図 4-5-4　塩分濃度 3%と 10%の比誘電率比較（鉄板かぶり深さ 5cm）

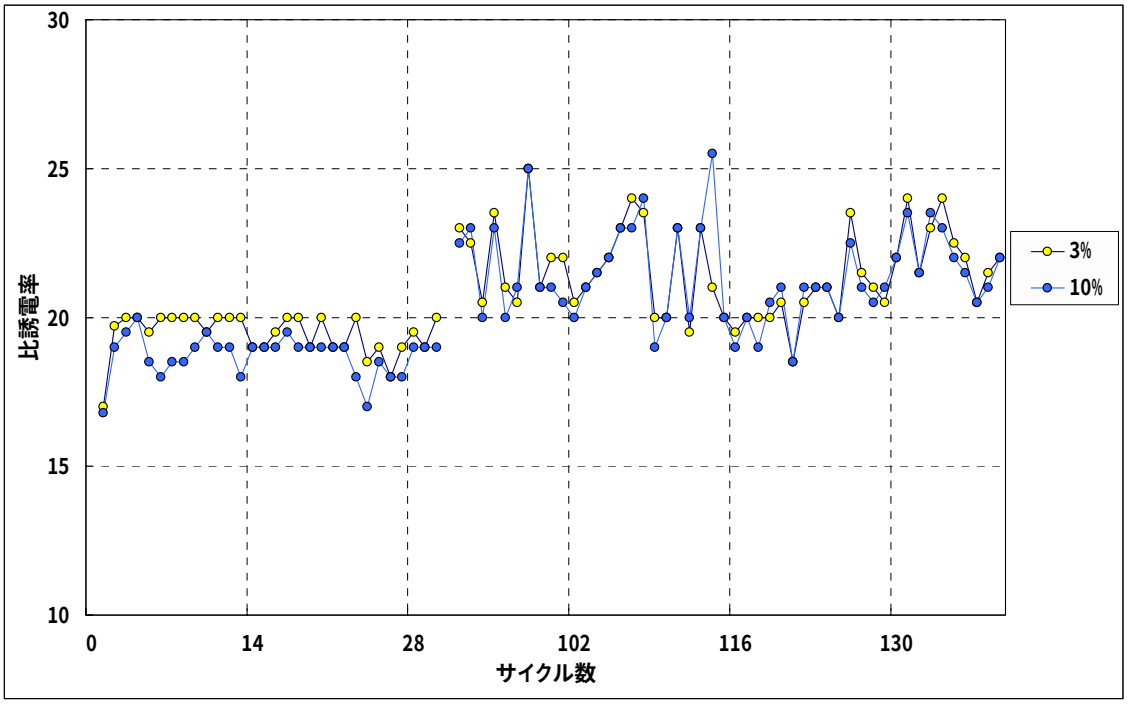


図 4-5-5　塩分濃度 3%と 10%の比誘電率比較（鉄板かぶり深さ 7cm）

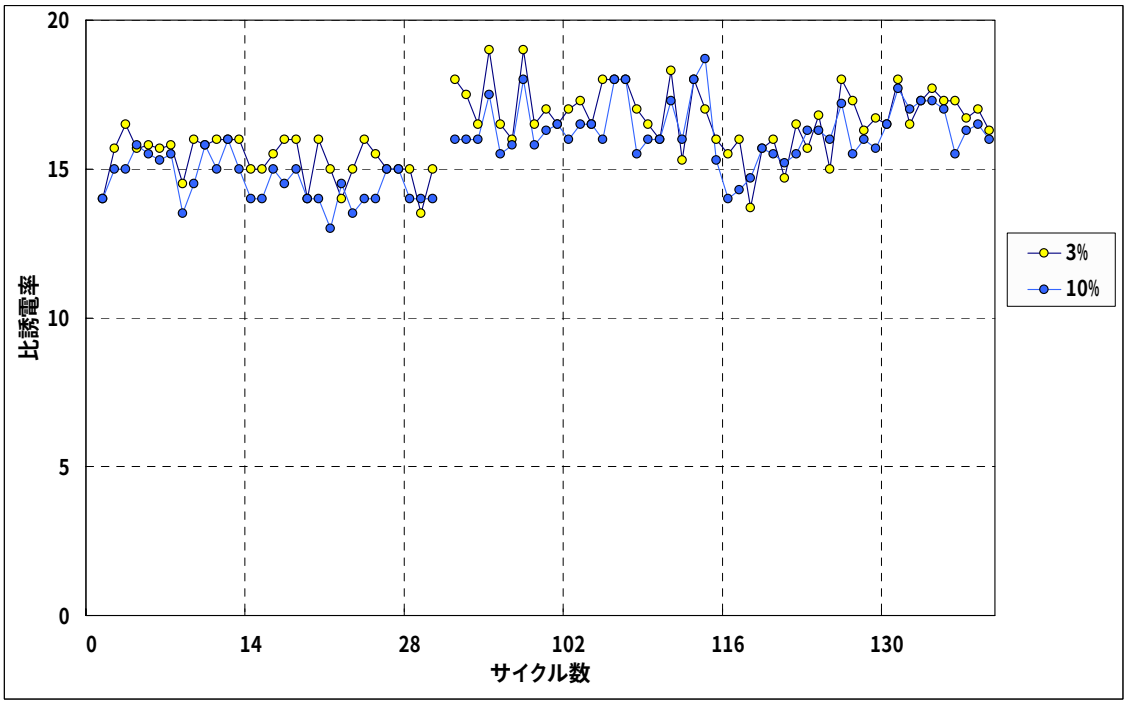


図 4-5-6　塩分濃度 3%と 10%の比誘電率比較（鉄板かぶり深さ 10cm）

第5章　インピーダンス法の試験結果

ここでは，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のか，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。

5.1　埋設される電極深さ毎の実効値の変化

ここでは，埋設されている銀電極の深さごとにおいて，周波数の変化によって各々の実効値がどのように変化するのかについての比較・検討を行った。また，2004 年度の研究により最大実効値が取得できる周波数帯域は 38Mhz 前後程度となっている。

水セメント比 45%の塩分浸漬させた 1Cycle 目，140Cycle 目の実効値の周波数による変化について図 5-1-1，5-1-2 に示し，真水浸漬の 1Cycle 目，140Cycle 目を図 5-1-3，5-1-4 に示す。同様に W/C=55%について図 5-1-5～5-1-8 に示し，W/C=65%は図 5-1-9～5-1-12 に示す。

<u>結果・考察</u>

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，既往の研究どおり，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。この結果は、既往の研究どおり，水分浸透が実効値に影響を与えていると考えられる。表面の実効値測定に関して 1～30Cycle 程度までは，銀電極を表面に等間隔に置き，重石しただけのものであったため，実験データが他よりも大きくでてしまっているが，専用のアタッチメントを作成し測定を行いはじめてからは安定した値を取得することができるようになった。しかし、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、既往の研究どおり 38MHz 付近に収まっていたが，徐々に最大実効値が弱冠遅れて計測される傾向にあったため，測定する周波数帯域を広くとり計測を行う必要がある。

また，どの水セメント比における真水浸漬については深さ別の実効値の変化が顕著にみえる傾向であるが，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。1Cycle 目の表面の実効値の変化において他のかぶり深さよりも大きくでており，最大実効値が取得できる周波数も若干ではあるが他のものより大きくなっている傾向にある。この要因は，先にも述べたが表面の測定に際しては測定方法が確立されておらず，人為誤差による影響が大きくでているためであると考えられる。

水セメント比 45%

塩分浸漬

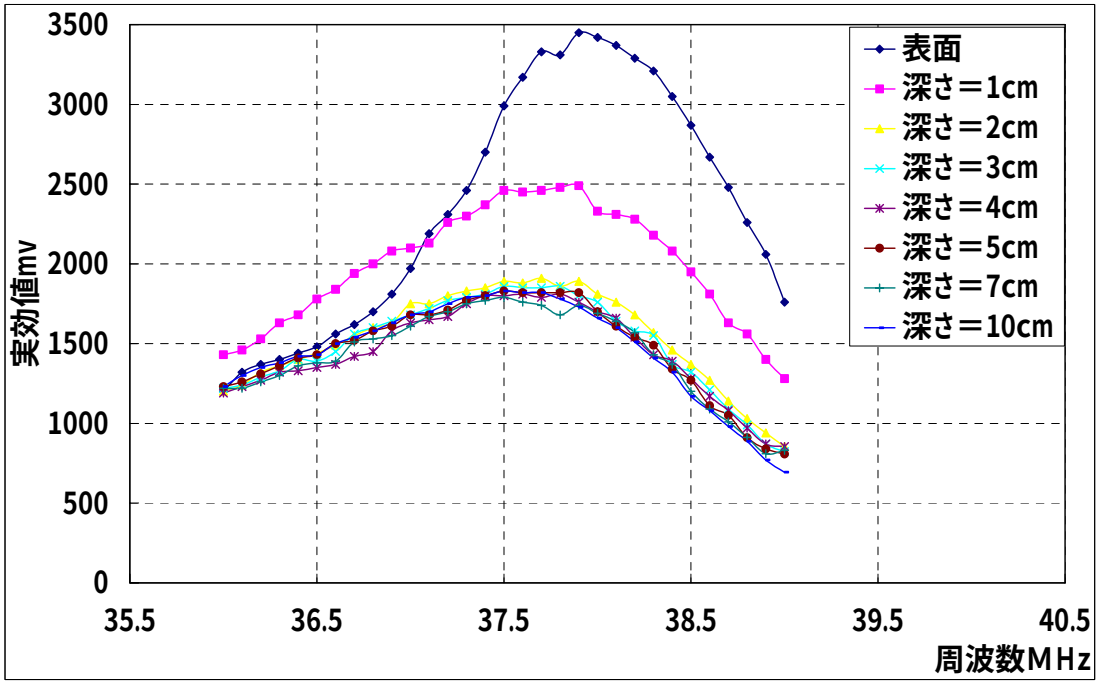


図 5-1-1　電極深さごとの実効値の変化（1Cycle）

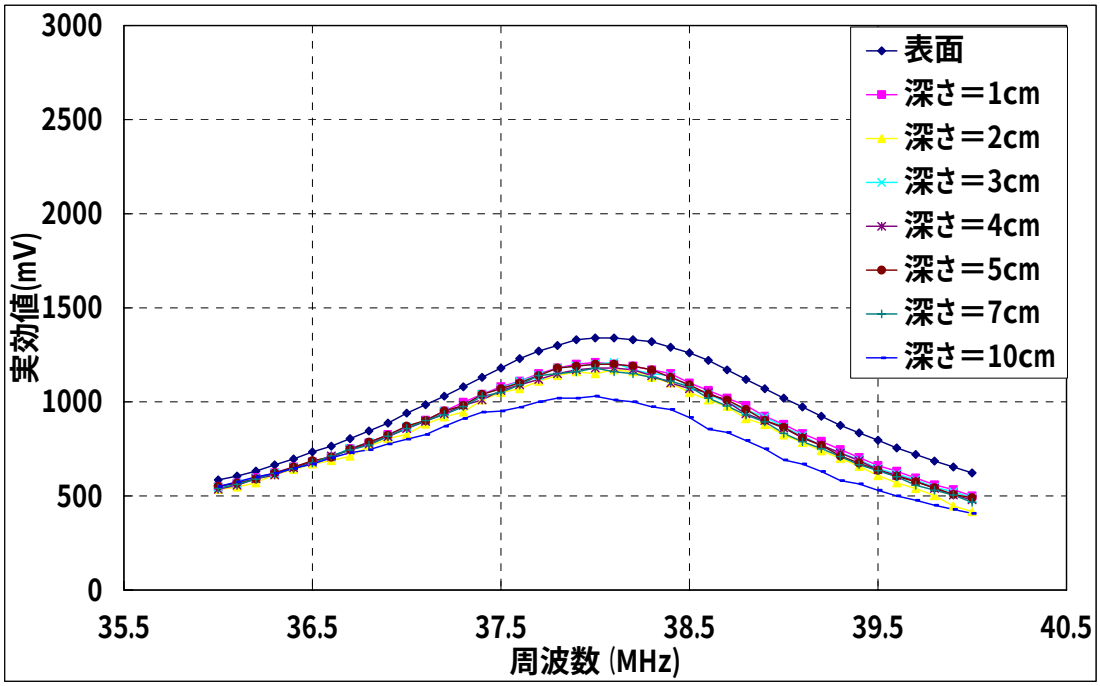


図 5-1-2　電極深さごとの実効値の変化（140Cycle）

水セメント比 45%

真水浸漬

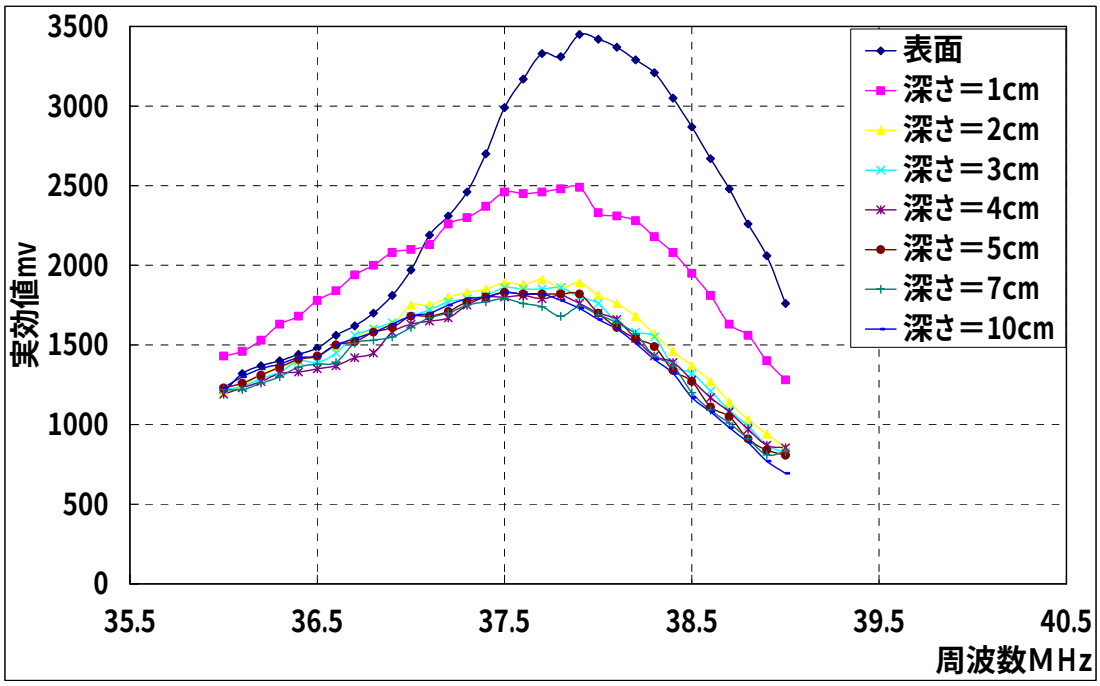


図 5-1-3　電極深さごとの実効値の変化（1Cycle）

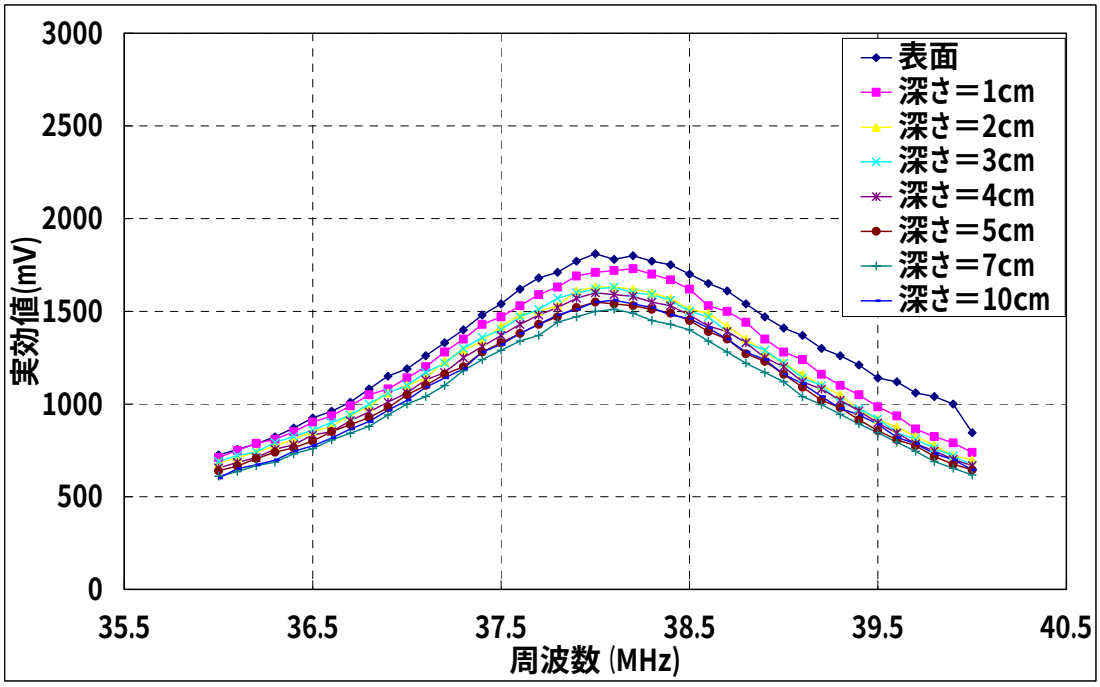


図 5-1-4　電極深さごとの実効値の変化（140Cycle）

水セメント比 55%

塩分浸漬

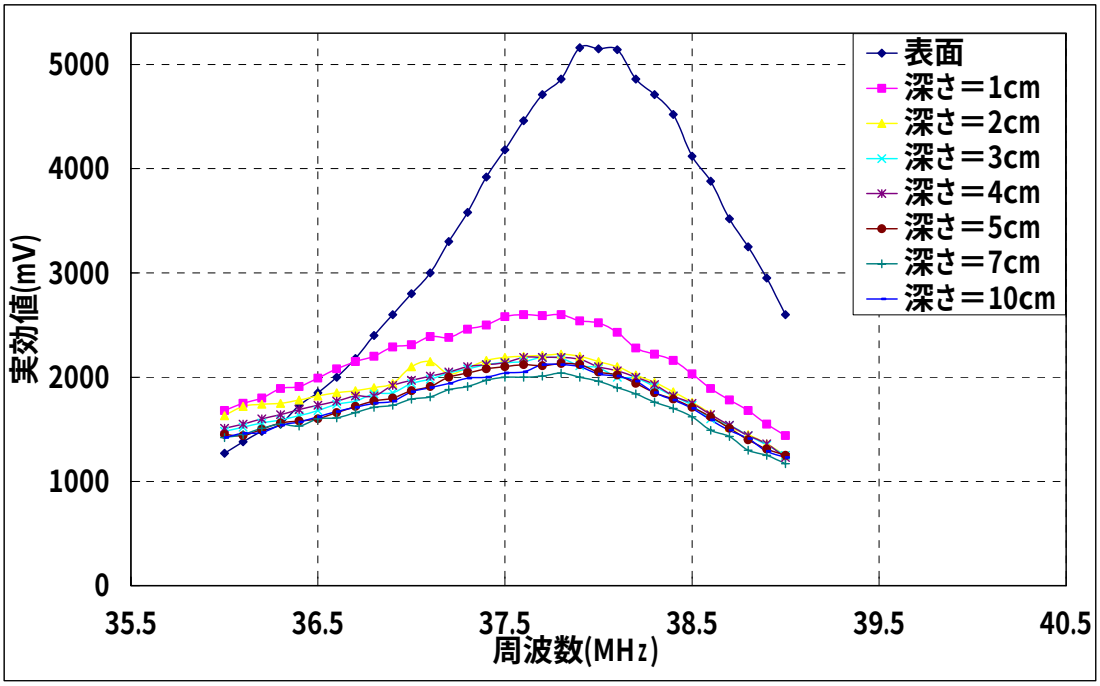


図 5-1-5　電極深さごとの実効値の変化（1Cycle）

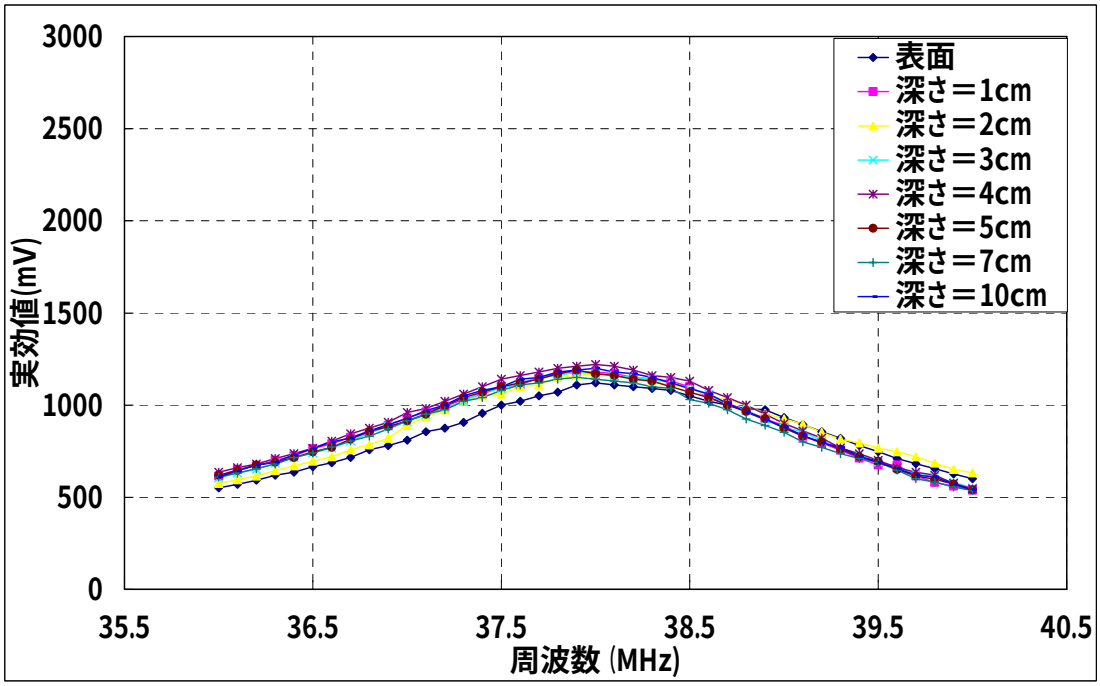


図 5-1-6　電極深さごとの実効値の変化（140Cycle）

水セメント比 55%

真水浸漬

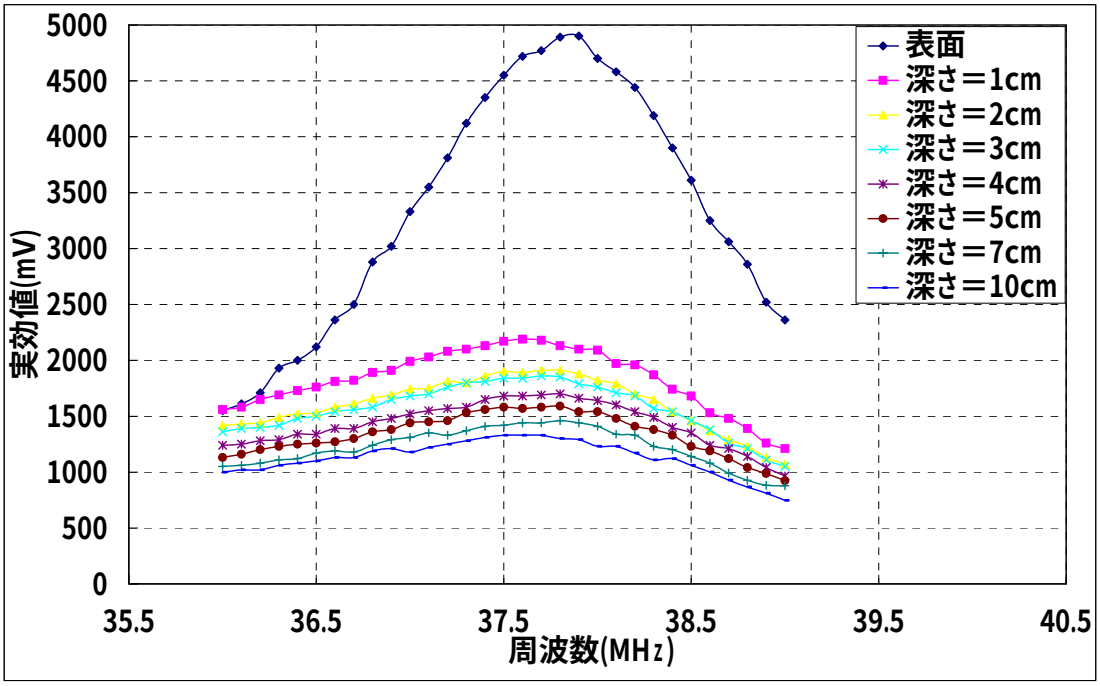


図 5-1-7　電極深さごとの実効値の変化（1Cycle）

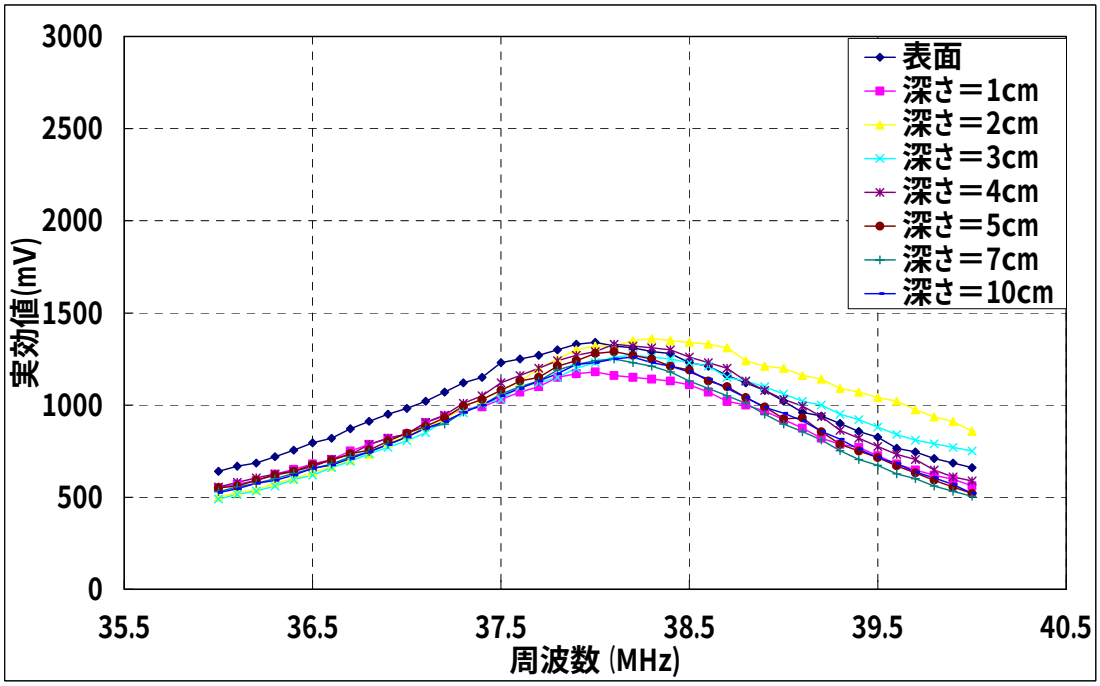


図 5-1-8　電極深さごとの実効値の変化（140Cycle）

水セメント比 65%

塩分浸漬

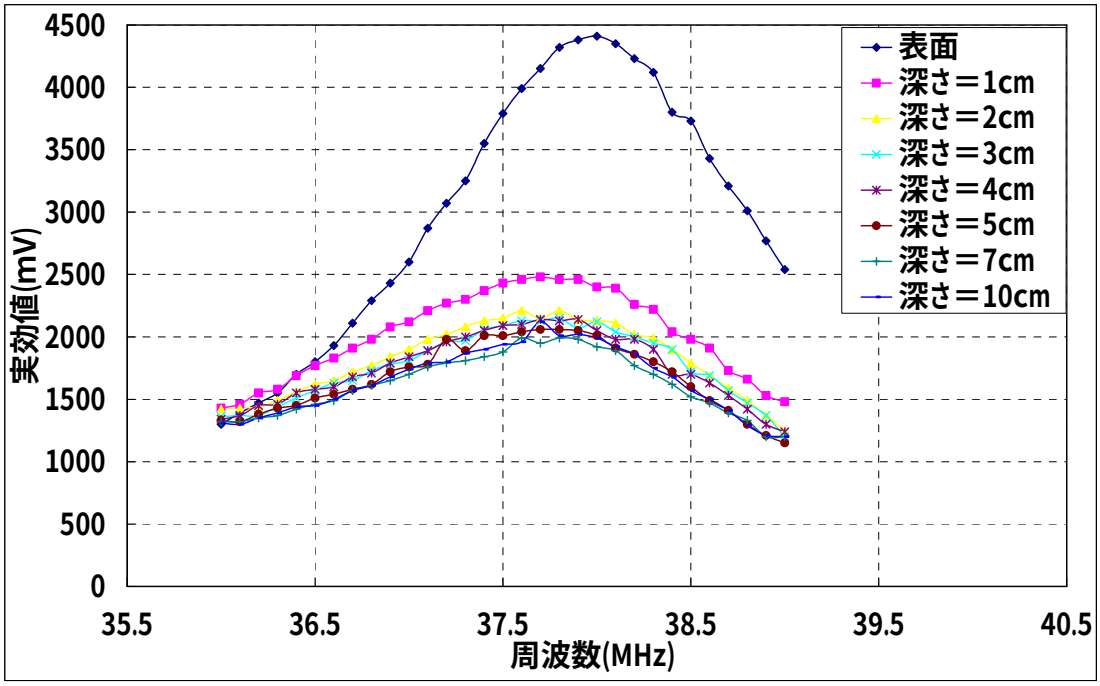


図 5-1-9　電極深さごとの実効値の変化（1Cycle）

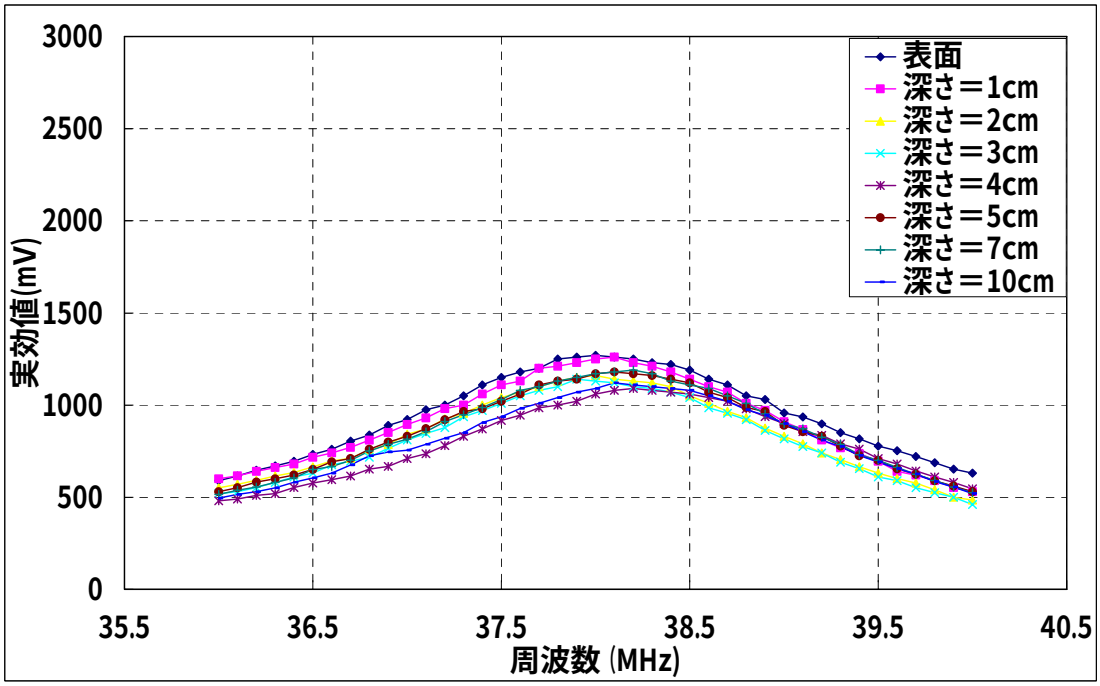


図 5-1-10　電極深さごとの実効値の変化（140Cycle）

水セメント比 65%

真水浸漬

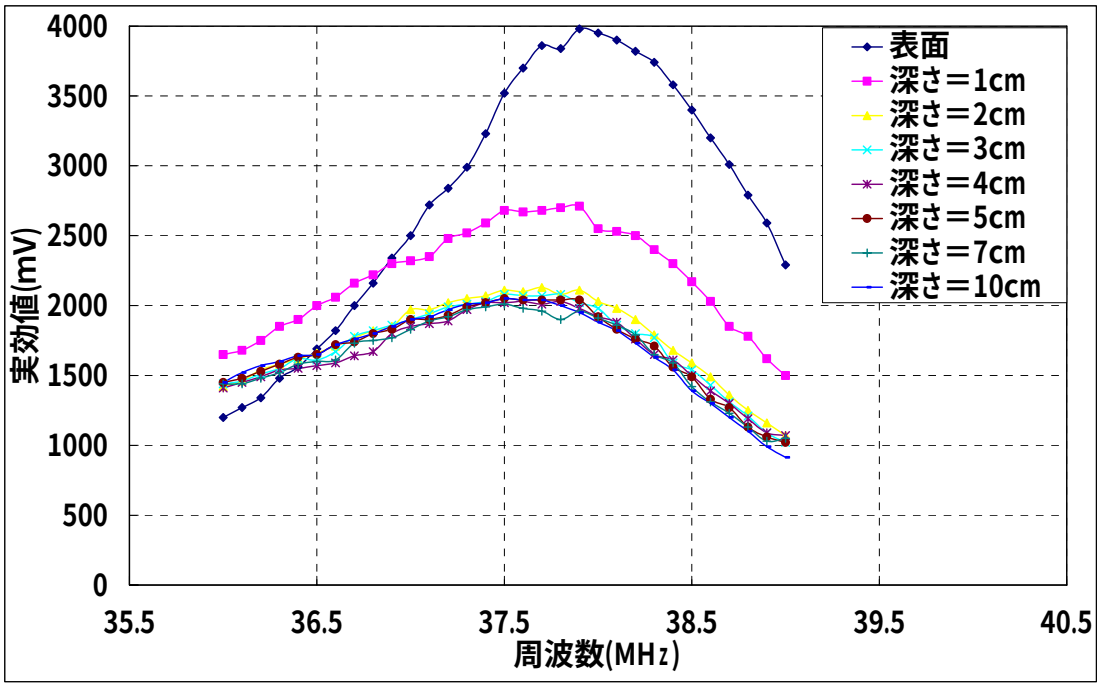


図 5-1-11　電極深さごとの実効値の変化（1Cycle）

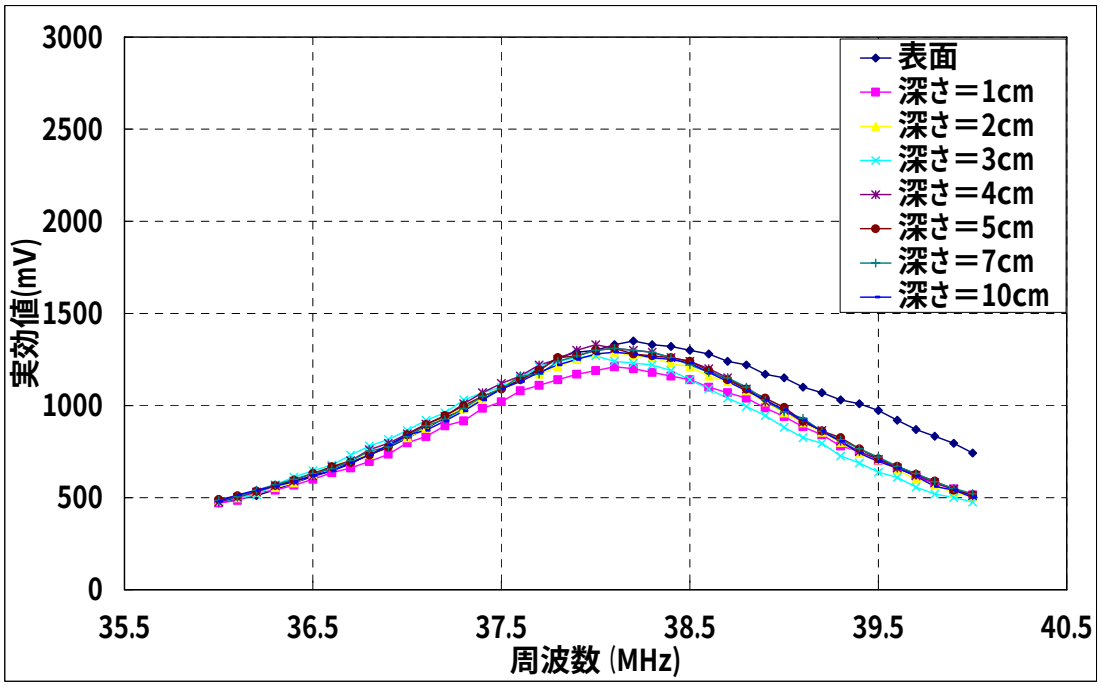


図 5-1-12　電極深さごとの実効値の変化（140Cycle）

5.2　スランプ毎の最大実効値の変化

塩分浸漬させた W/C=45%, 表面のスランプ毎の最大実効値の経時変化を図 5-2-1 に示し，W/C=55％を図 5-2-2 に, W/C=65%を図 5-2-3 に示す。また, 真水浸漬させた結果を図 5-2-4～5-2-6 に示す。同様に電極かぶり深さ 5cm による結果を図 5-2-7～5-2-12 に示し，電極かぶり深さ 10cm について図 5-2-13～5-2-18 に示す。

<u>結果・考察</u>

塩分浸漬における表面の実効値について，どの電極のかぶり深さにおいてもばらつきがあるがスランプによる大きな変化はみられなかった。また，真水浸漬も同様に特に大きな差異はなく同程度の値を示した。しかし，塩分浸漬のほうが真水浸漬よりも若干ではあるが，実効値の増減が大きいといった傾向がみられた。この要因は，実効値に対して塩化物イオンの影響が大きいためであると考えられる。電磁波と同様にインピーダンス法においてもスランプによる影響がでると考えられたが，大きな影響を確認できなかった。この要因は，インピーダンス法による測定は電磁波法による測定よりも水分の影響を受けやすく，コンクリート内部の微量の含水量などに影響されてしまっておりスランプによる単位水量の違いによる影響はでないのではないかと考えられる。

また，電極のかぶりが深くなるとともに値の増減によるばらつきは小さくなり，同程度の値を示す傾向にあった。この結果からも，スランプによる影響は実効値に対してほとんどないと考えられる。

図 5-2-2，5-2-5 の若材齢において最大実効値が大きくなっているのは，水中養生して間もないため，コンクリート内部の含水状態に起因するのではないかと考えられる。

塩分浸漬

表面

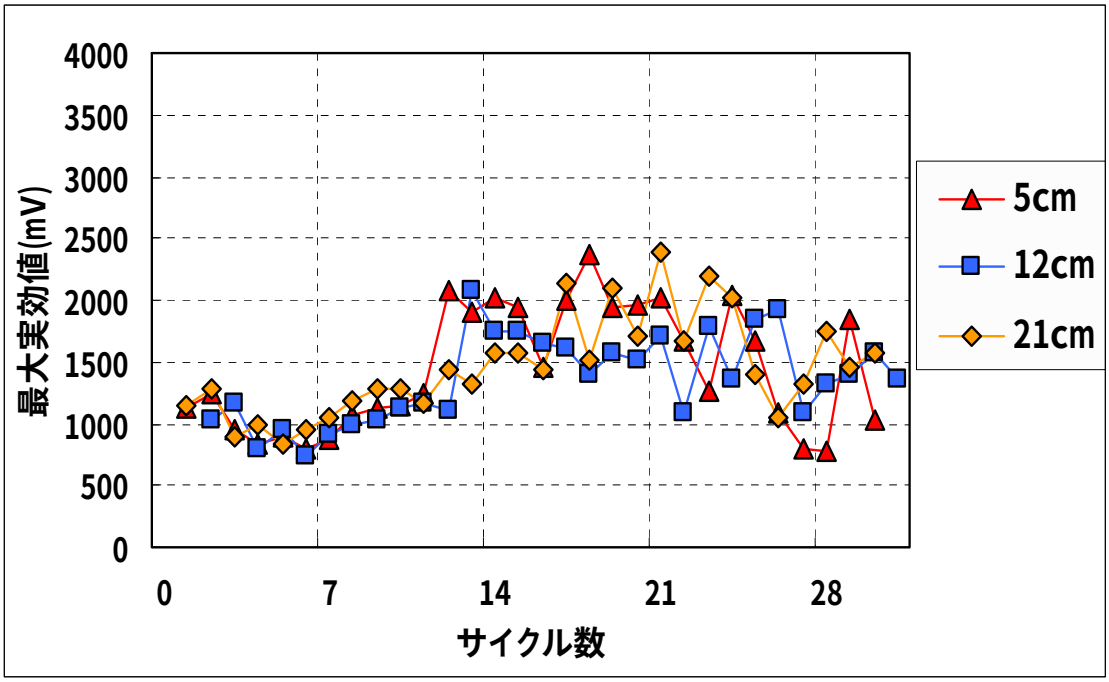


図 5-2-1　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=45%）

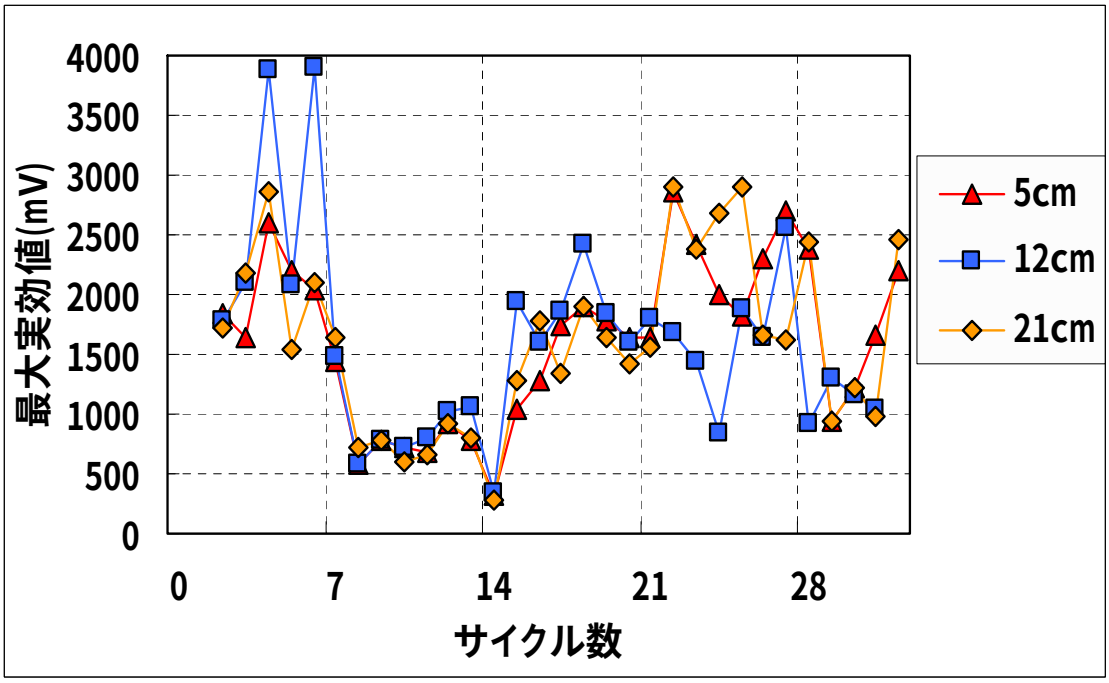


図 5-2-2　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=55%）

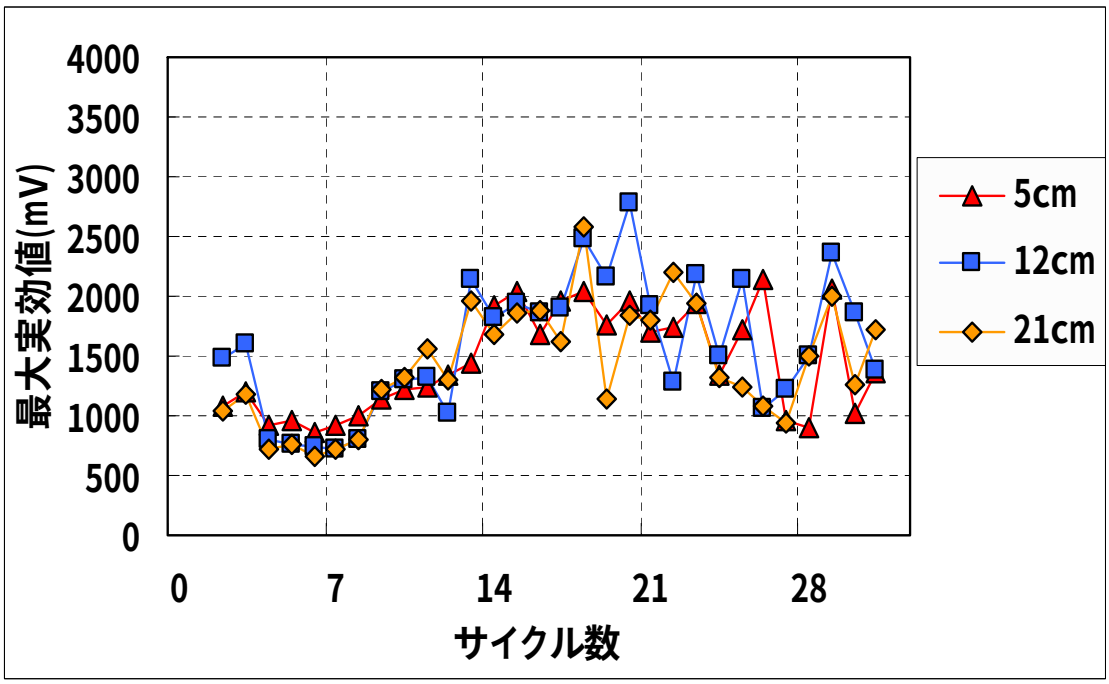


図 5-2-3　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=65%）

真水浸漬　表面

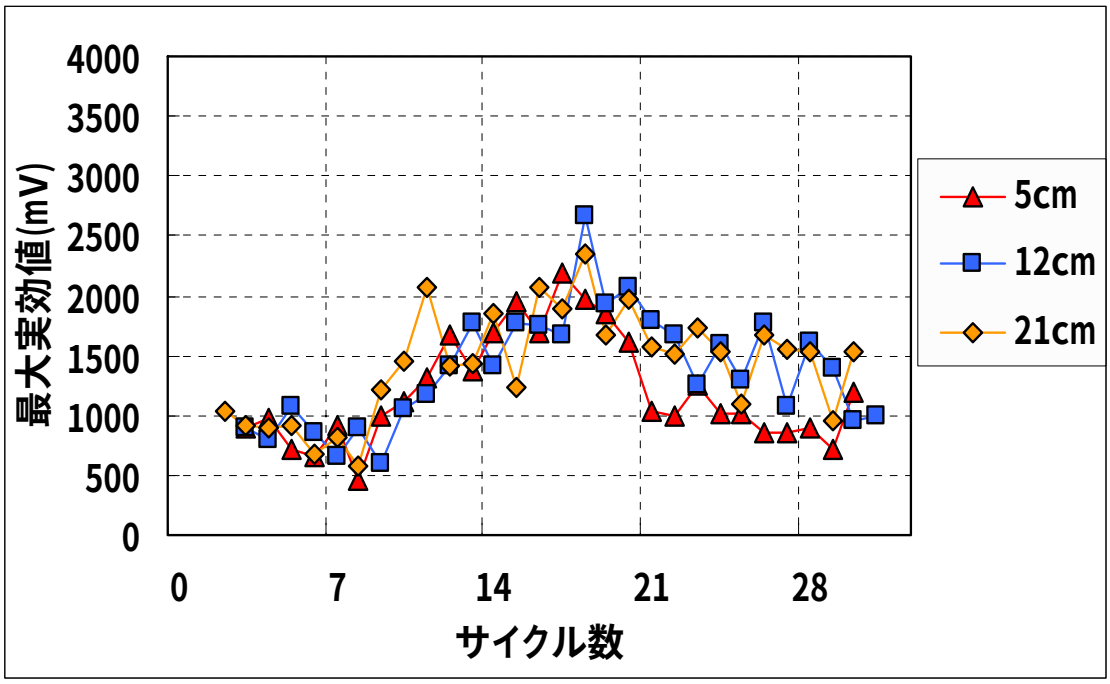


図 5-2-4　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=45%）

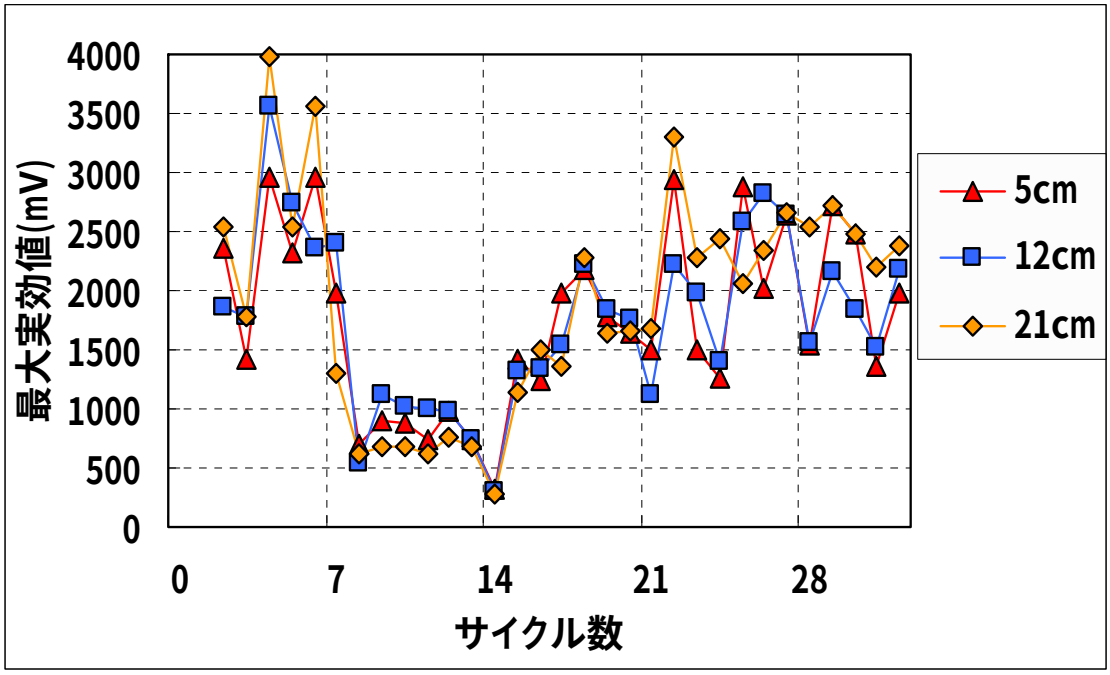


図 5-2-5　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=55%）

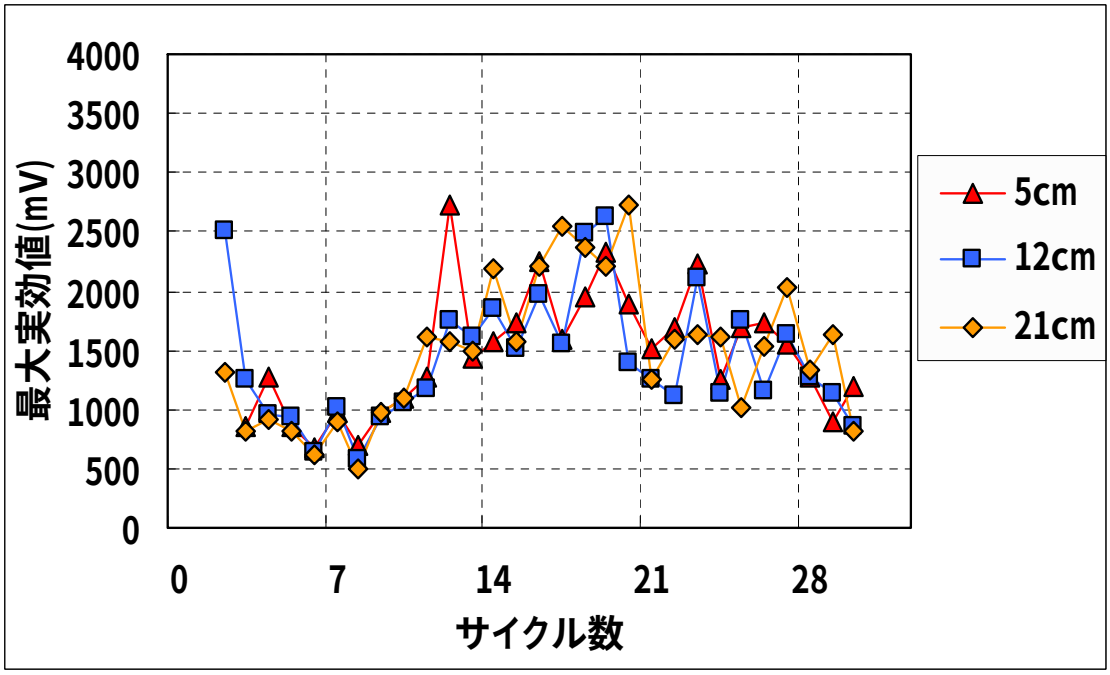


図 5-2-6　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=65%）

塩分浸漬　深さ 5cm

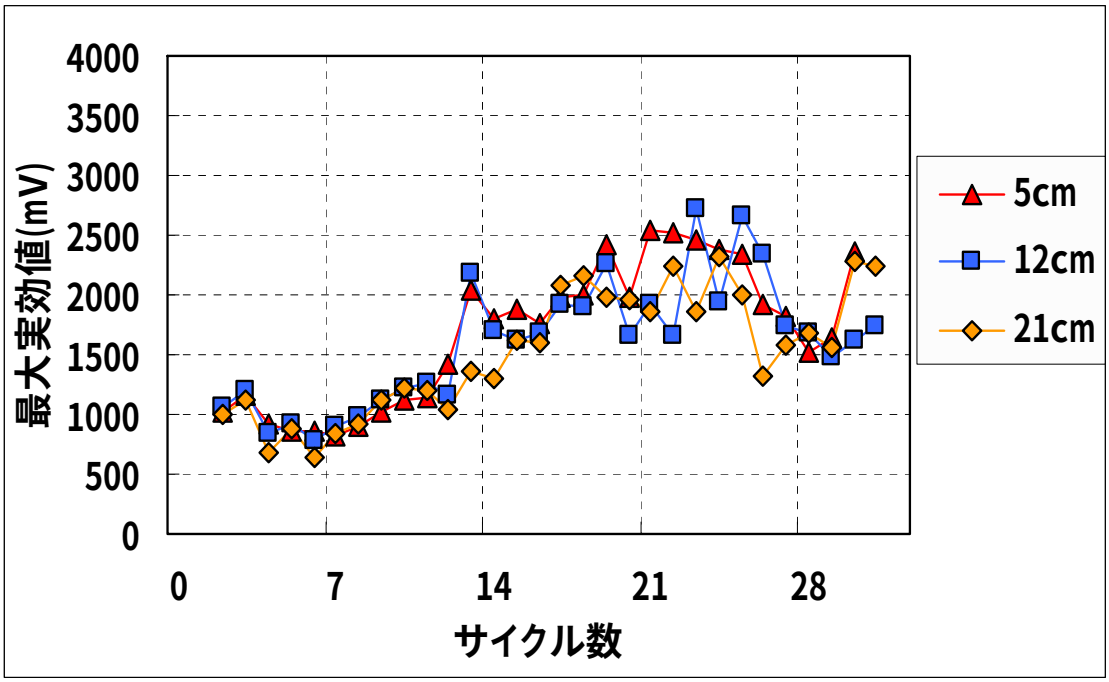


図 5-2-7　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=45%）

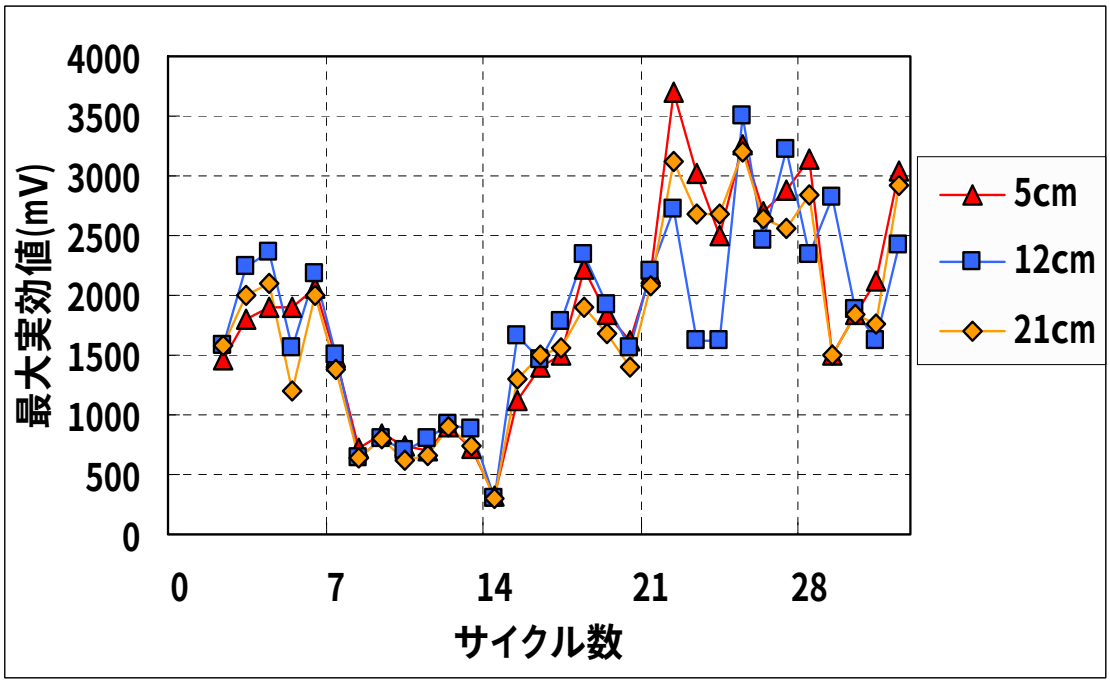


図 5-2-8　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=55%）

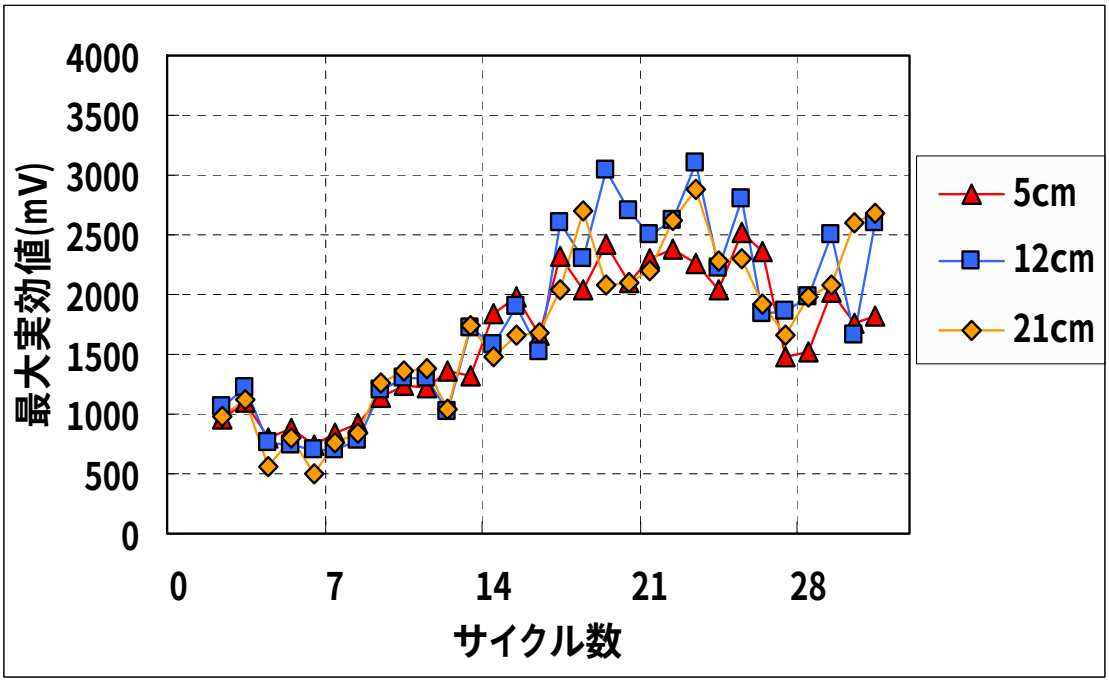


図 5-2-9　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=65%）

真水浸漬　深さ 5cm

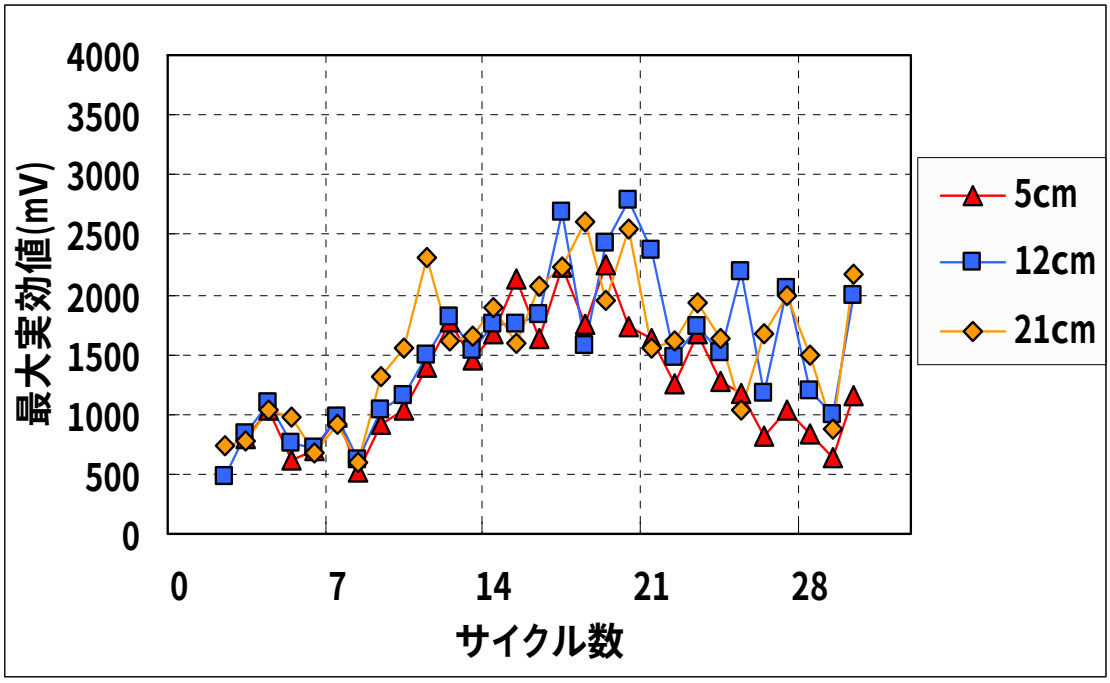


図 5-2-10　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=45%）

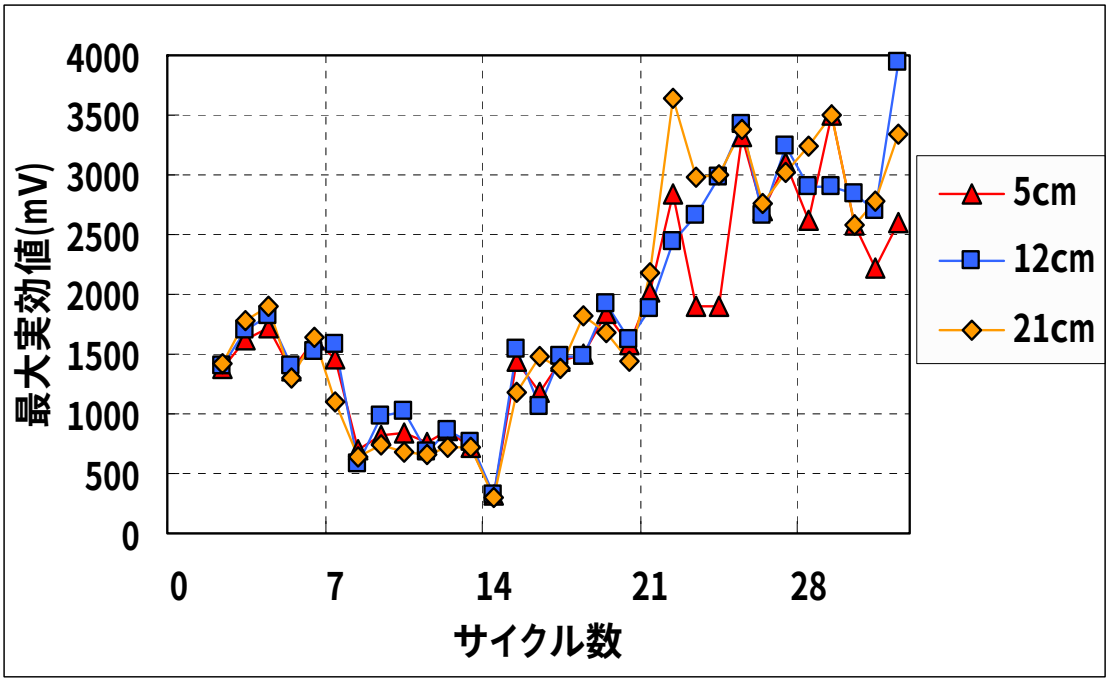


図 5-2-11　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=55%）

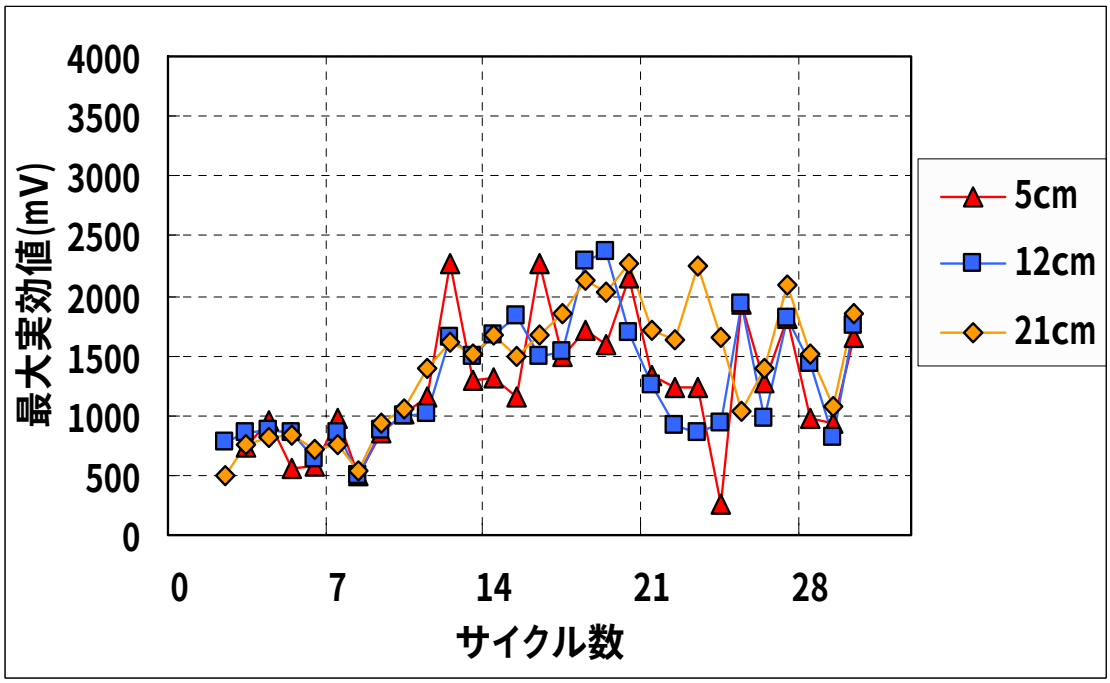


図 5-2-12　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=65%）

塩分浸漬　深さ 10cm

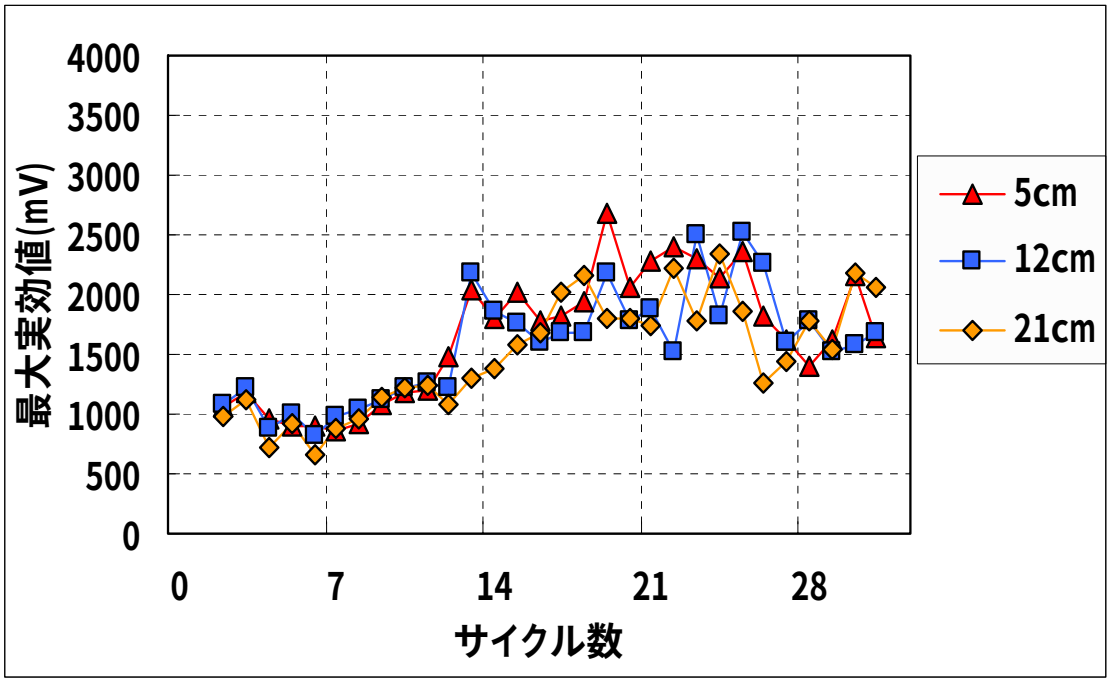


図 5-2-13　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=45%）

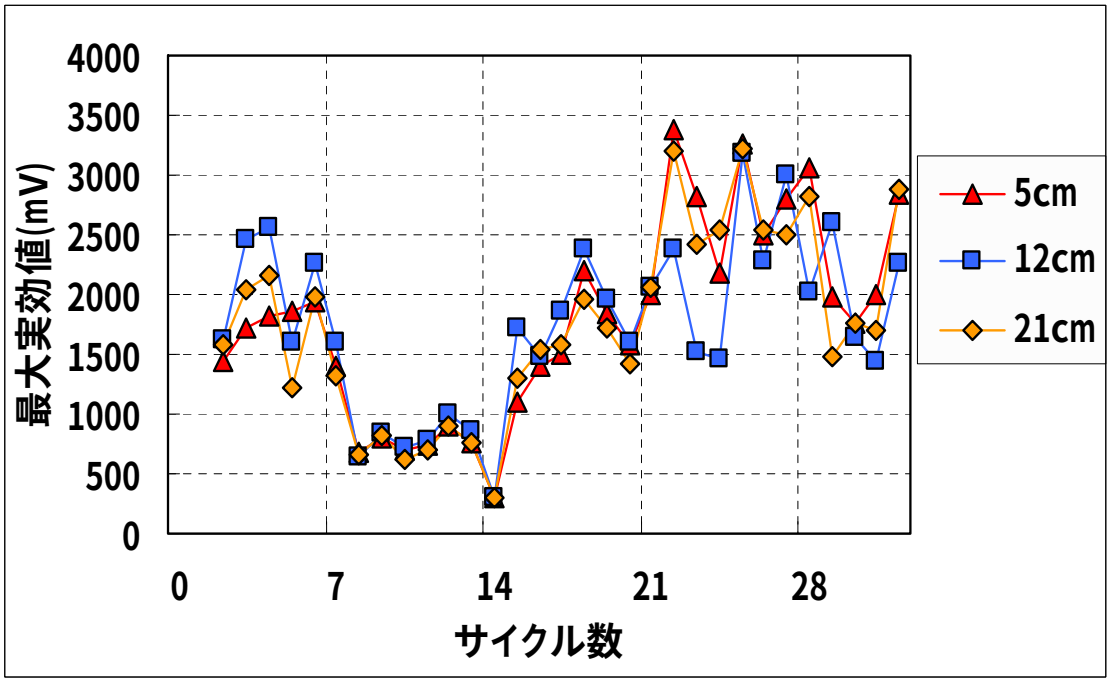


図 5-2-14　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=55%）

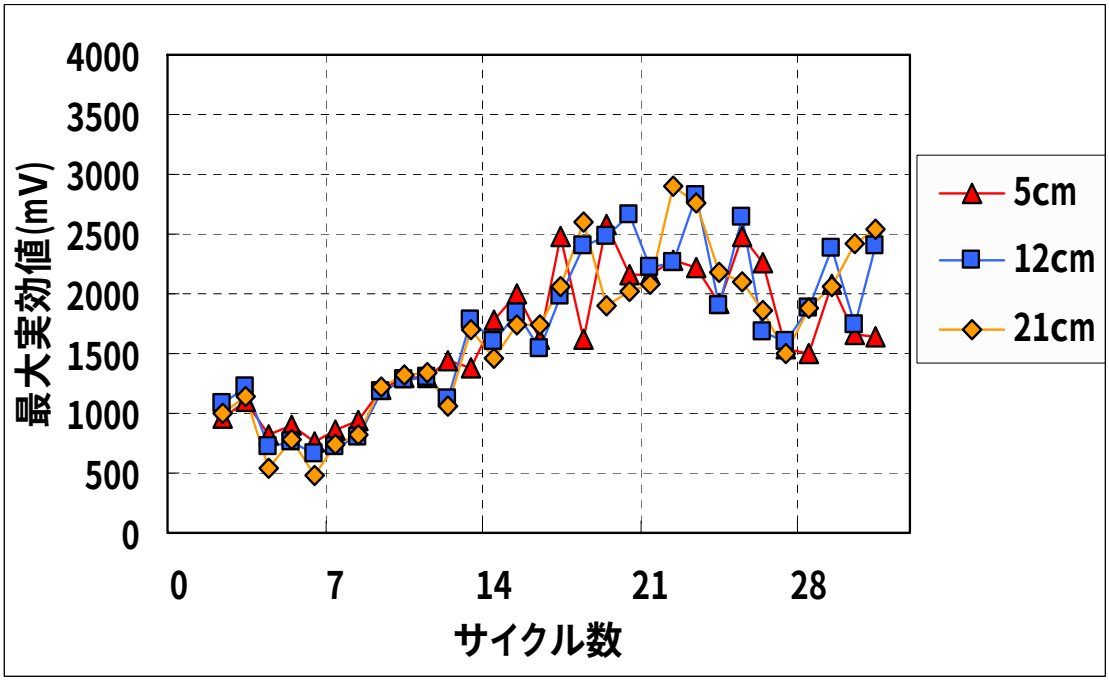


図 5-2-15　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=65%）

真水浸漬　深さ 10cm

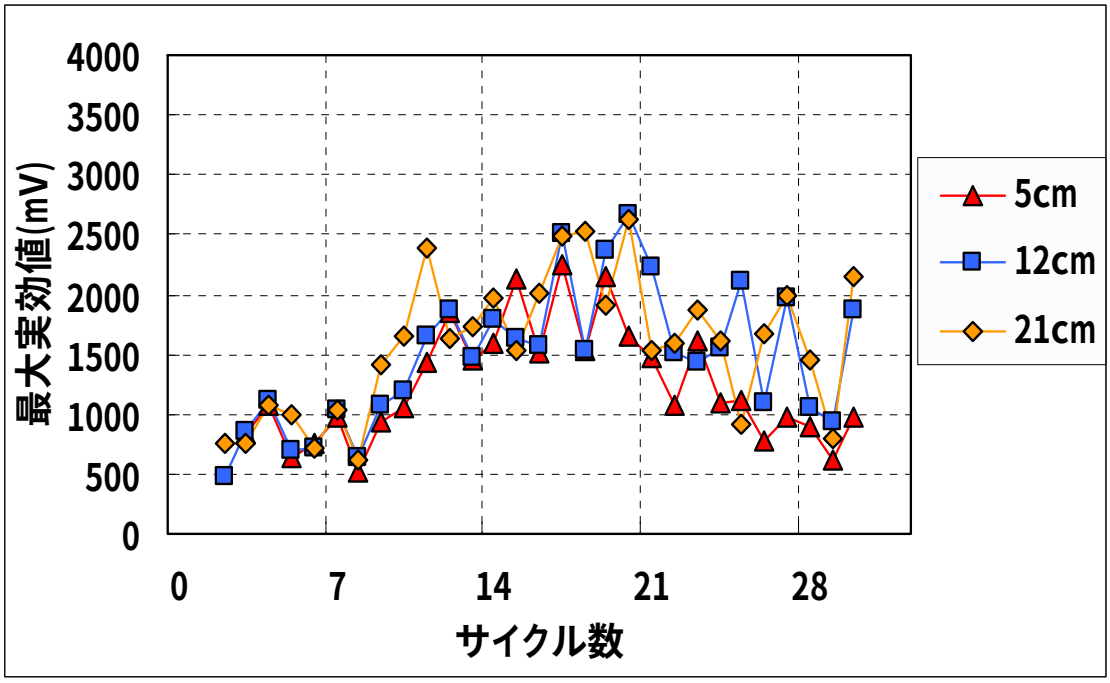


図 5-2-16　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=45%）

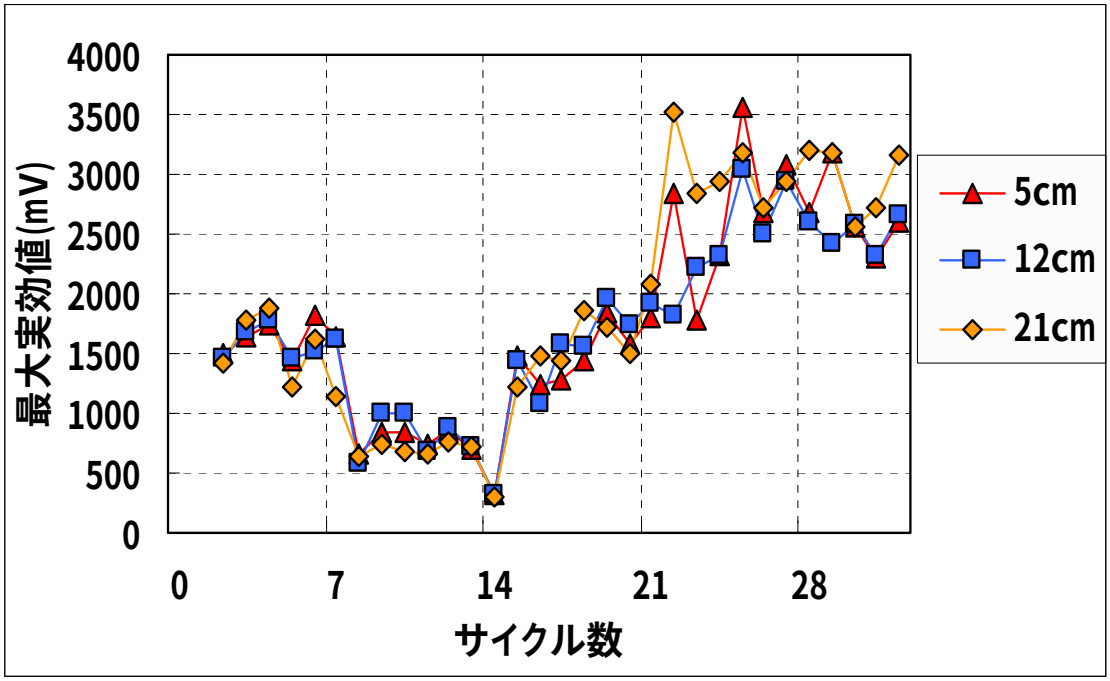


図 5-2-17　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=55%）

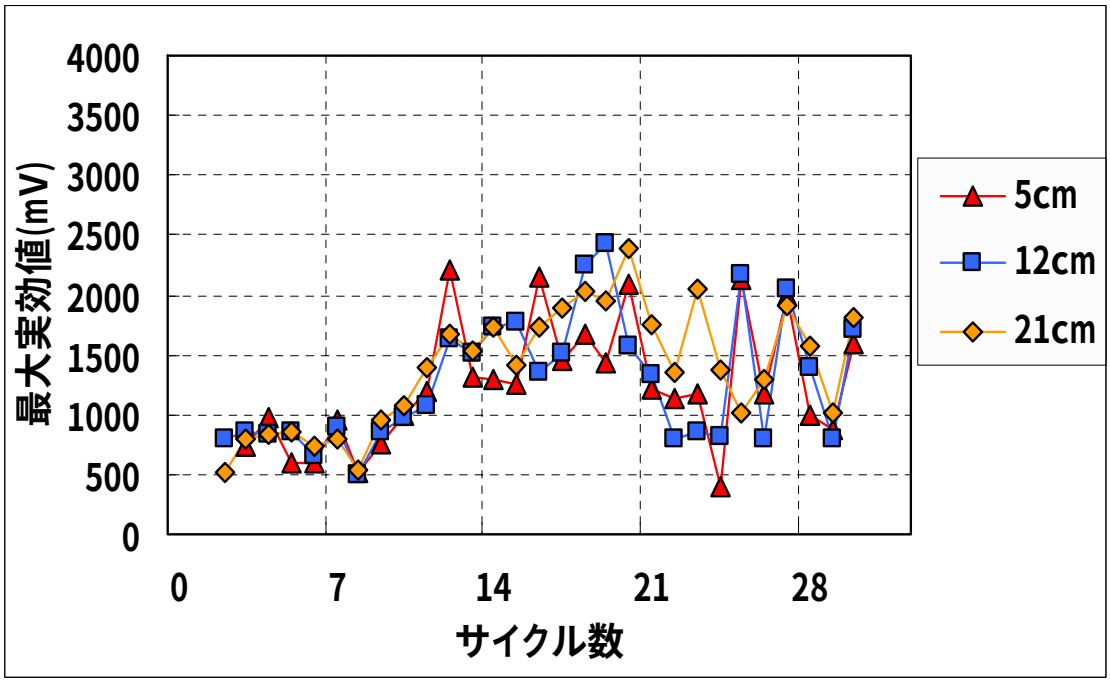


図 5-2-18　スランプ毎の最大実効値の変化（W/C=65%）

5.3　水セメント比毎の最大実効値の変化

水セメント比ごとの最大実効値の経時変化についての電極のかぶり深さ別結果を図 5-3-1～5-3-8 に示す。また，実験値が多いため 5Cycle 間の平均的な最大実効値の経時変化について図 5-3-9～5-3-16 に示す。ここでの比較は，図 5-3-9～5-3-16 についての比較・検討を行う。

<u>結果・考察</u>

水セメント比が大きくなるにつれて最大実効値は小さくなる傾向にある。経時変化を見ると一度最大実効値は上昇し，若干ではあるが低下してきていることから，塩分浸漬が実効値を低下させているのではないかと考えられる。また，図 5-3-9～5-3-16 は傾向が分かりやすくなるように 5Cycle を 1Cycle とした最大実効値の平均変動を表したものであるが，全体的に最大実効値はピークを迎えてから低下傾向にあることがみてとれる。水セメント比 45%の実験データにおいて実効値の上下変動が大きいが，55%と 65%においては，水セメント比が大きいほど実効値が減少するという傾向がみてとることができる。既往の研究と同様に塩分濃度が高くなるにつれて最大実効値が減少しているのではないかと考えられる。また，90Cycle 以降において表面から深さ方向 5cm までのグラフと，深さ方向 7，10cm とを比較してみると７，10cm のほうが若干ではあるが水セメント比ごとの差異がはっきりしていることがみてとれる。現段階では，深さ方向 7cm 及び 10cm には塩分浸漬はみられないため，コンクリート内部の水分移動の影響がでているのではないかと考えられる。やはり，3 日のサイクルでは塩分浸漬が微量過ぎるため顕著な傾向をつかむことは困難であるが，長いスパンで実験データを比較することではっきりとした傾向がみえてくるのではないかと考えられる。

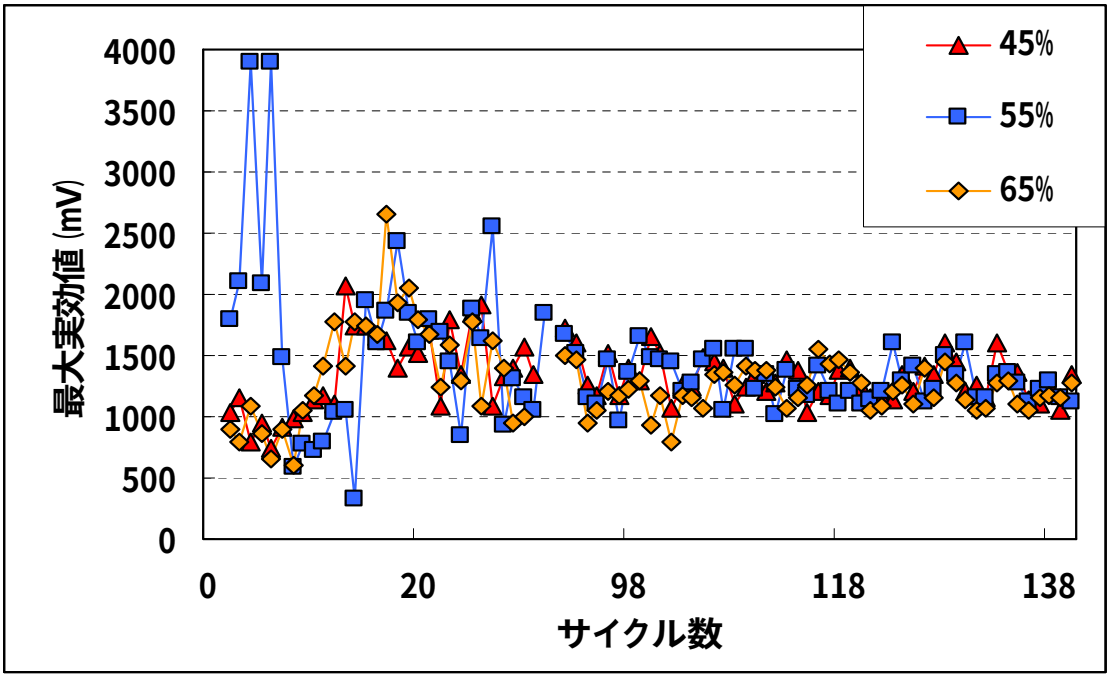


図 5-3-1　水セメント比毎の最大実効値の変化（表面）

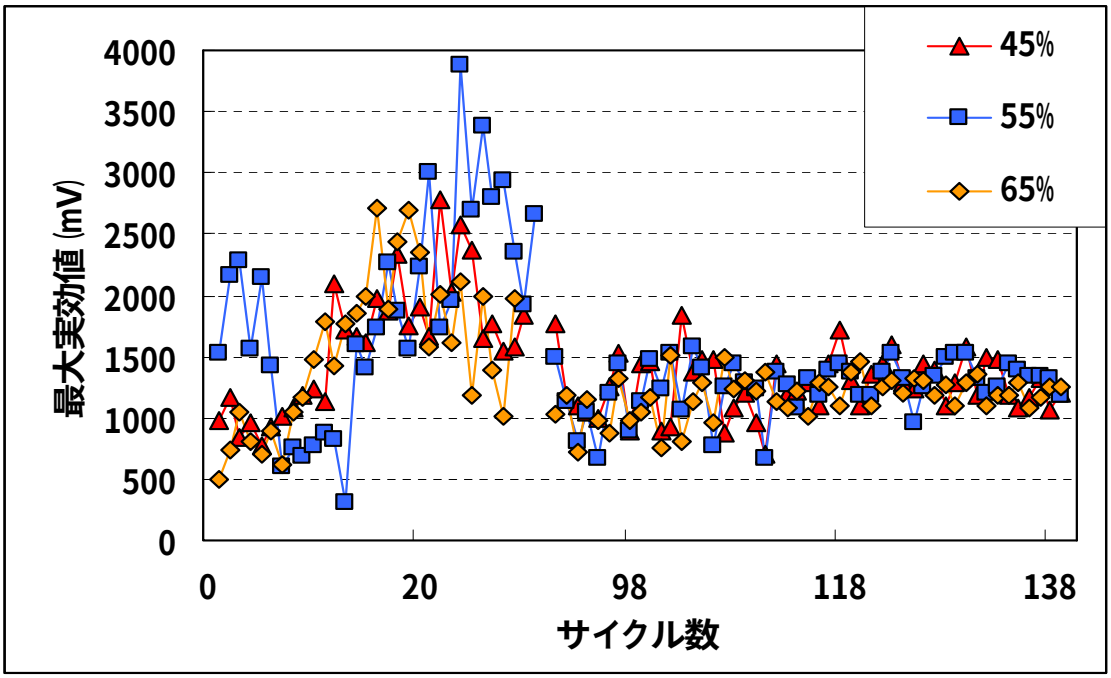


図 5-3-2　水セメント比毎の最大実効値の変化（深さ 1cm）

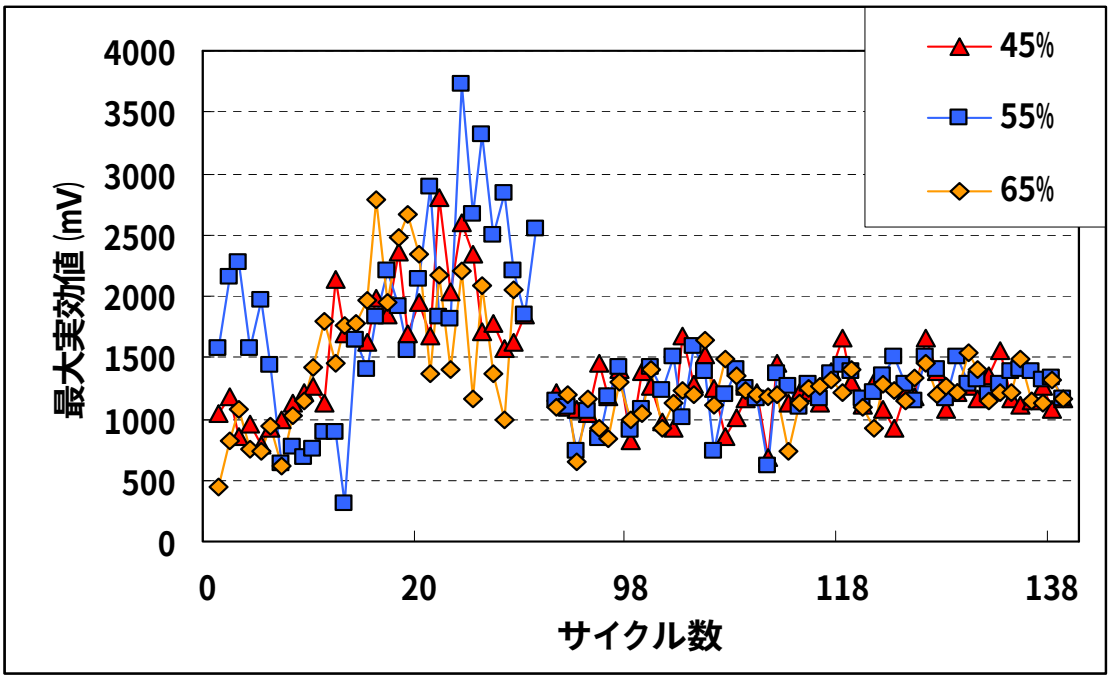


図 5-3-3　水セメント比毎の最大実効値の変化（深さ 2cm）

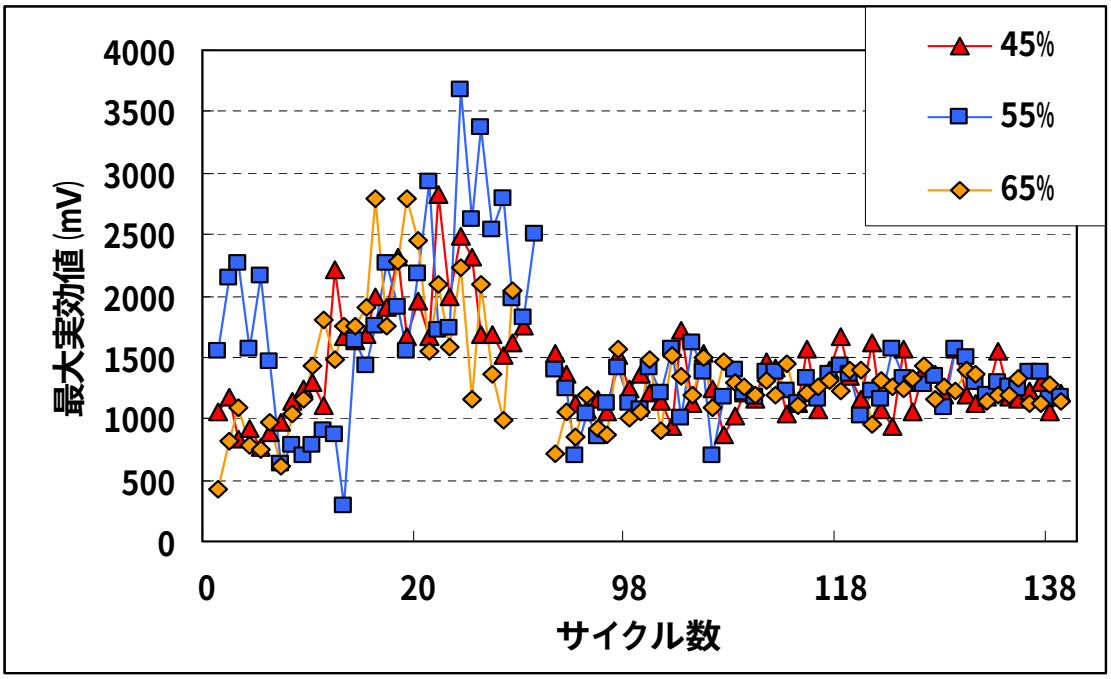


図 5-3-4　水セメント比毎の最大実効値の変化（深さ 3cm）

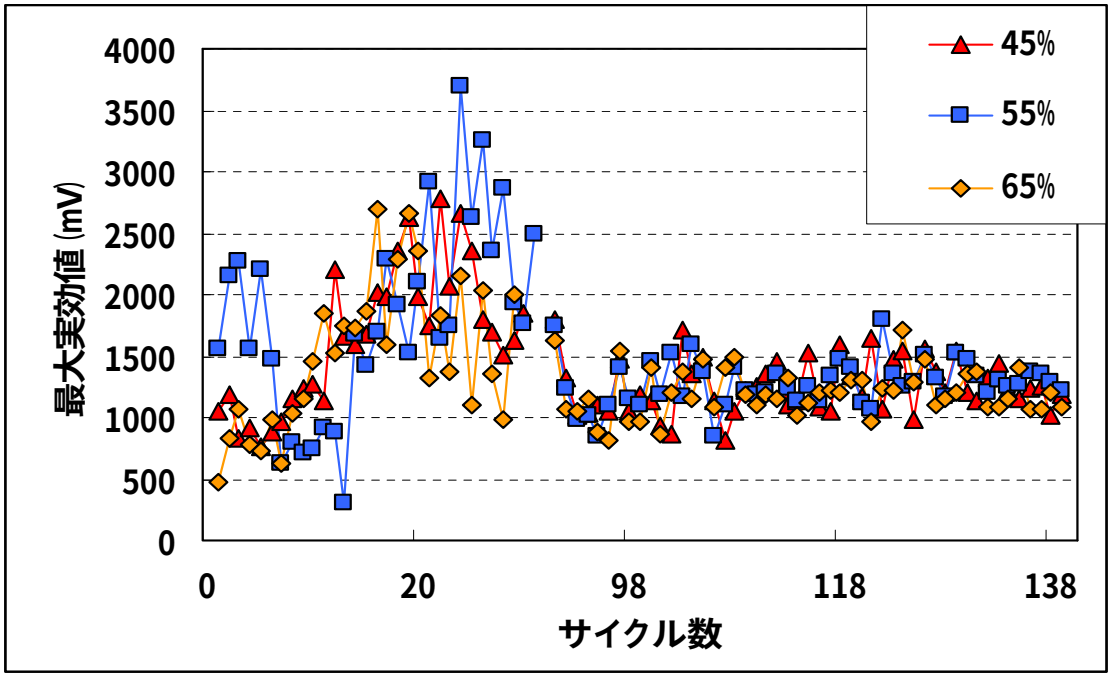


図 5-3-5　水セメント比毎の最大実効値の変化（深さ 4cm）

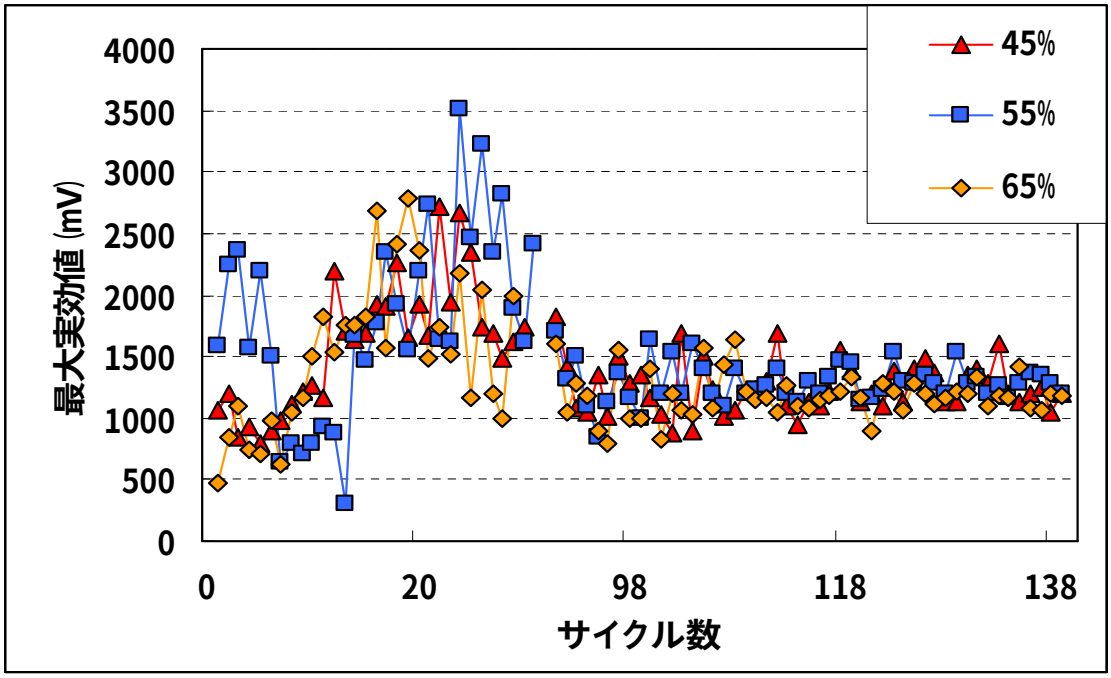


図 5-3-6　水セメント比毎の最大実効値の変化（深さ 5cm）

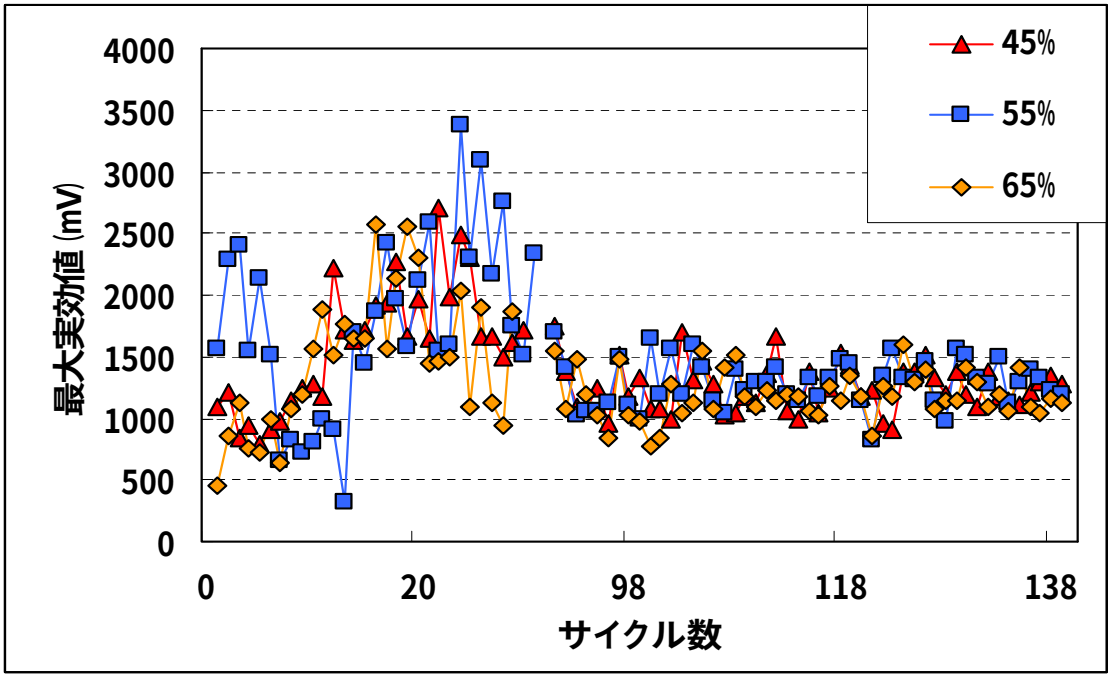


図 5-3-7　水セメント比毎の最大実効値の変化（深さ 7cm）

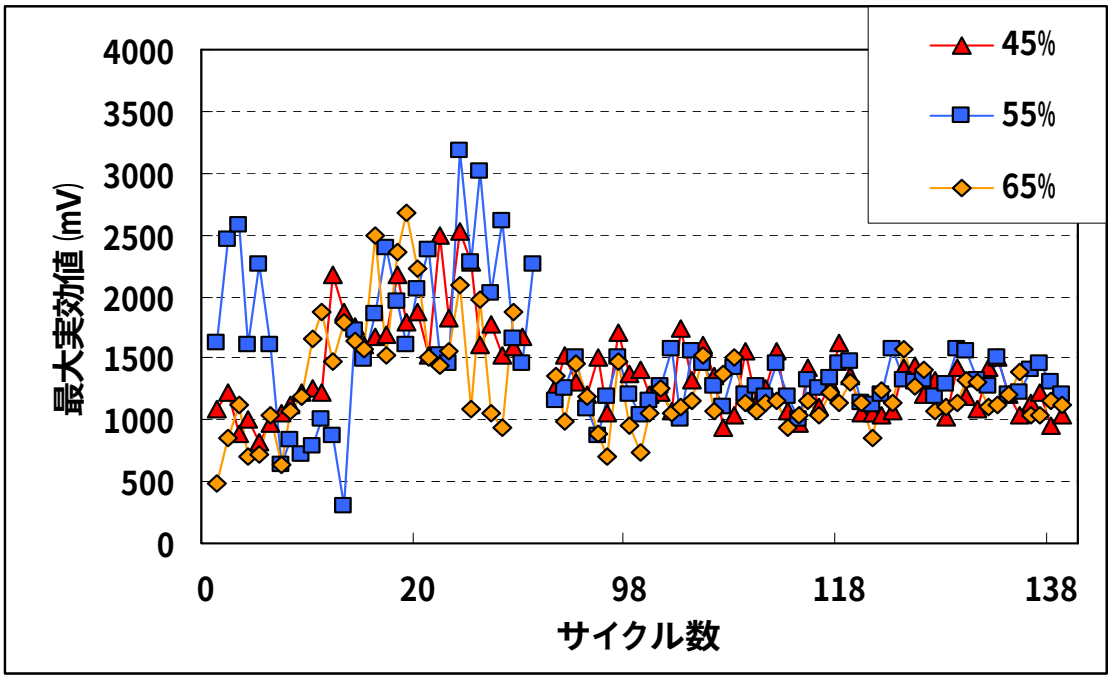


図 5-3-8 水セメント比毎の最大実効値の変化（深さ 10cm）

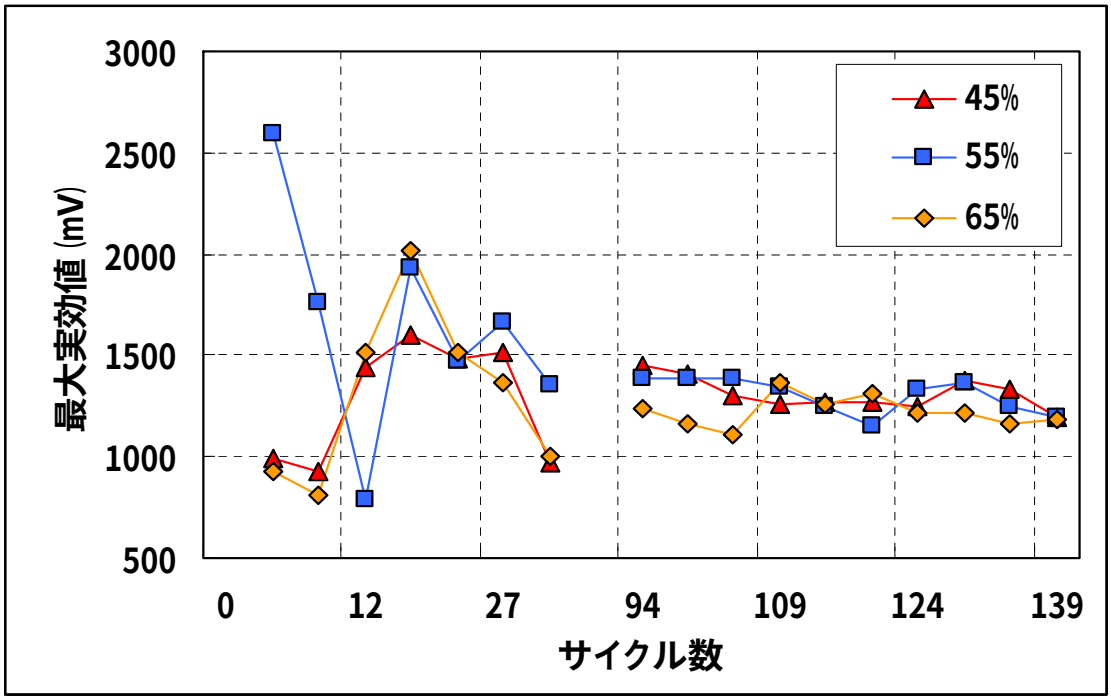


図 5-3-9　5Cycle 毎の最大実効値の平均変動（表面）

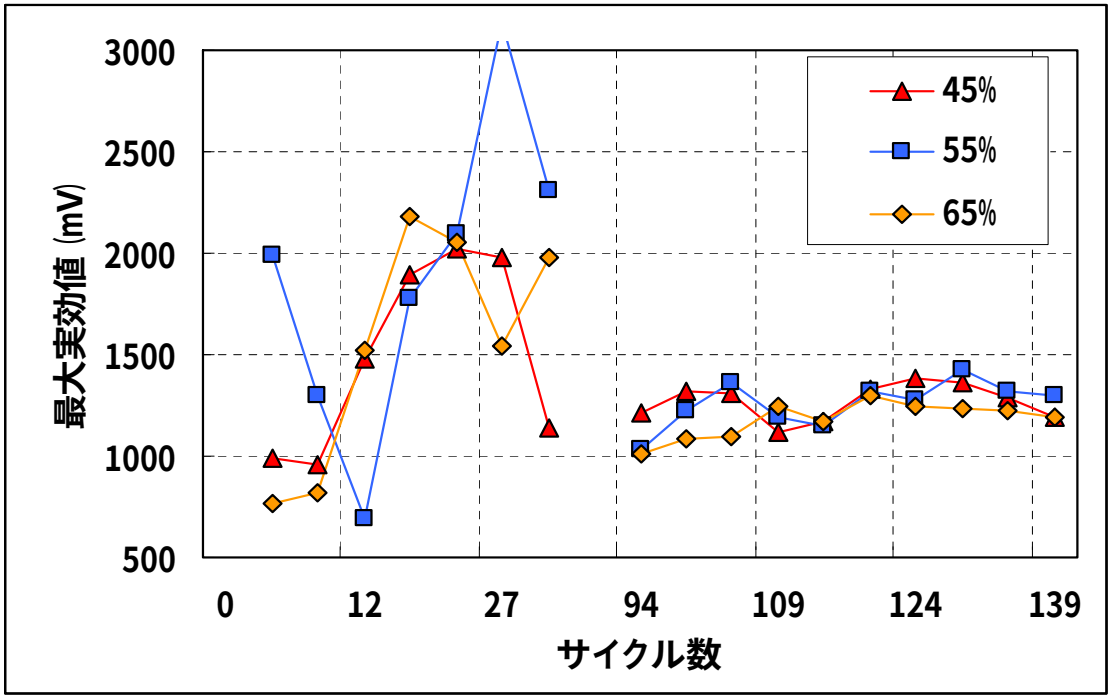


図 5-3-10　5Cycle 毎の最大実効値の平均変動（深さ 1cm）

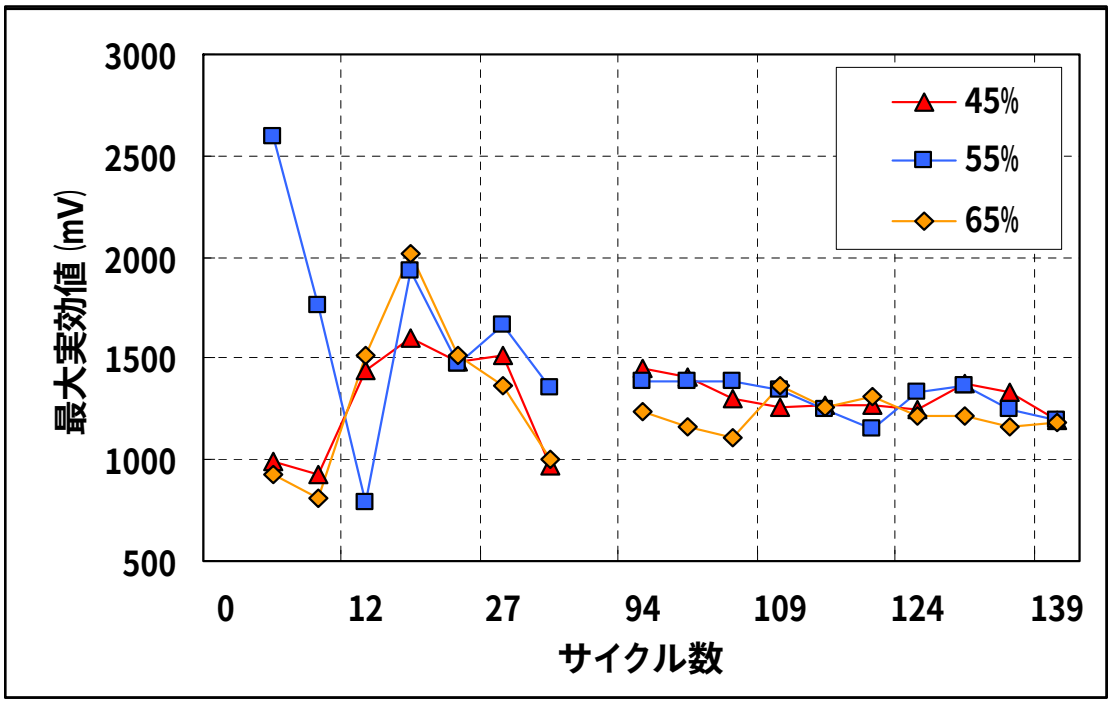


図 5-3-11　5Cycle 毎の最大実効値の平均変動（深さ 2cm）

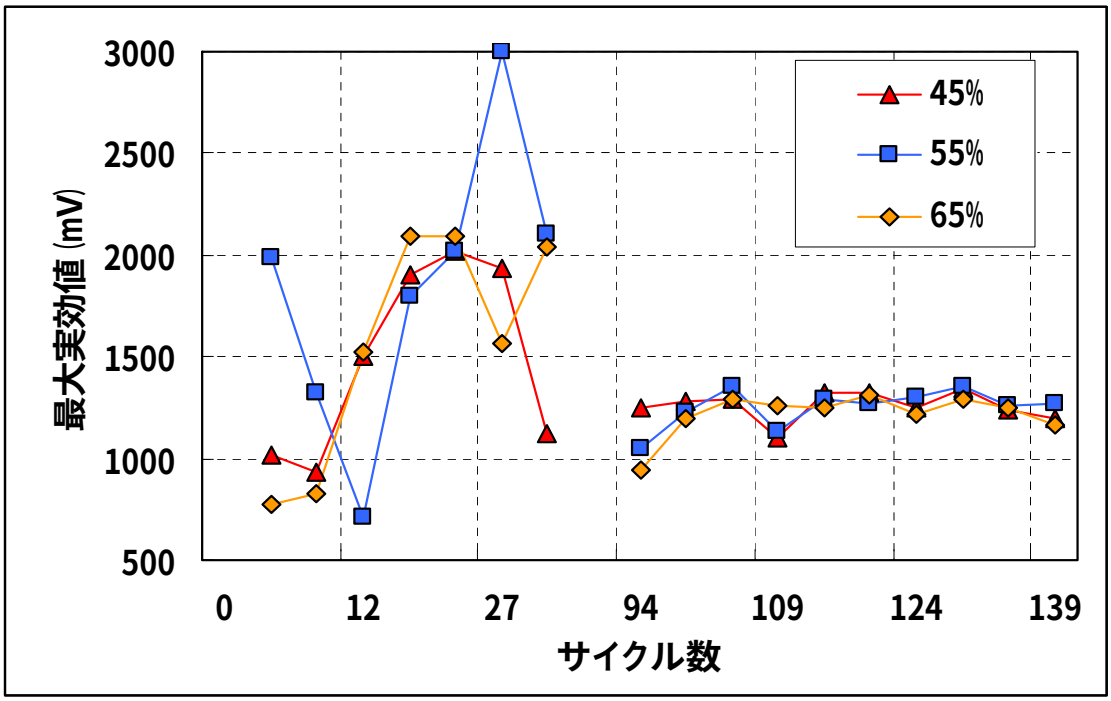


図 5-3-12　5Cycle 毎の最大実効値の平均変動（深さ 3cm）

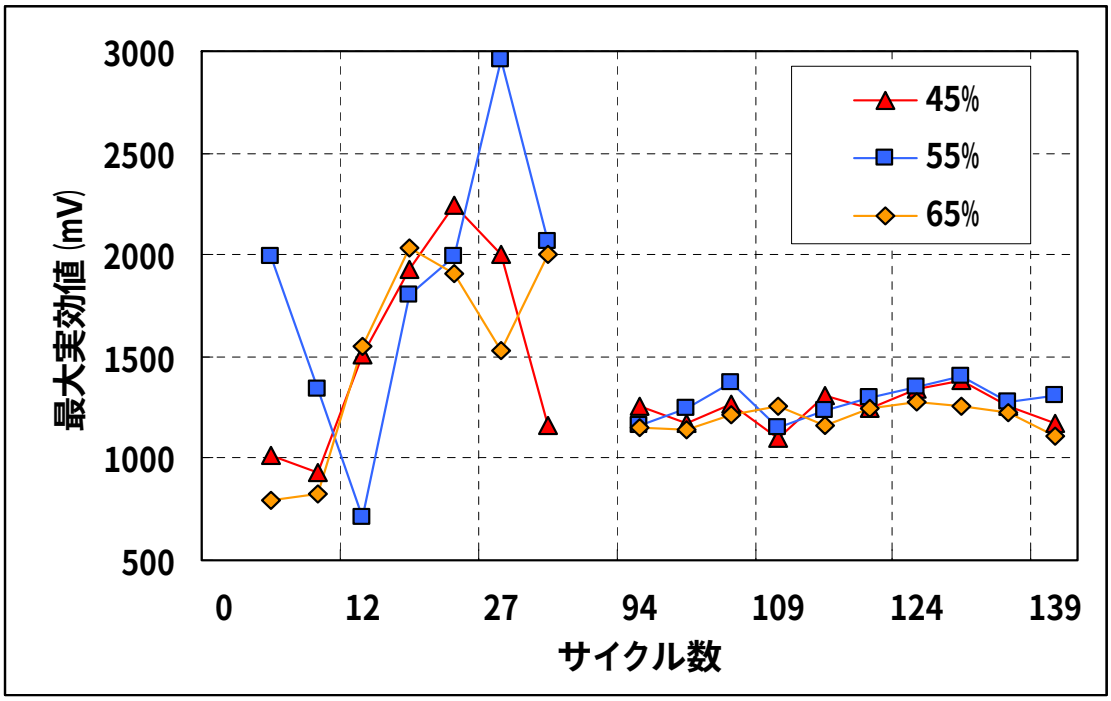


図 5-3-13　5Cycle 毎の最大実効値の平均変動（深さ 4cm）

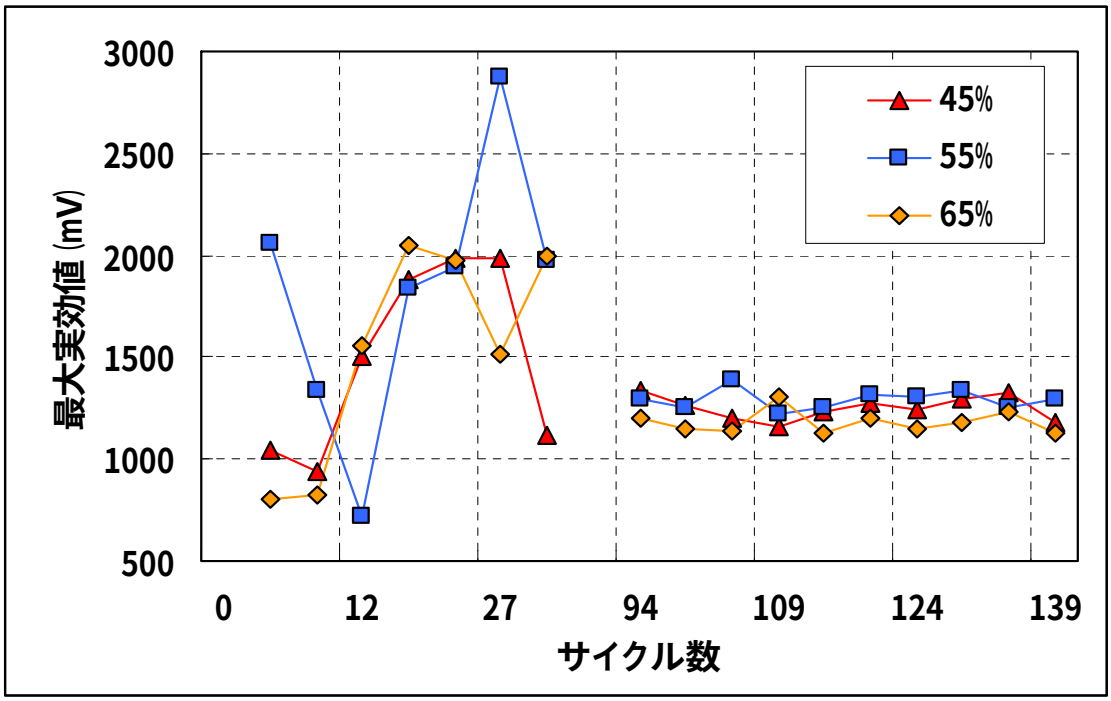


図 5-3-14　5Cycle 毎の最大実効値の平均変動（深さ 5cm）

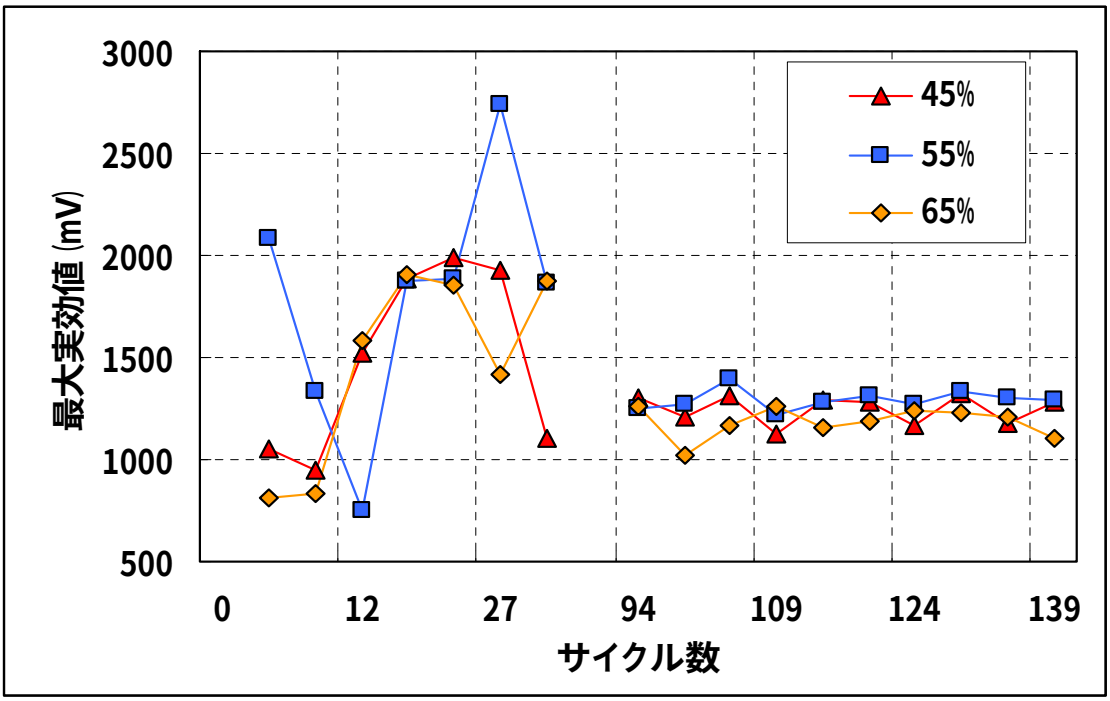


図 5-3-15　5Cycle 毎の最大実効値の平均変動（深さ 7cm）

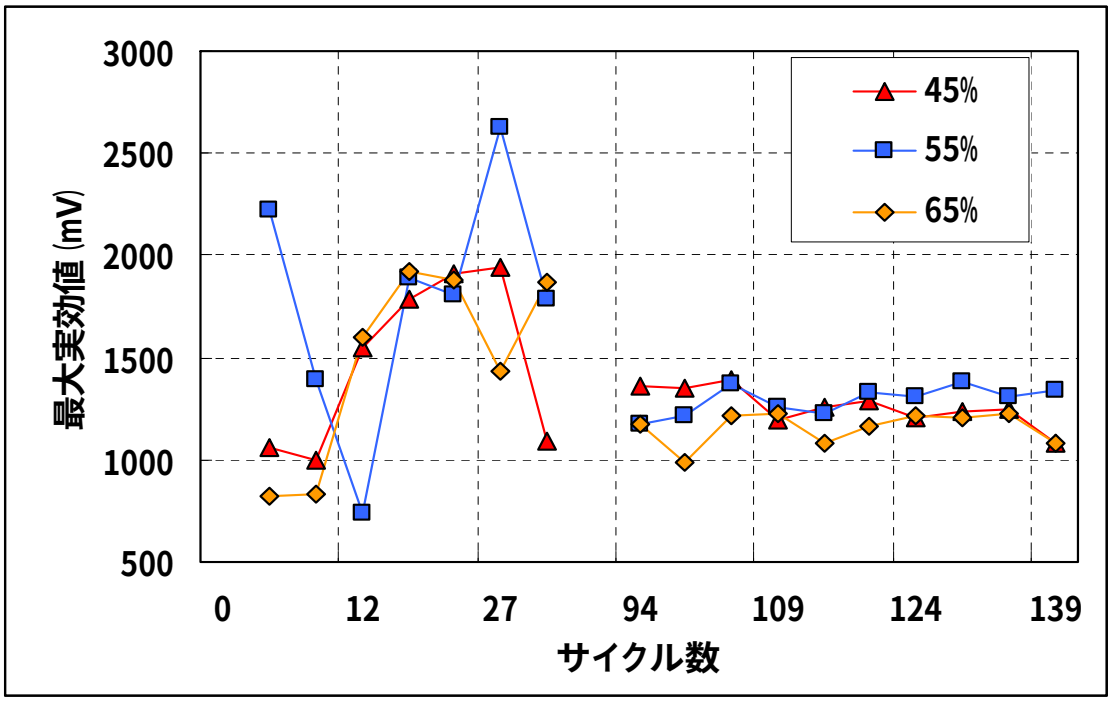


図 5-3-16　5Cycle 毎の最大実効値の平均変動（深さ 10cm）

5.4　電極かぶり深さ方向における最大実効値の変化

水セメント比ごとの電極のかぶり深さが最大実効値に及ぼす影響について 1Cycle 目を図 5-4-1 に示し，97Cycle 目を図 5-4-2 に，140Cycle 目を図 5-4-3 に示す。また，W/C=45%の 5Cycle 間の最大実効値の平均的な経時変化について図 5-4-4 に示し, W/C=55%を図 5-4-5 に，W/C=65%を図 5-4-6 に示す。

<u>結果・考察</u>

電極深さ方向の深くなるにつれて最大実効値は小さくなる傾向があった。また，図 5-4-1～5-4-3 において，水セメント比毎の差が徐々に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。また，図 5-4-4～5-4-6 においては傾向がわかるように 5Cycle を 1Cycle とした最大実効値の平均変動を示したものであるが，水セメント比 45%以外の 55%，65%においては深さ方向毎に実効値が減少するといった傾向がみてとれる。この結果についても既往の研究においても同様の結果が得られている。また，水セメント比が大きくなるにつれ深さ方向の実効値の差異が大きくなる傾向も見て取れる。このことから塩分浸漬が影響して傾向が現れているのではないかと考えられる。特に深さ方向 7cm 及び 10cm の実効値が高い位置にあるのは，現段階では塩分浸漬がないためであると考えられ，実効値の変動は水分浸漬など他の要因が考えられる。このことからも，実効値には塩化物イオンの影響も反映されるが，水分イオンの影響など他の要因の影響も少なからずでてしまっていると考えられる。

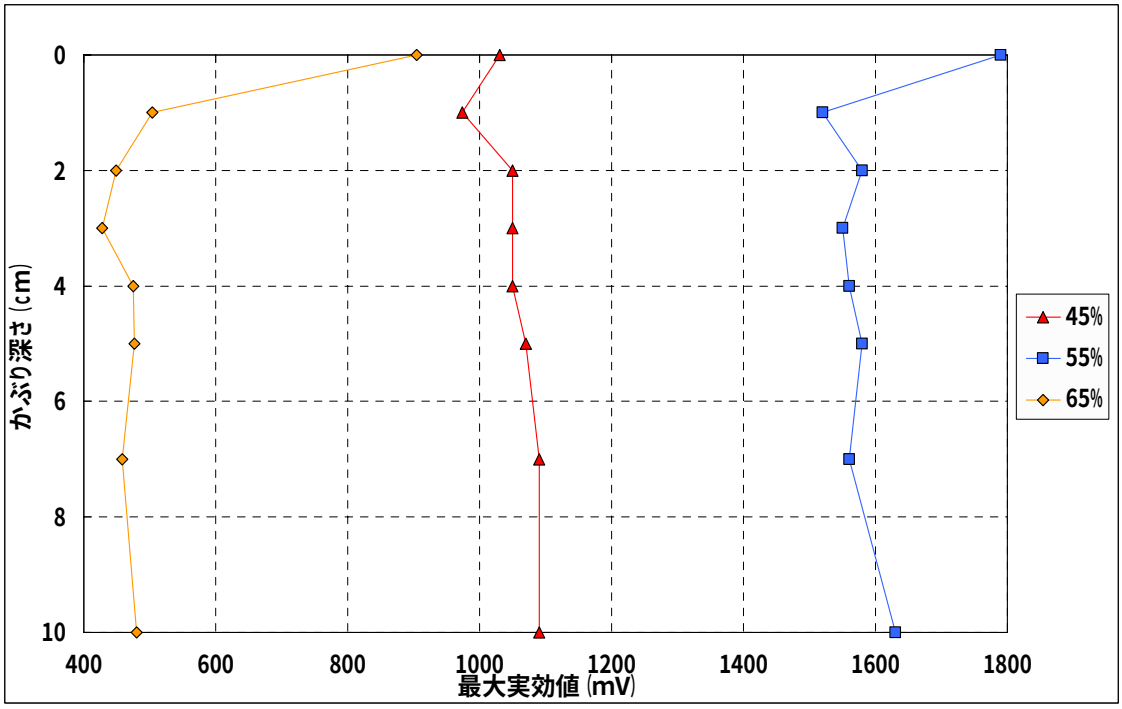


図 5-4-1　電極深さ方向における最大実効値の変化（1Cycle）

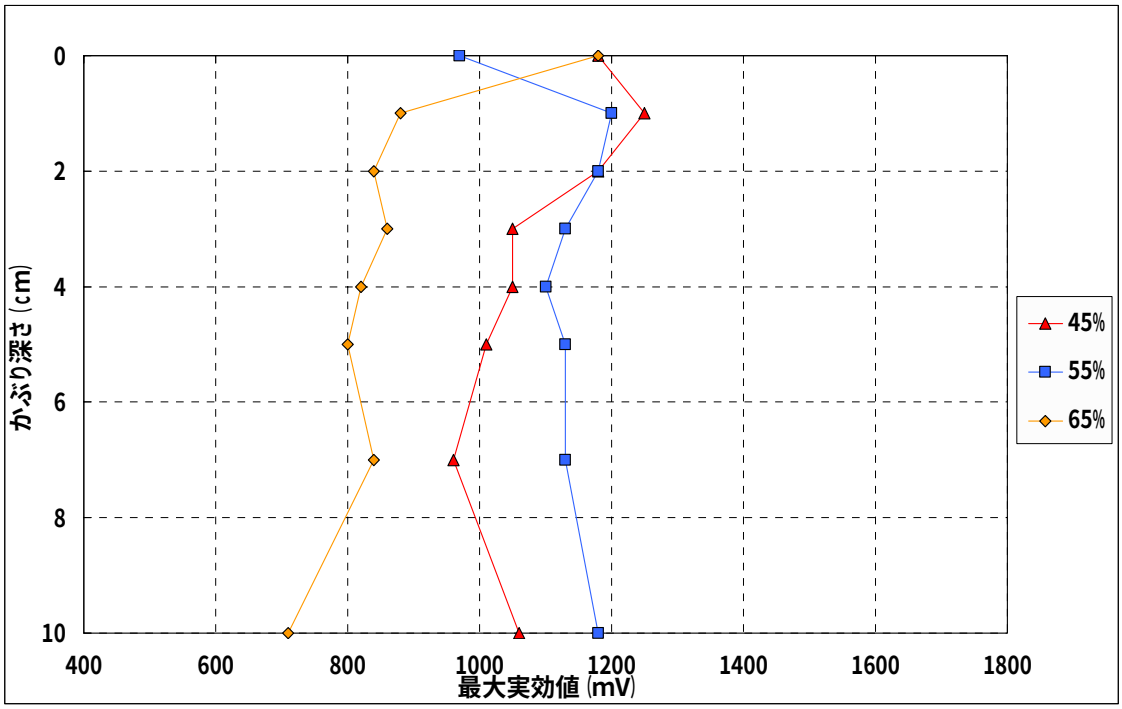


図 5-4-2　電極深さ方向における最大実効値の変化（97Cycle）

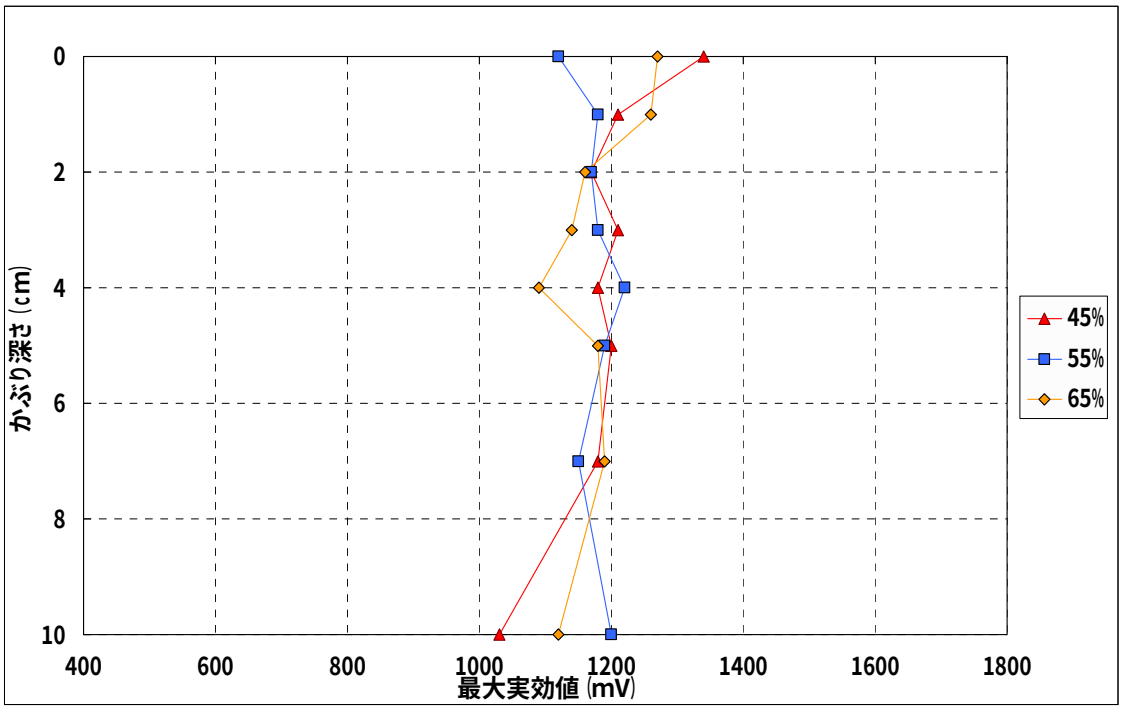


図 5-4-3　電極深さ方向における最大実効値の変化（140Cycle）

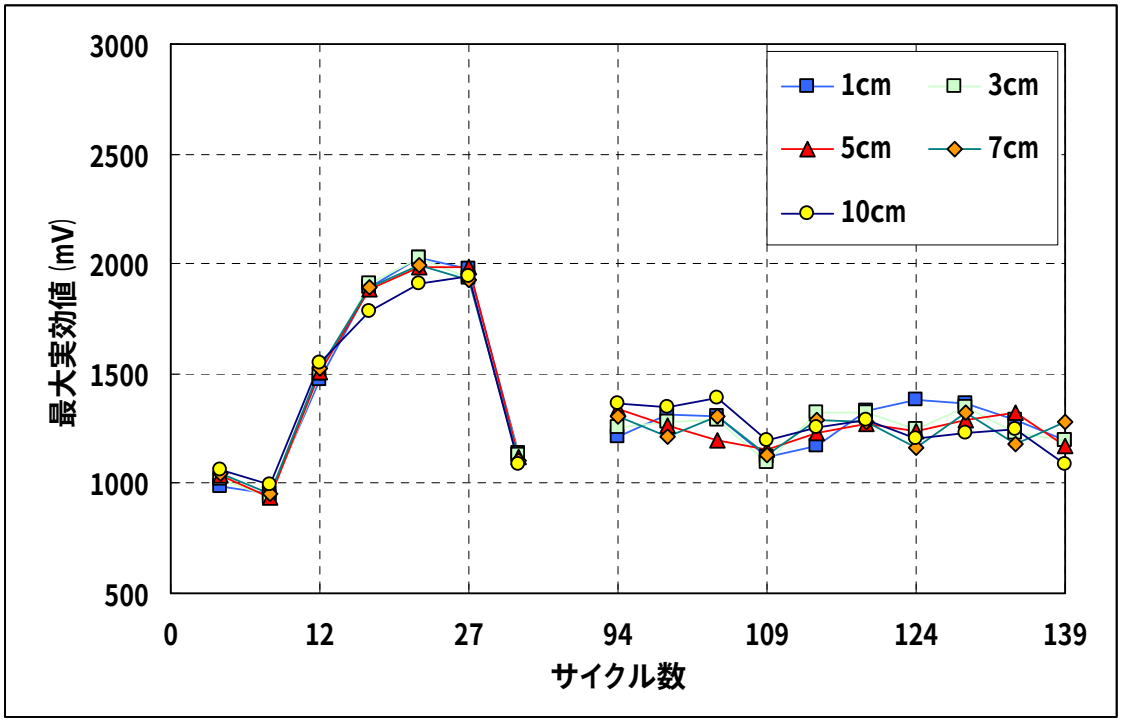


図 5-4-4　5Cycle 毎の最大実効値の平均変動（W/C=45%）

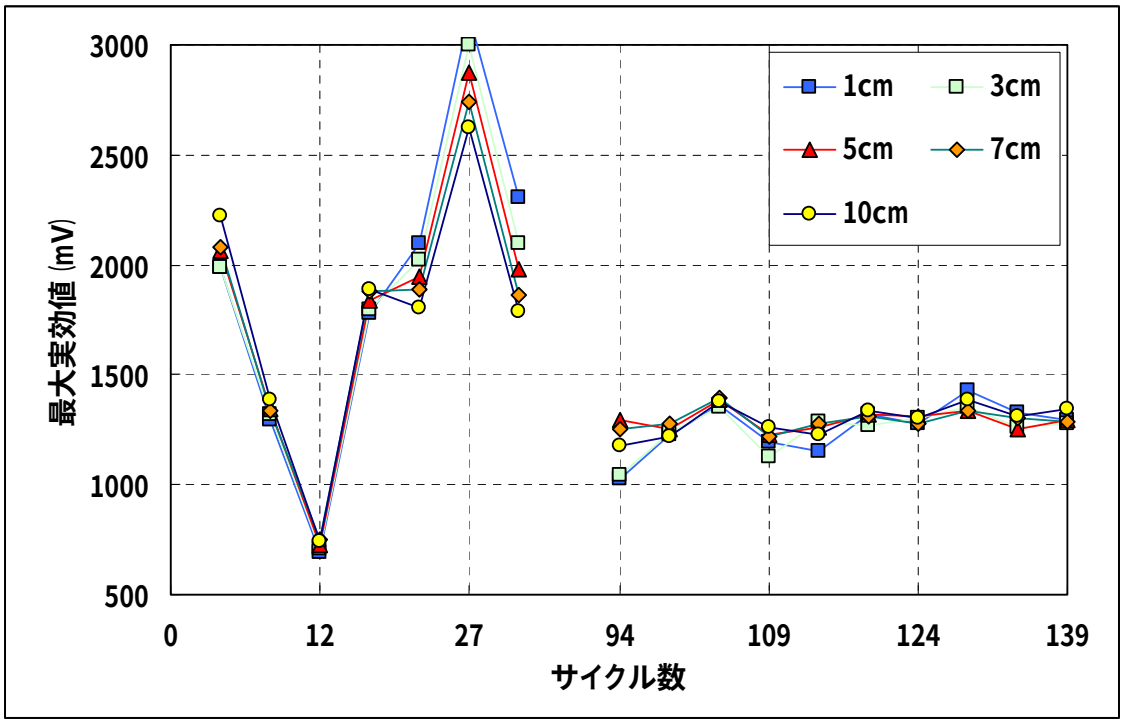


図 5-4-5　5Cycle 毎の最大実効値の平均変動（W/C=55%）

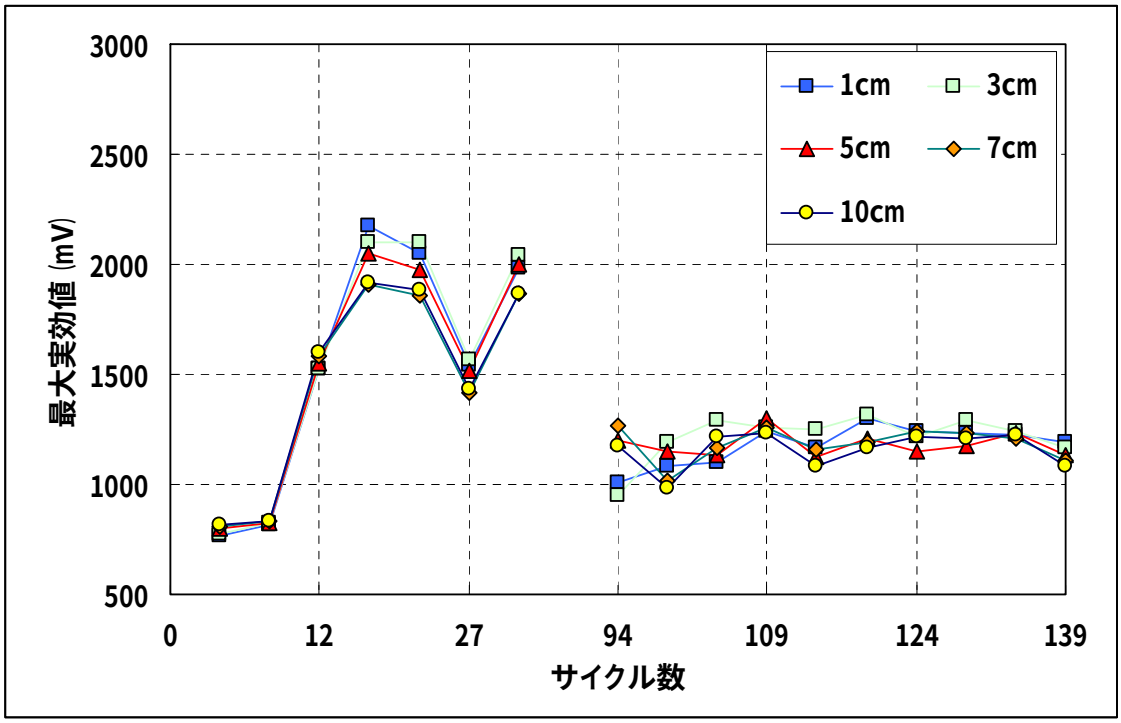


図 5-4-6　5Cycle 毎の最大実効値の平均変動（W/C＝65%）

5.5　塩分浸漬と真水浸漬との比較

W/C=45%の塩水浸漬させたものと，真水浸漬させたものの比較を電極のかぶり深さ別に図 5-5-1～5-5-8 に示し，同様に W/C=55%について図 5-5-9～5-5-16 に，W/C=65%について図 5-5-17～5-5-24 に示す。

<u>結果・考察</u>

かぶり深さが大きくなるにつれて塩分浸漬と真水浸漬の差が大きくなる傾向にある。特にかぶり深さ 7cm, 10cm においては他のものよりも塩分浸漬と真水浸漬の差が大きくでている。若干ではあるが塩分浸漬のほうが真水浸漬よりも最大実効値が小さくなる傾向にある。このことからも、上記で述べたように塩分浸漬が進むにつれて、実効値は低下するということが確認できる。また，水セメント比が大きくなるにつれて塩水浸漬と真水浸漬の差が大きくなる傾向にあることがわかった。今後も計測を継続して行えば、塩分浸漬と真水浸漬の差は広がっていくと考えられる。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は，インピーダンス法は塩分と水分の両方に影響されるためだと考えられる。

また，どの結果においても時間の経過とともに最大実効値の増減のばらつきが小さくなる傾向にある。この要因としては，コンクリート内部の含水状態が時間の経過とともに安定してきているためと考えられる。

水セメント比 45%

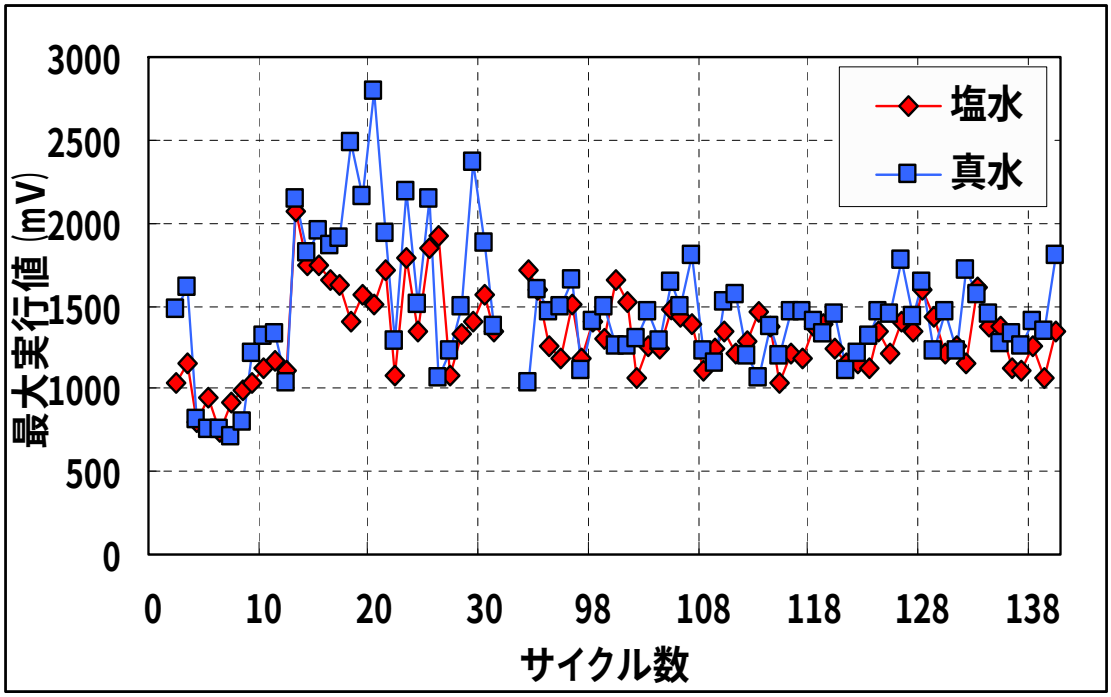


図 5-5-1　塩水浸漬と真水浸漬の比較（表面）

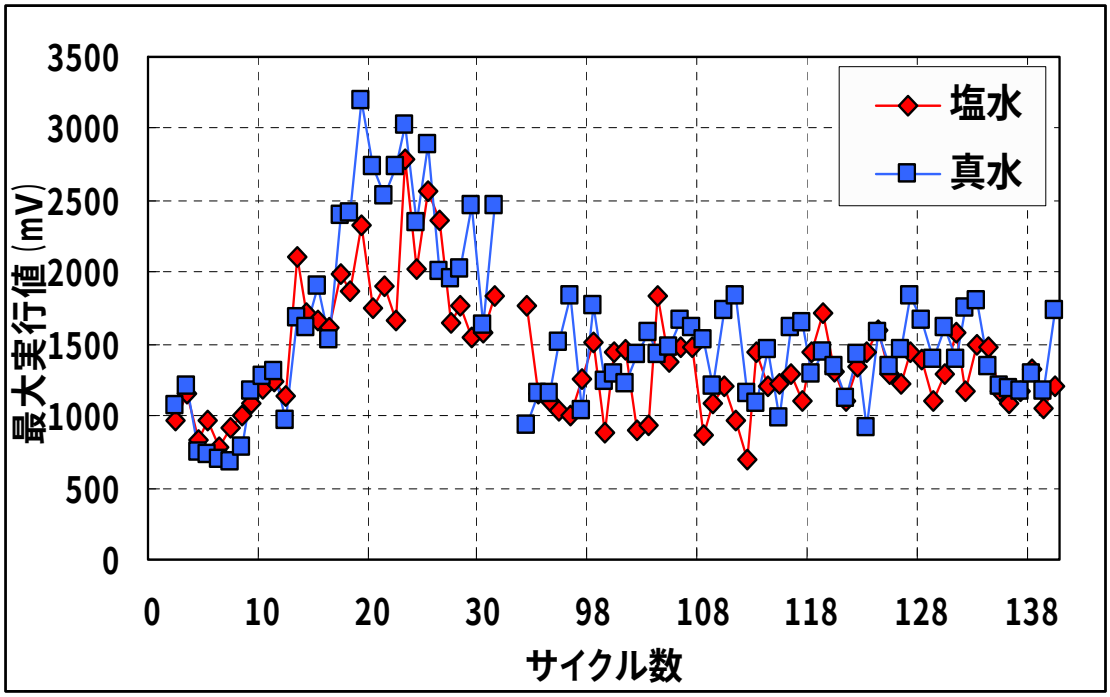


図 5-5-2　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 1cm）

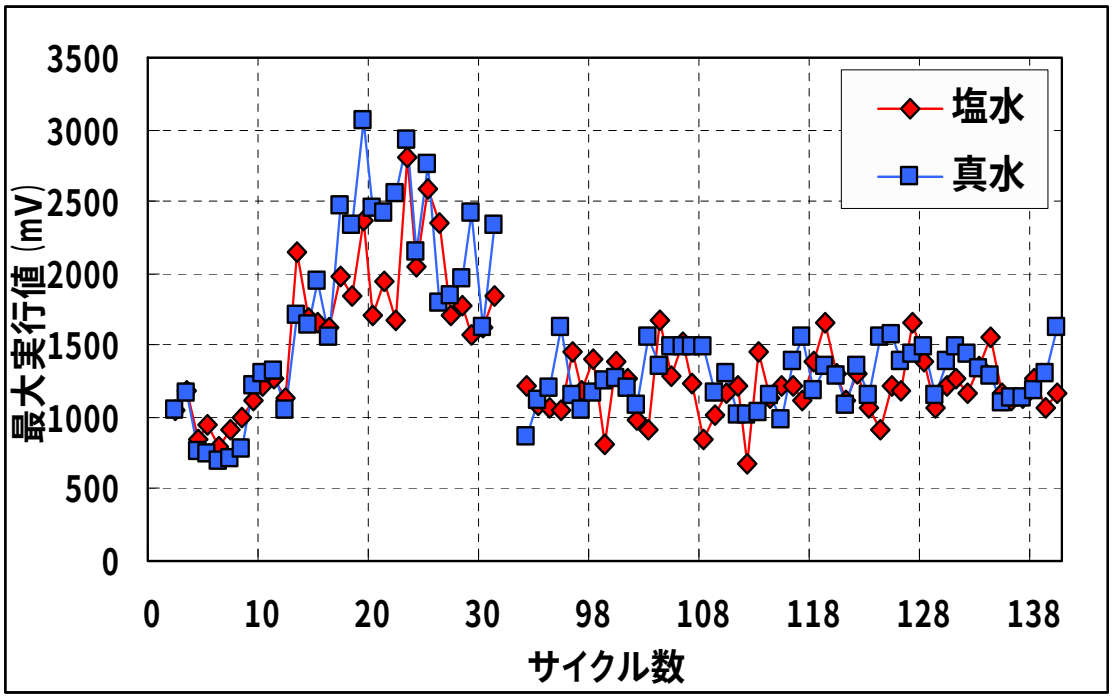


図 5-5-3　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 2cm）

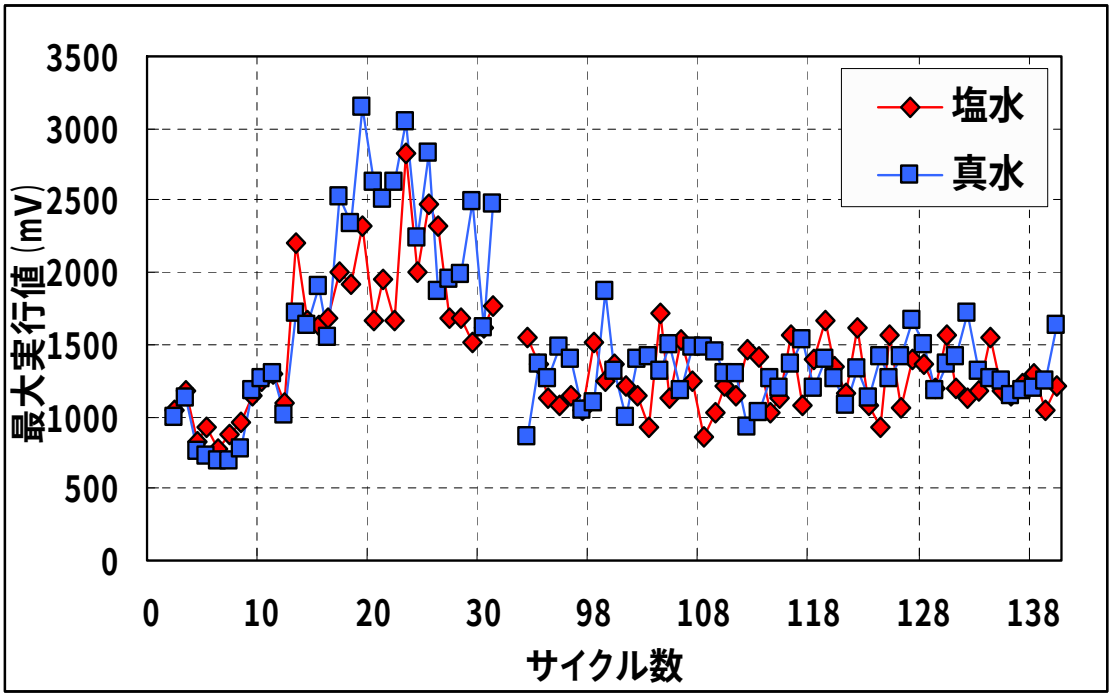


図 5-5-4　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 3cm）

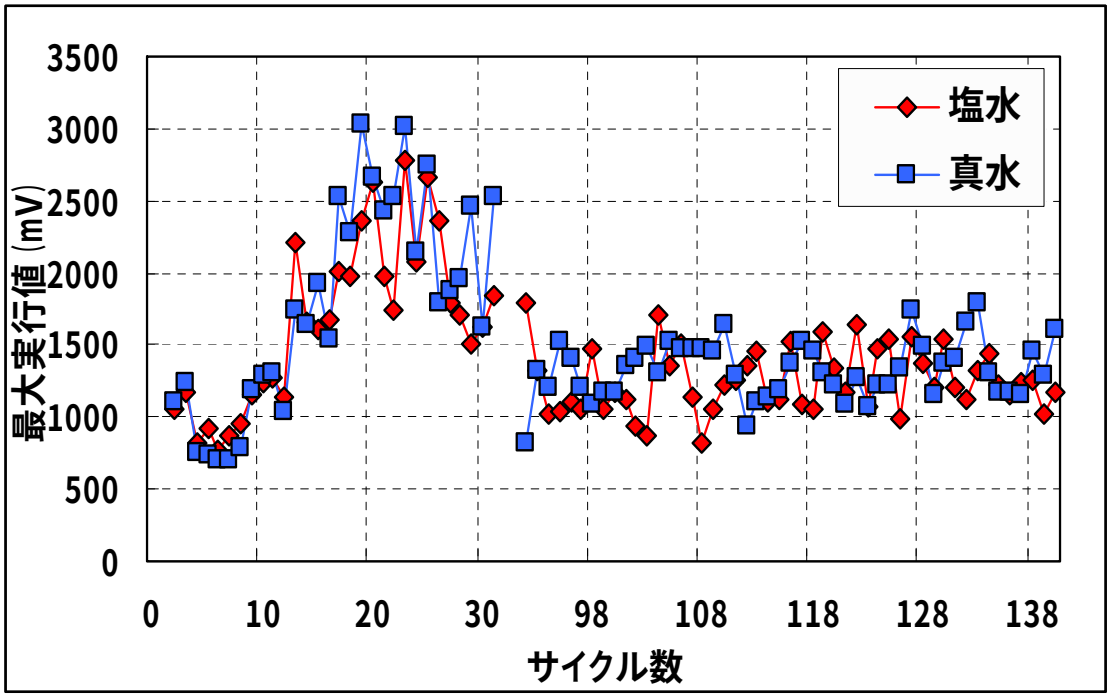


図 5-5-5　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 4cm）

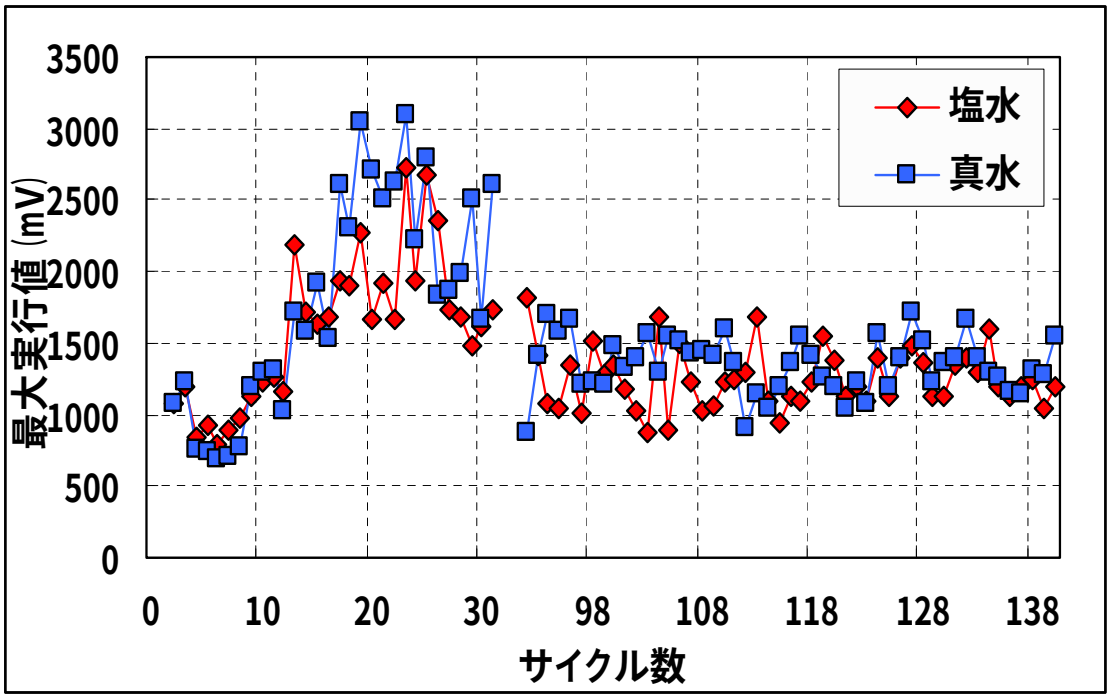


図 5-5-6　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 5cm）

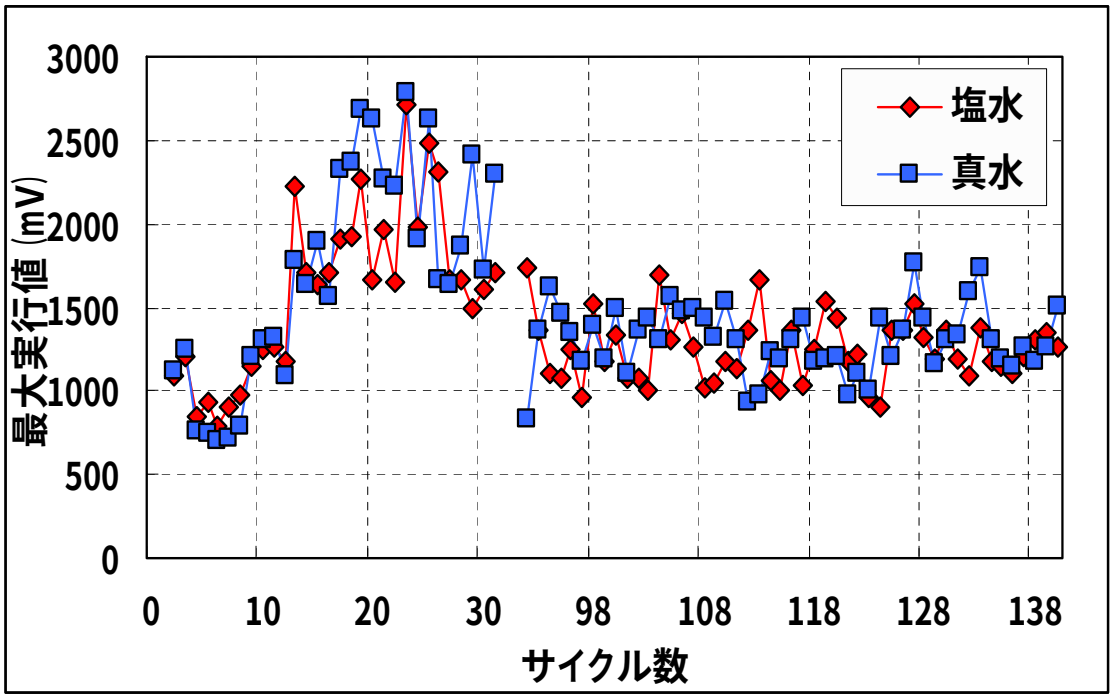


図 5-5-7　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 7cm）

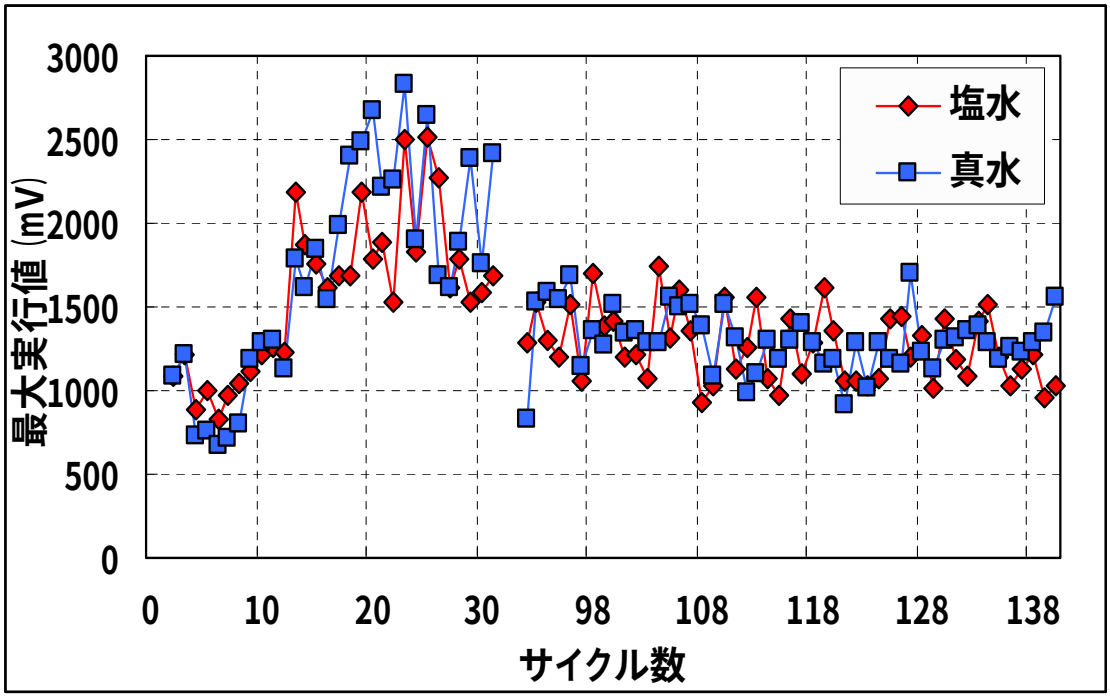


図 5-5-8　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 10cm）

水セメント比 55%

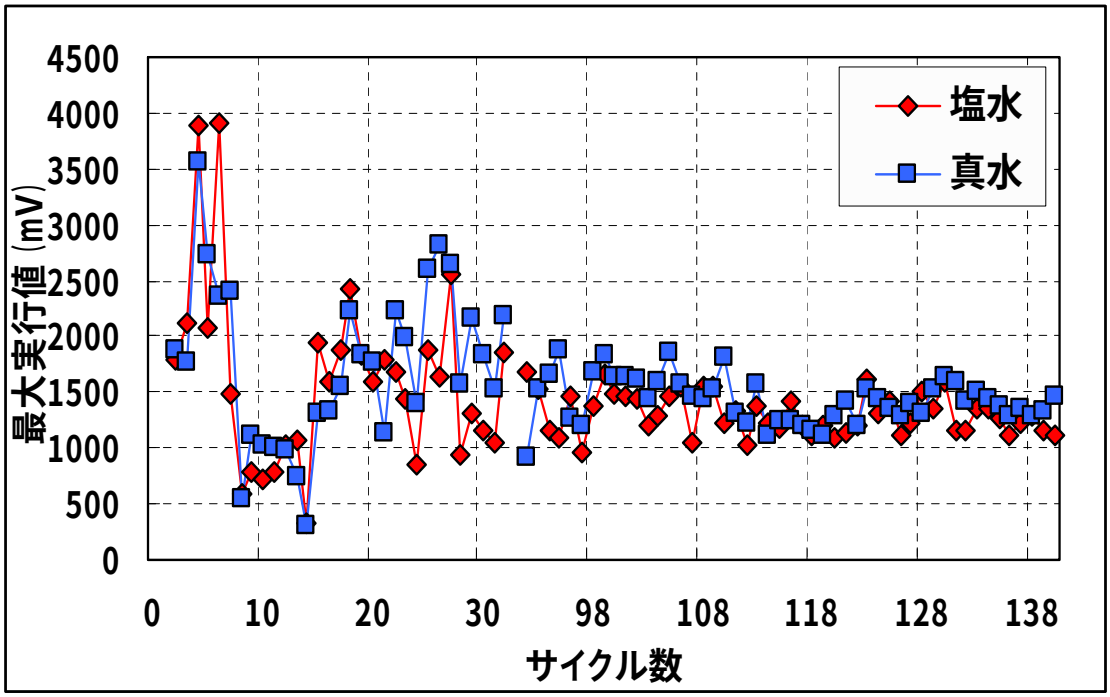


図 5-5-9　塩水浸漬と真水浸漬の比較（表面）

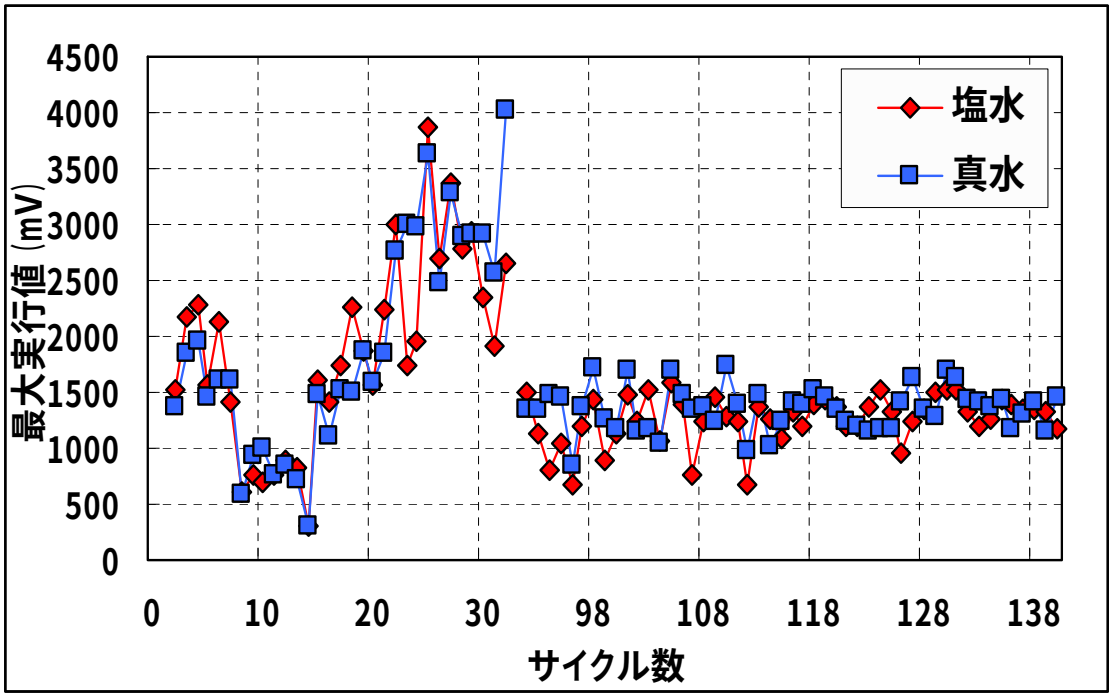


図 5-5-10　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 1cm）

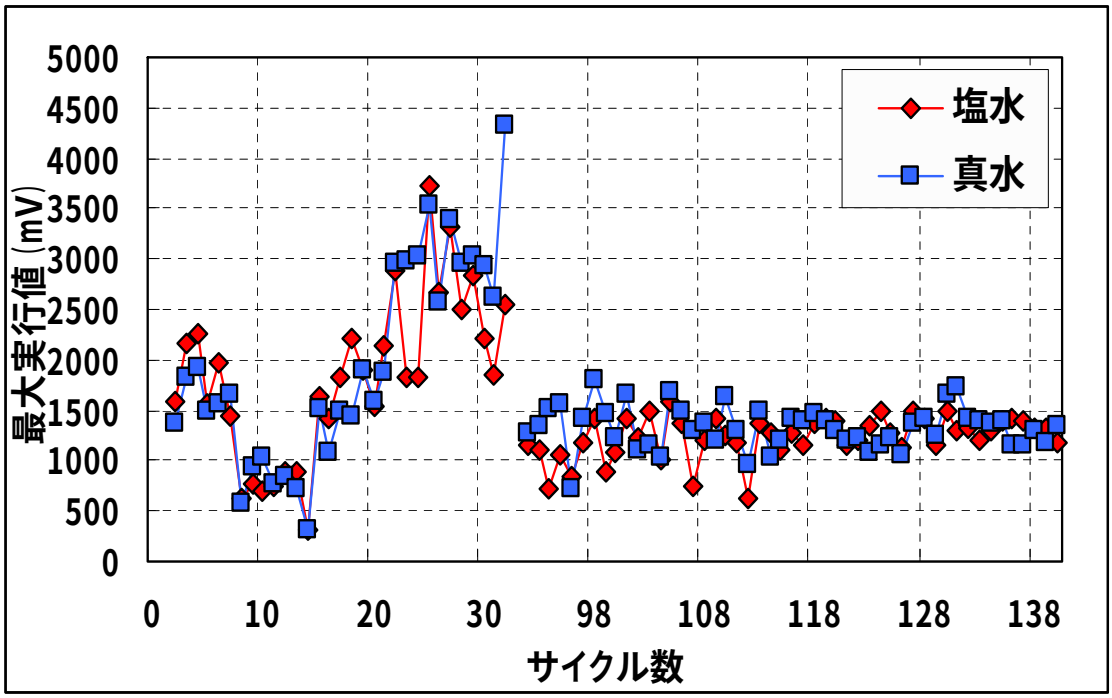


図 5-5-11　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 2cm）

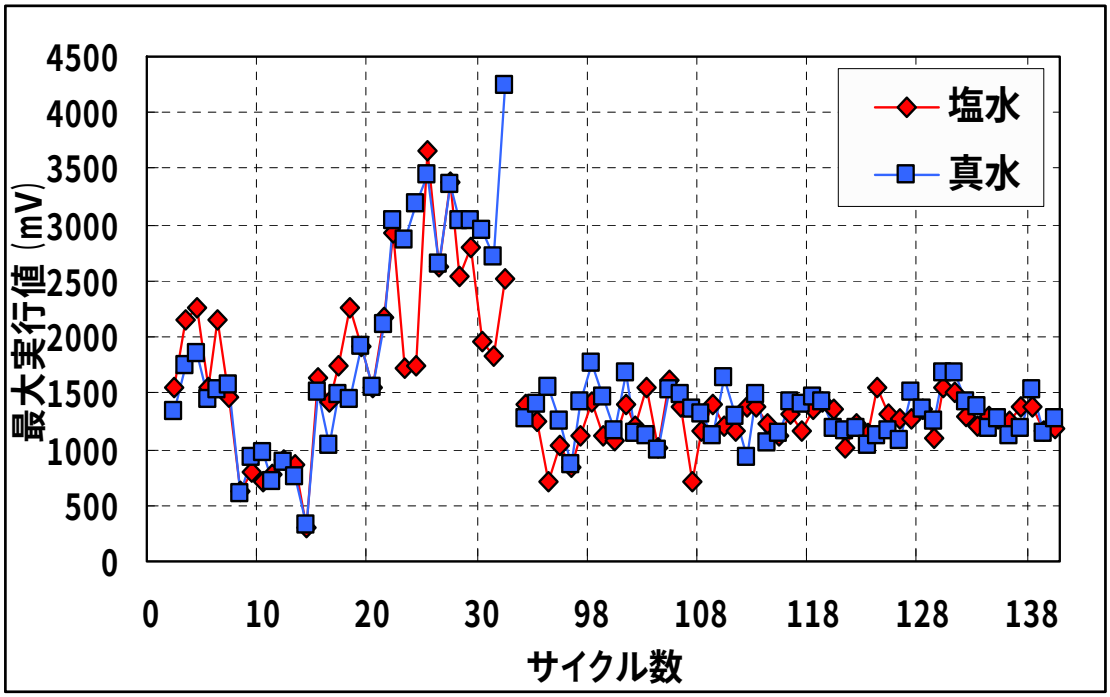


図 5-5-12　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 3cm）

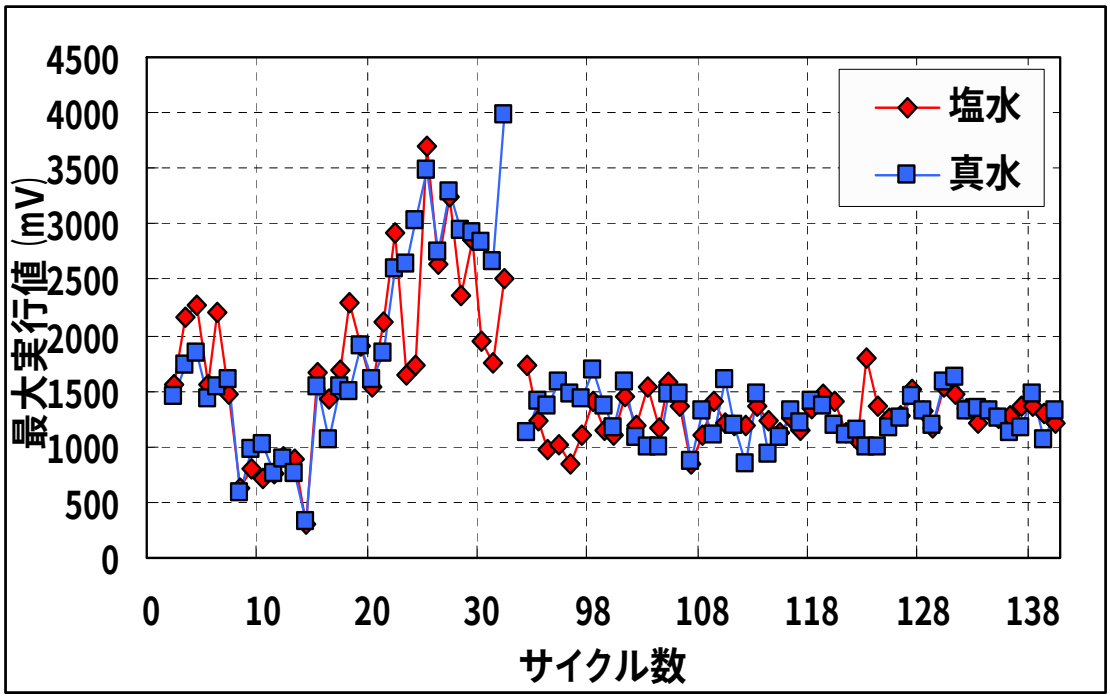


図 5-5-13　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 4cm）

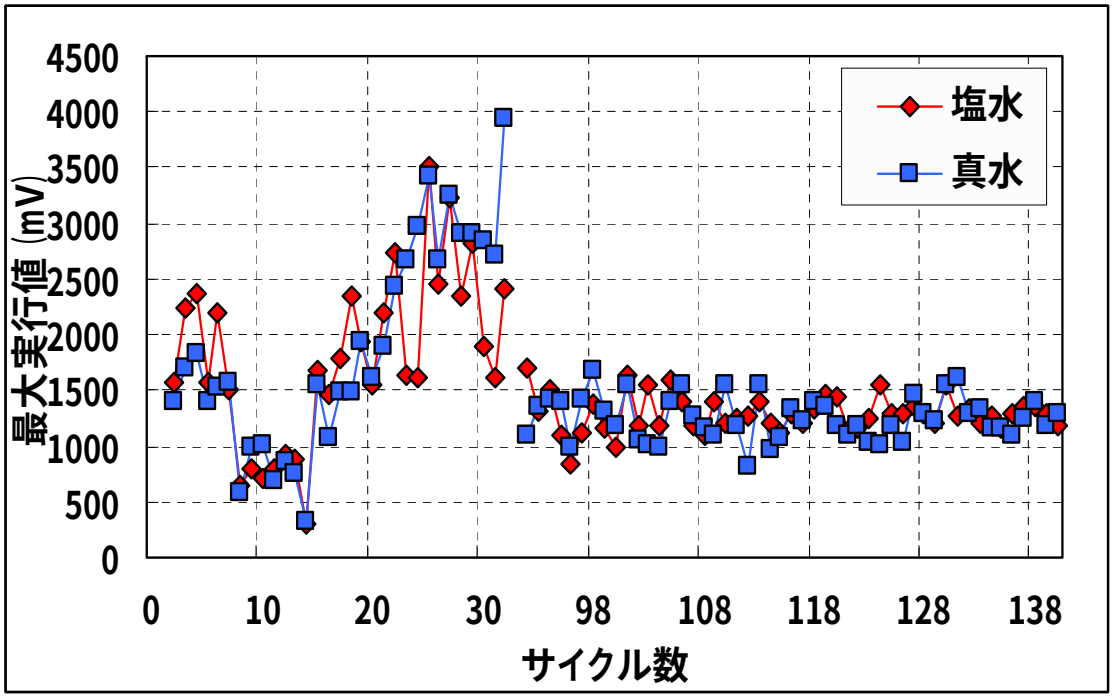


図 5-5-14　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 5cm）

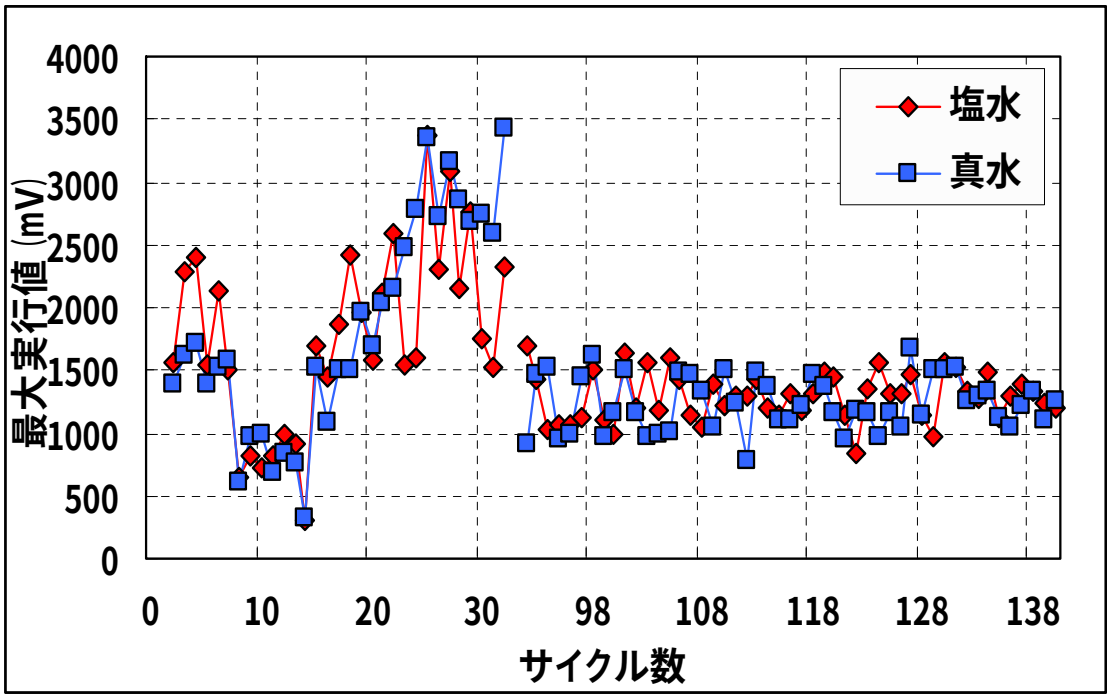


図 5-5-15　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 7cm）

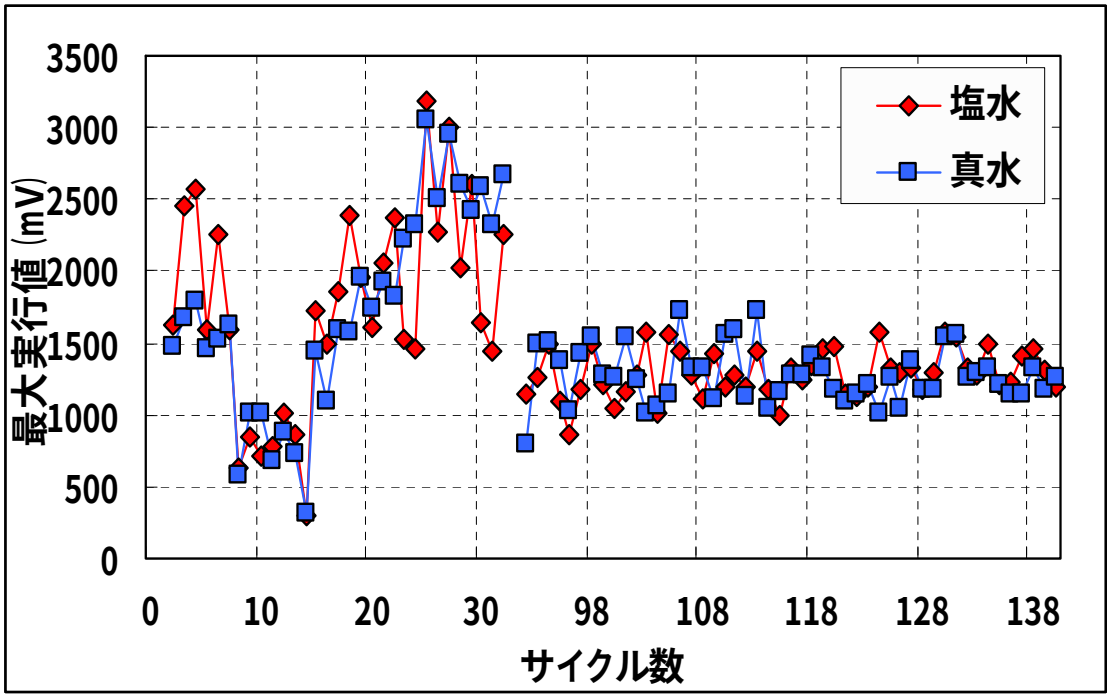


図 5-5-16　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 10cm）

水セメント比 65%

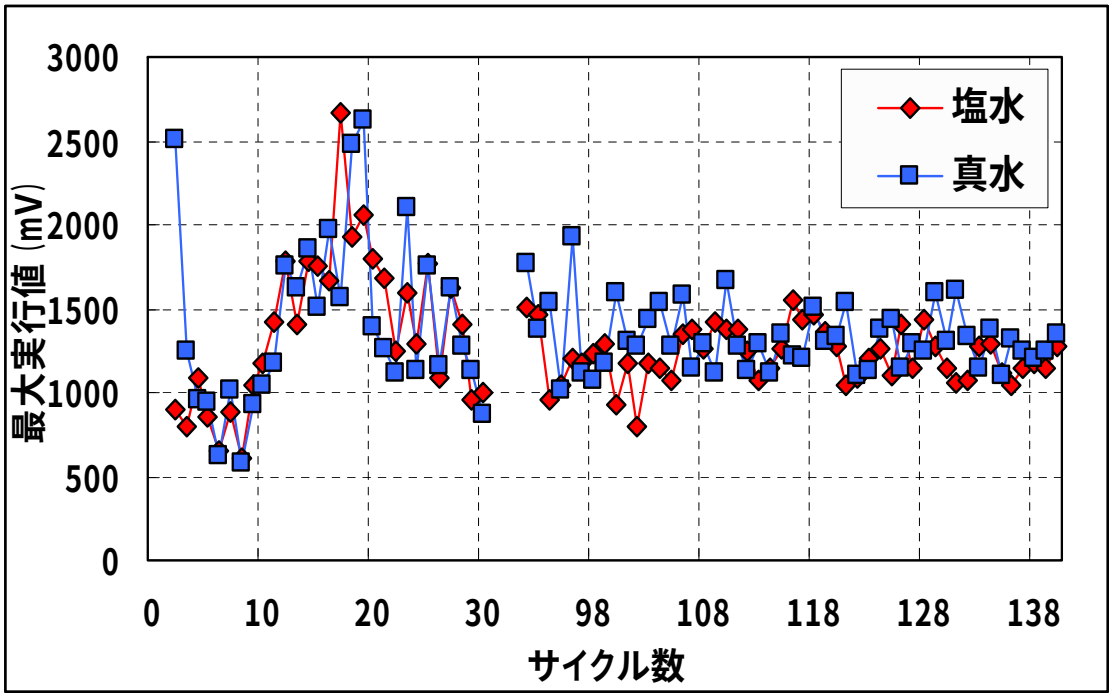


図 5-5-17　塩水浸漬と真水浸漬の比較（表面）

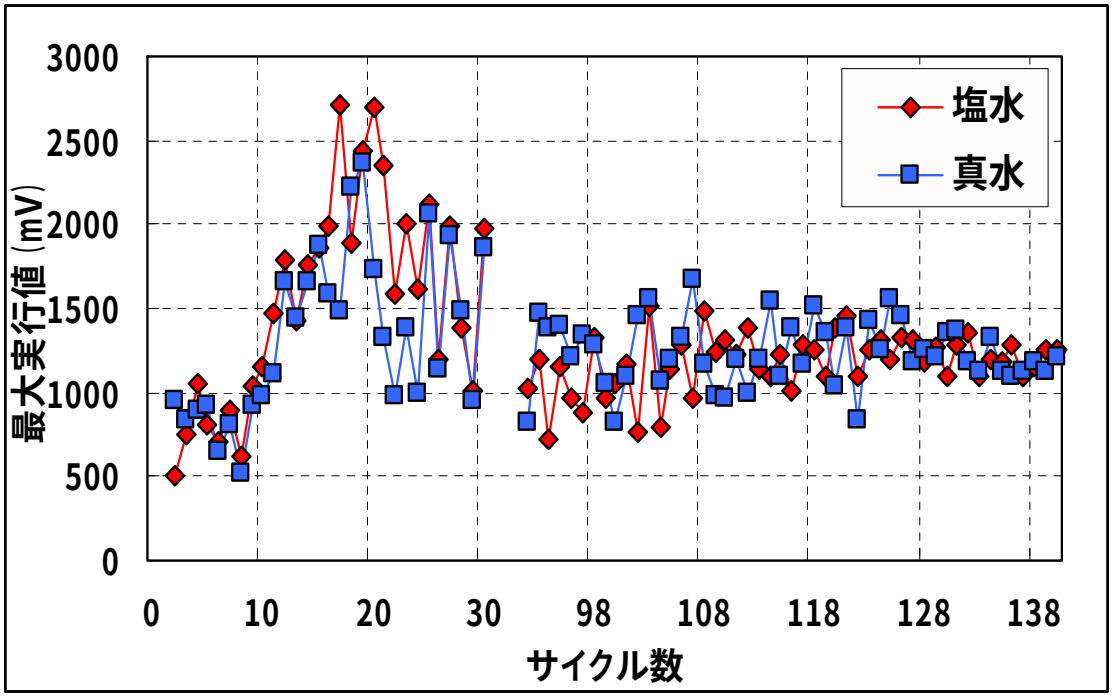


図 5-5-18　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 1cm）

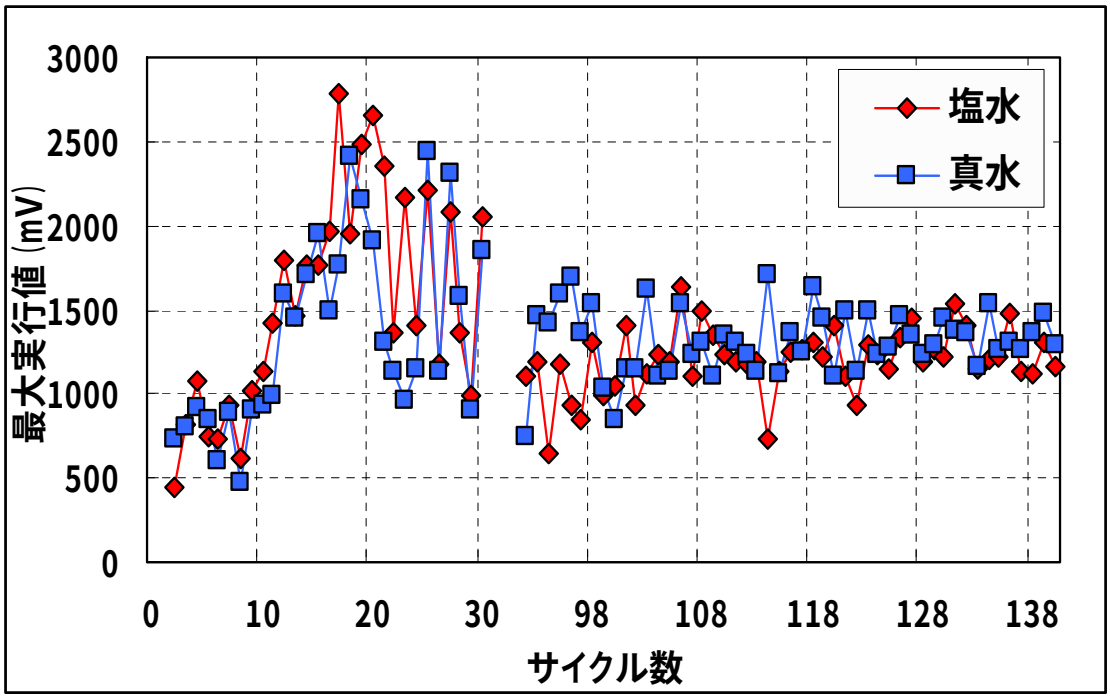


図 5-5-19　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 2cm）

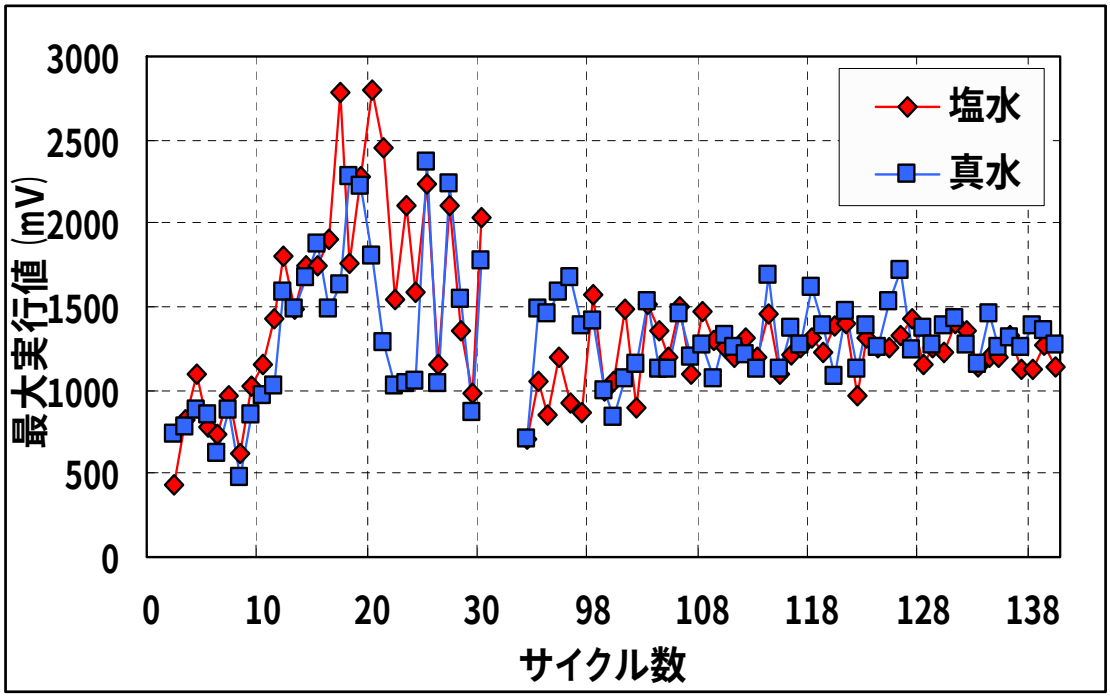


図 5-5-20　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 3cm）

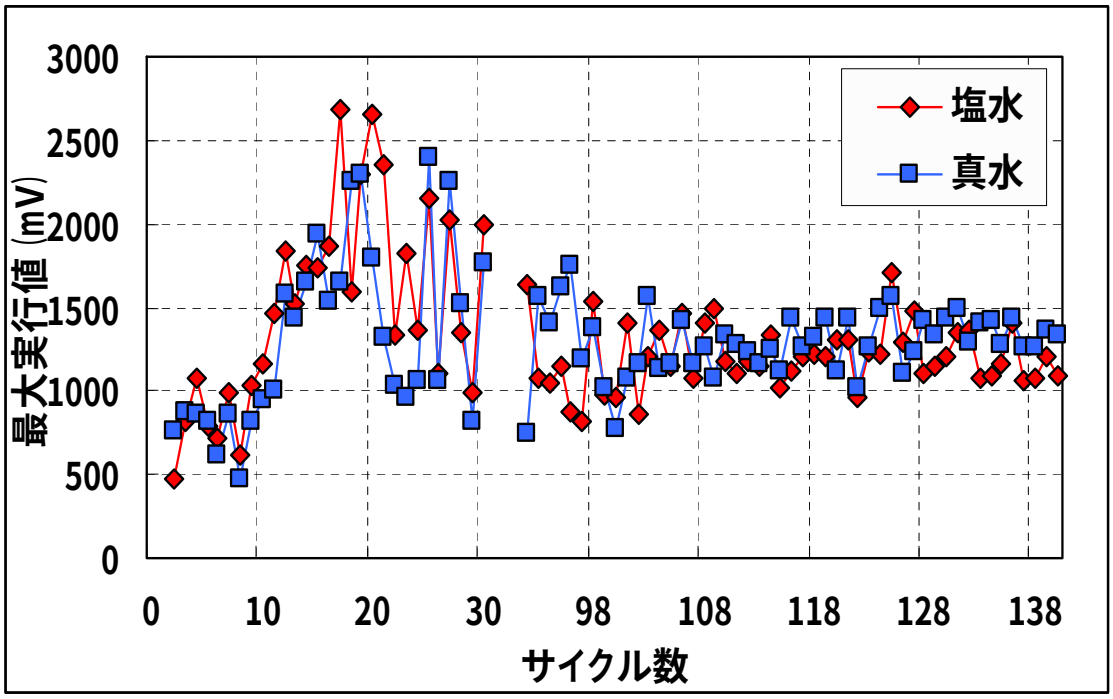


図 5-5-21　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 4cm）

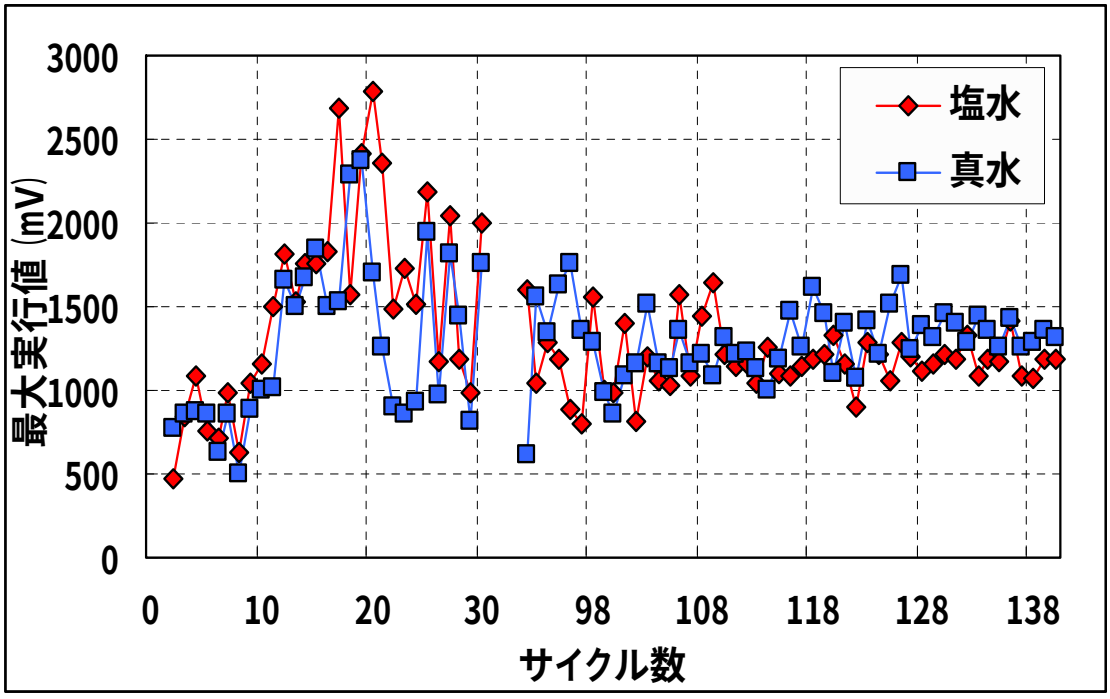


図 5-5-22　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 5cm）

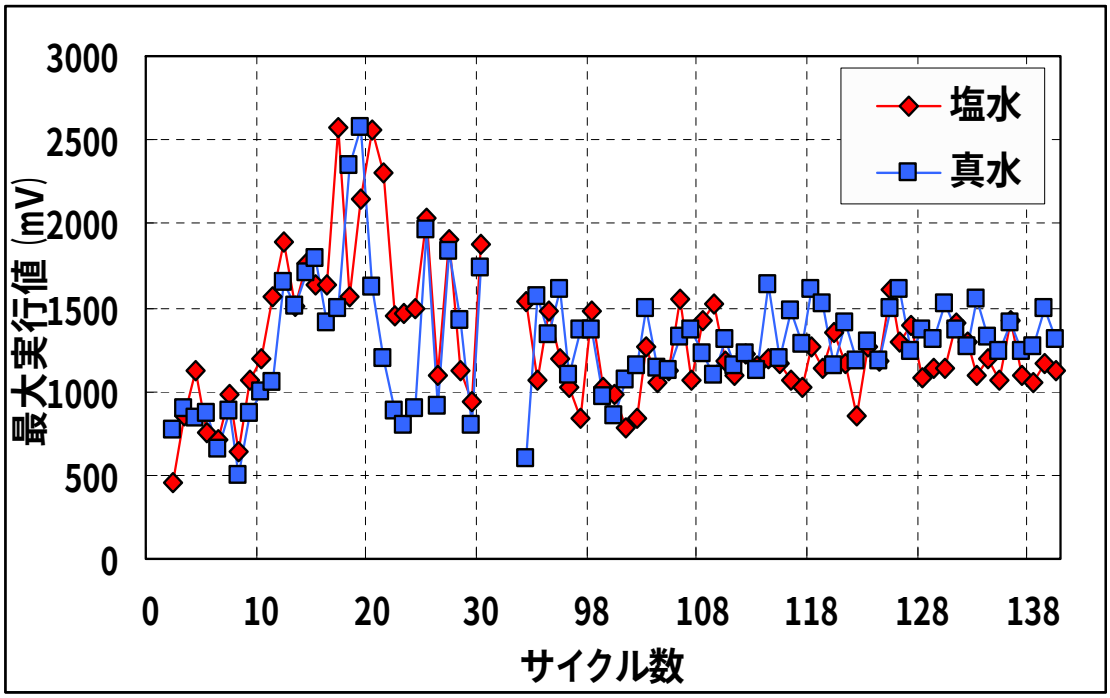


図 5-5-23　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 7cm）

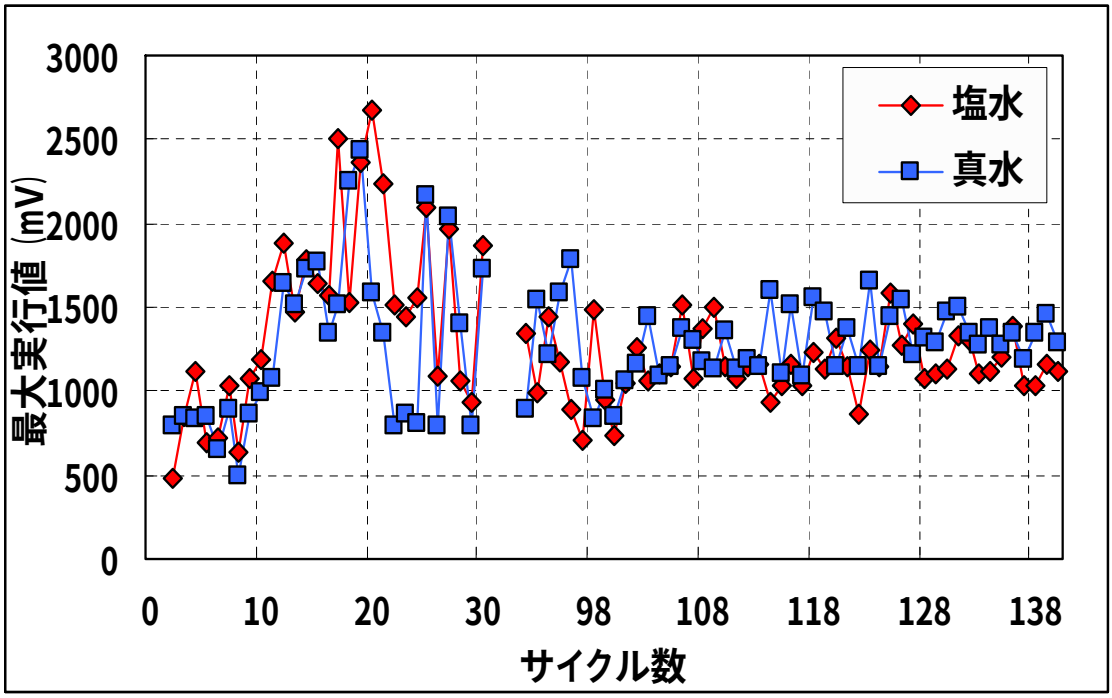


図 5-5-24　塩水浸漬と真水浸漬の比較（深さ 10cm）

5.6　浸漬水溶液の濃度別比較

浸漬させた塩水濃度 3%と 10%の比較を電極のかぶり深さ別に図 5-6-1～5-6-8 に示す。

<u>結果・考察</u>

表面における結果であるが，ほぼ同程度の値を示しているが若干 10%のほうが，最大実効値が大きくでる傾向にある。5.5 による結果によると塩分濃度が高くなるとともに最大実効値は減少すると考えられるが，逆の結果になった。この要因としては，含水量の影響を大きく受けているためであると考えられる。かぶり深さ 1cm においては，表面よりも塩分濃度 3%と 10%の差異が小さくなっている。かぶり深さ 5cm 以降になり，塩分濃度の高いほうが減少する傾向が見られる。このことからも，水分と塩分の双方から影響を受けていると考えられ，かぶりが深くなるほど水分よりも塩分の影響を受けていると考えられる。

現段階では大きな差異をみることができないが，上記の考察から推測されることは、今後も計測を継続して行えば、塩分浸漬の促進用として測定している塩分濃度 10%のほうが実効値は低下していくと考えられる。

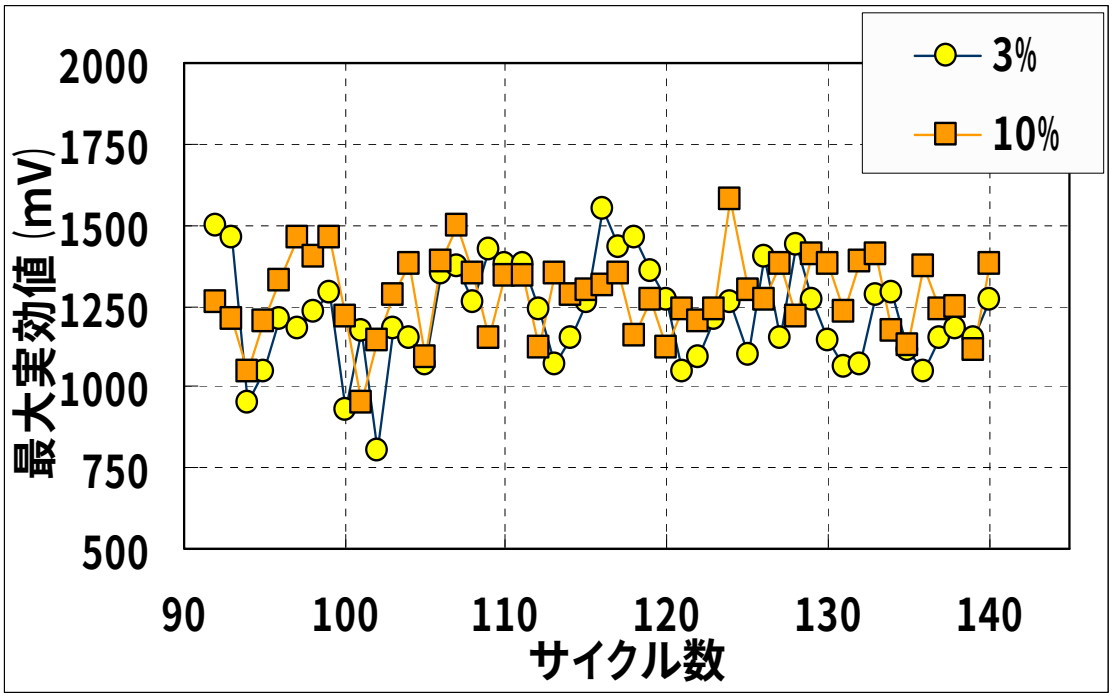


図 5-6-1　塩分濃度 3%と 10%の比較（表面）

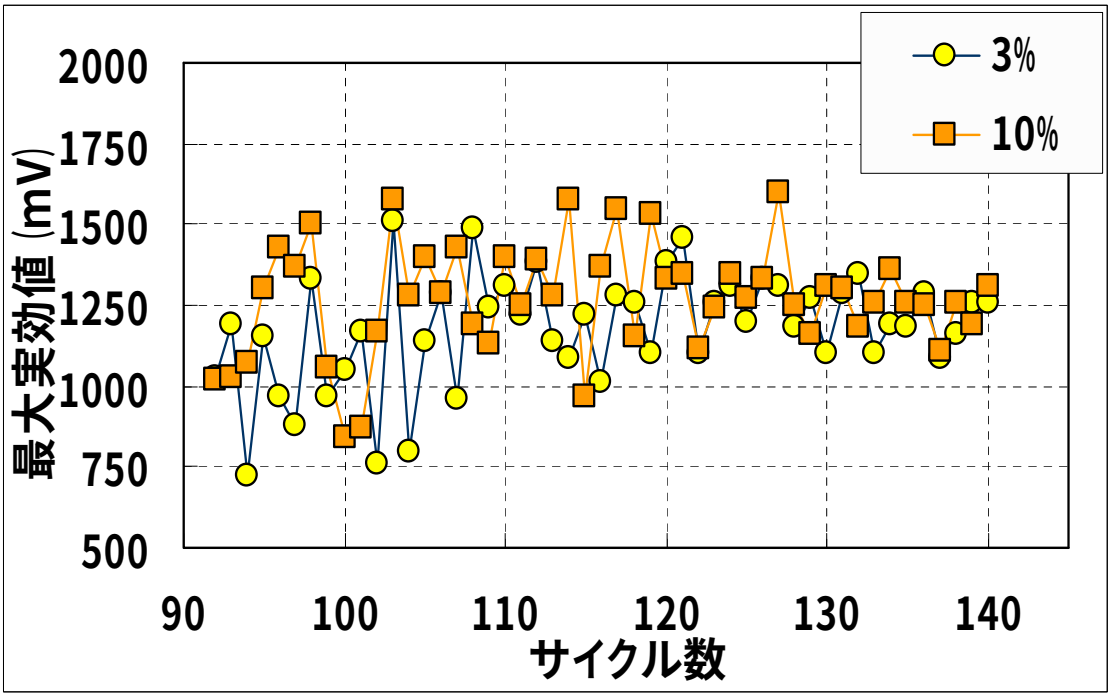


図 5-6-2　塩分濃度 3%と 10%の比較（深さ 1cm）

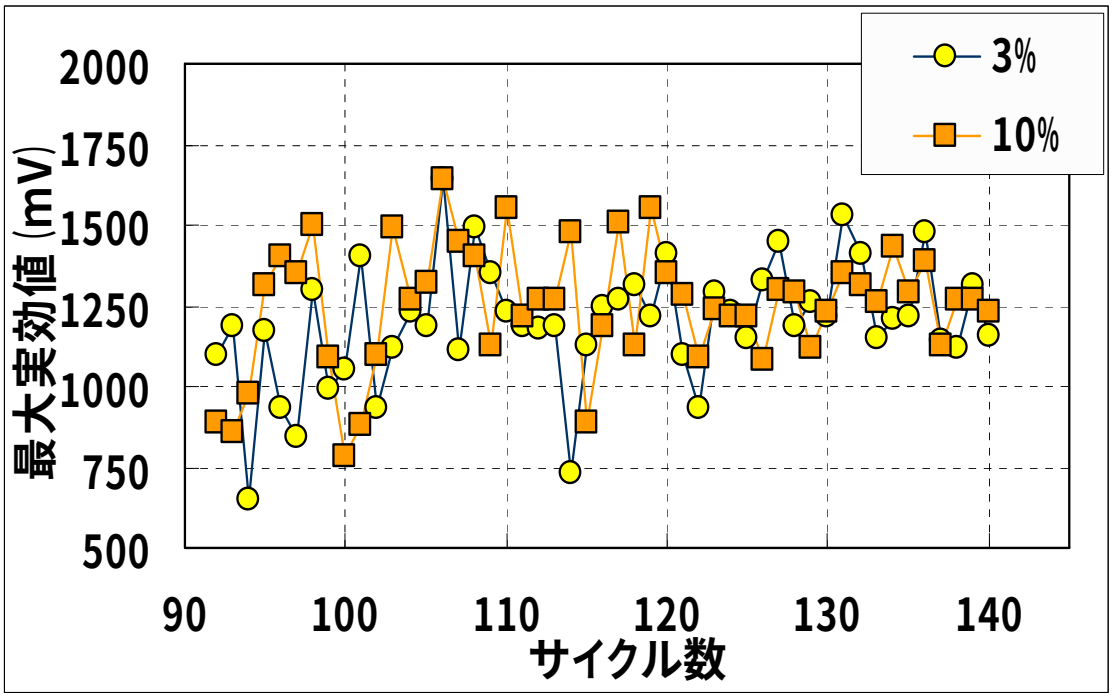


図 5-6-3　塩分濃度 3%と 10%の比較（深さ 2cm）

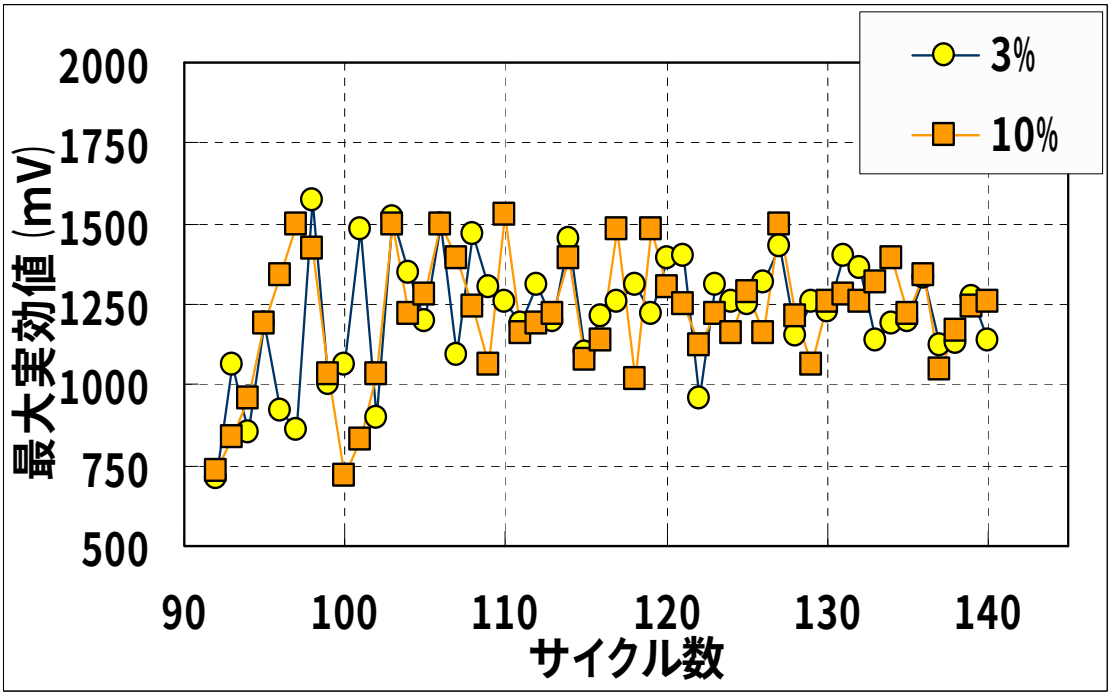


図 5-6-4　塩分濃度 3%と 10%の比較（深さ 3cm）

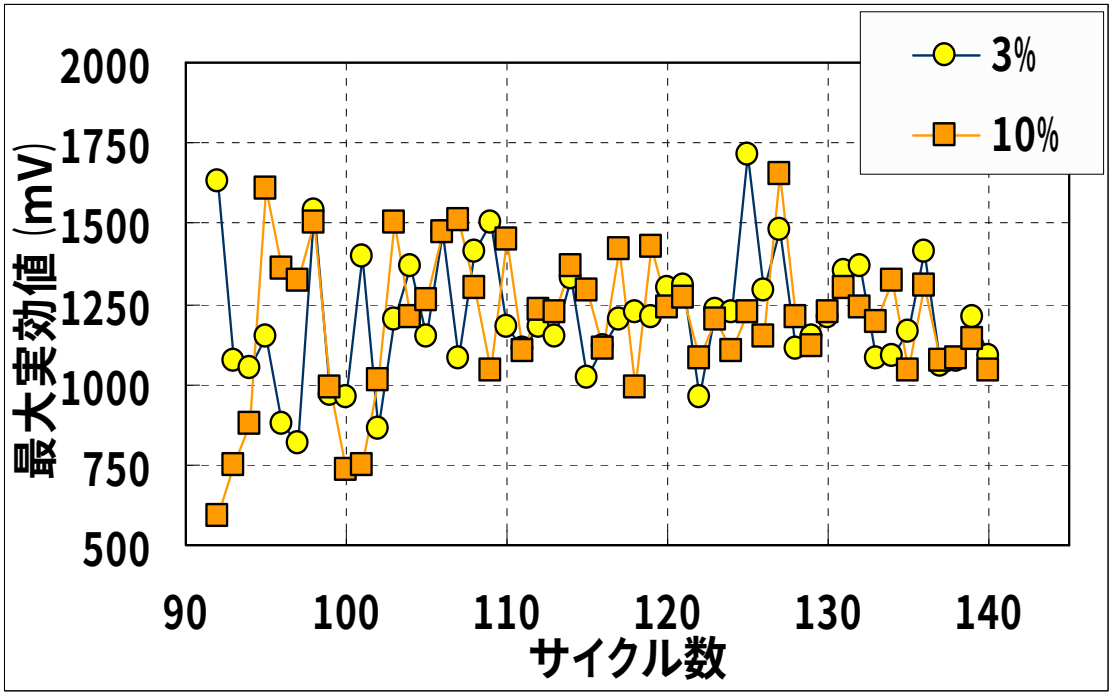


図 5-6-5　塩分濃度 3%と 10%の比較（深さ 4cm）

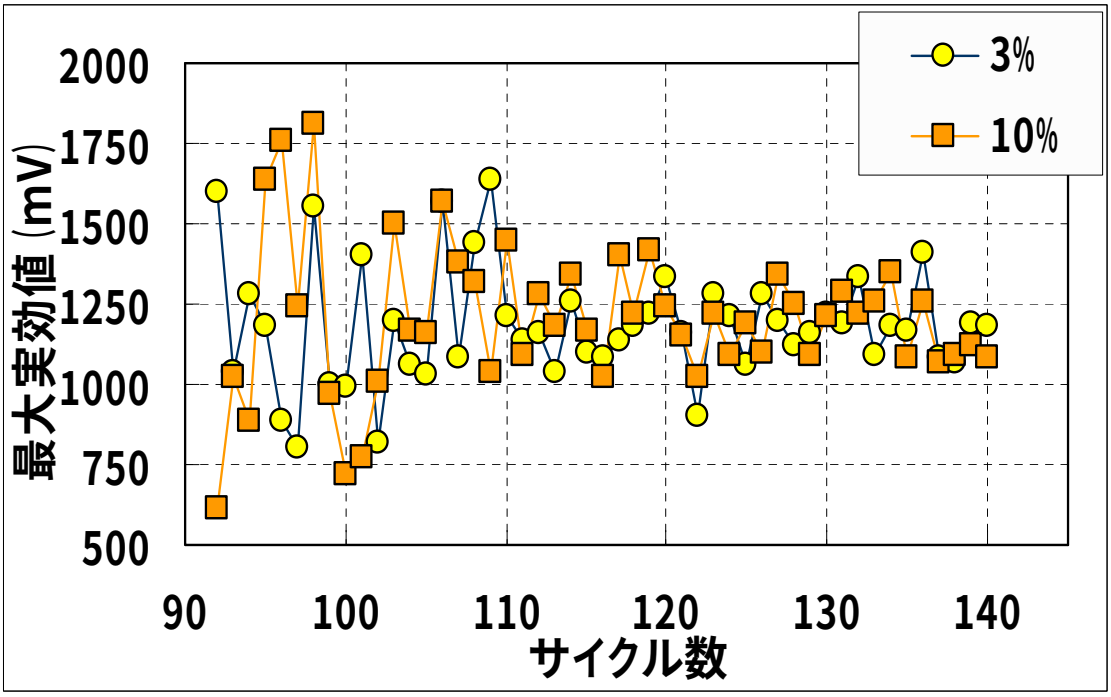


図 5-6-6　塩分濃度 3%と 10%の比較（深さ 5cm）

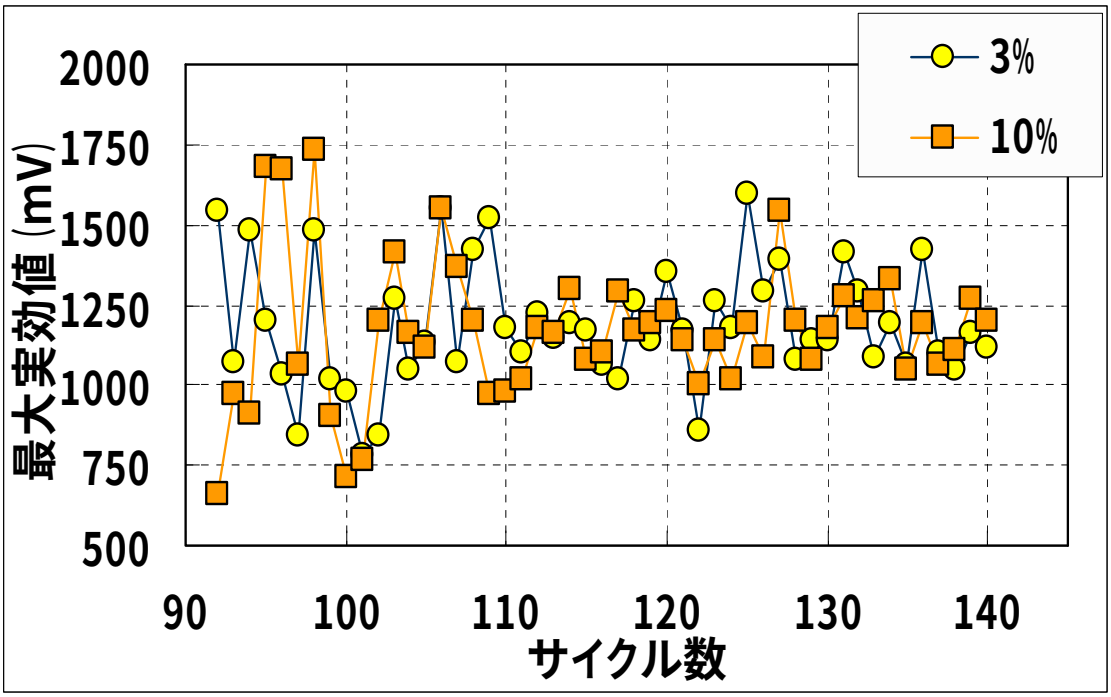


図 5-6-7　塩分濃度 3%と 10%の比較（深さ 7cm）

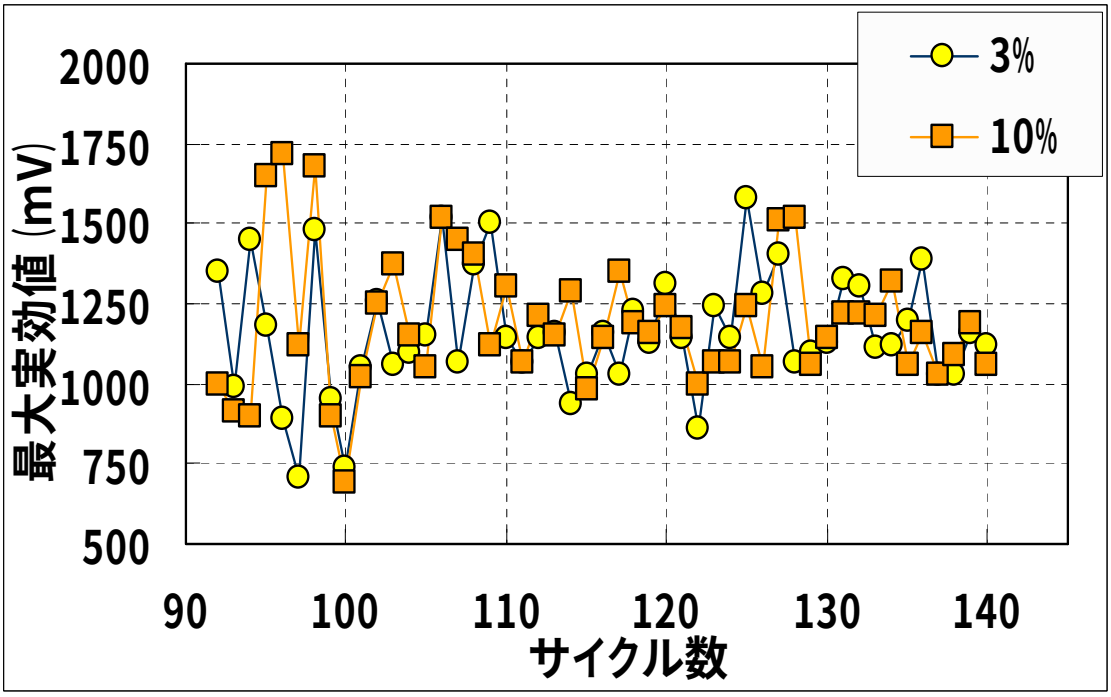


図 5-6-8　塩分濃度 3%と 10%の比較（深さ 10cm）

5.7　かぶり深さ 10cm との差分

電極かぶり深さ 10cm において塩分が現段階で浸漬していないと予想されるため, かぶり深さ 10cm と他の対象かぶり深さとの差分について図 5-7-1～5-7-7 に示す。

結果・考察

数値のバラつきが大きく出てしまったため，傾向を読取ることが難しかった。そこで，かぶり深さ 10cm の測定結果は現段階で塩分･水分両方の作用をまだうけていないと考えられるので，そこからの差分をとることで何か傾向をつかめるのではないかと考えた。その結果，表面付近では大きく差分の値もバラつくものの経時変化に伴い下降傾向にある。このことからも塩分浸透に伴い実効値は低下すると推定される。また，かぶり深さが大きくなるにつれ差分のバラつきも落ち着き，ほぼ一定の変化となった。かぶり深さ 10cm の値が一定と仮定すると，今後，測定を継続して行えば塩分浸透に伴い，全体的に実効値は低下していき，かぶり深さ 10cm の実効値に近づいていくのではないかと考えられる。

また，差分での経時変化がどの結果においても小さい傾向にある。この要因は，塩水と真水の双方からの影響を受けているため塩水からの影響が把握しにくい傾向にあるのだと考えられる。つまり，含水状態を一定に保ち塩化物イオンのみの影響が把握できるような工夫を行えば，塩水浸漬したものと，真水浸漬したものとの差異がはっきりとみえるのではないかと考えられる。

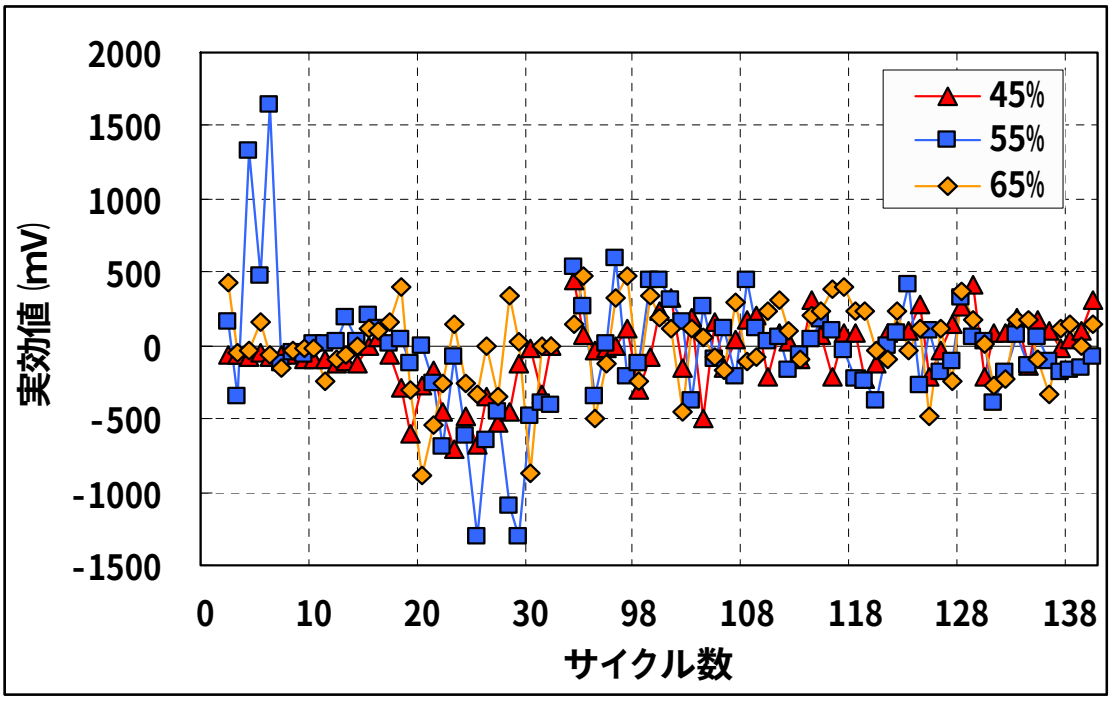


図 5-7-1　かぶり深さ 10cm との差分（表面）

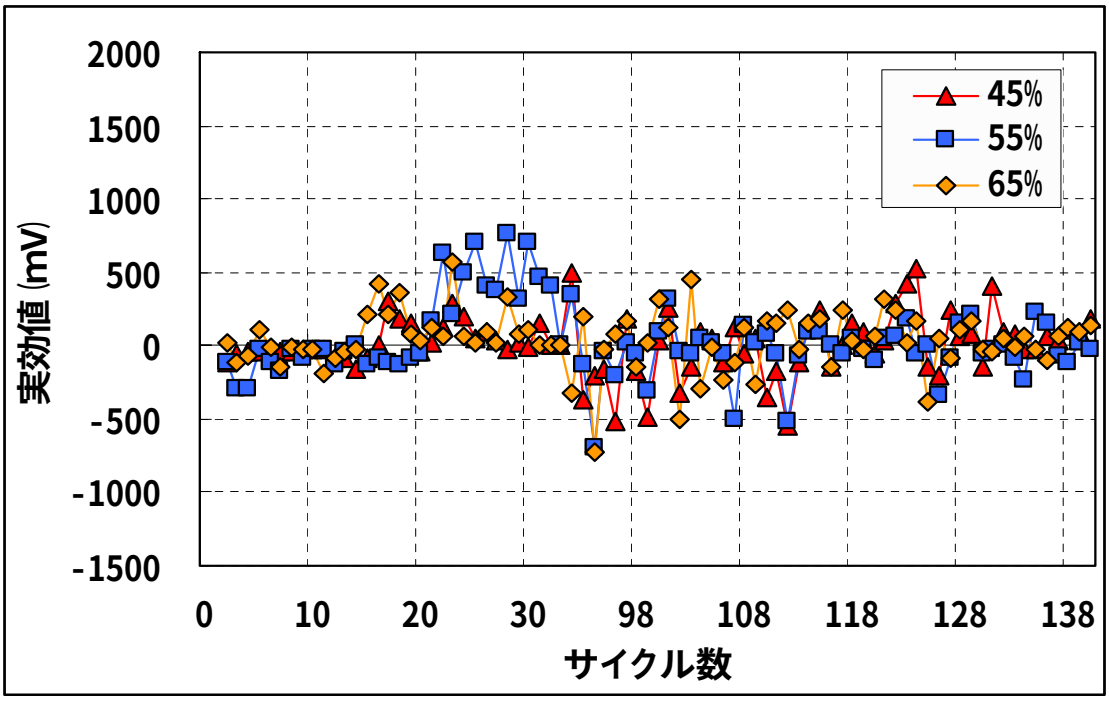


図 5-7-2　かぶり深さ 10cm との差分（かぶり深さ 1cm）

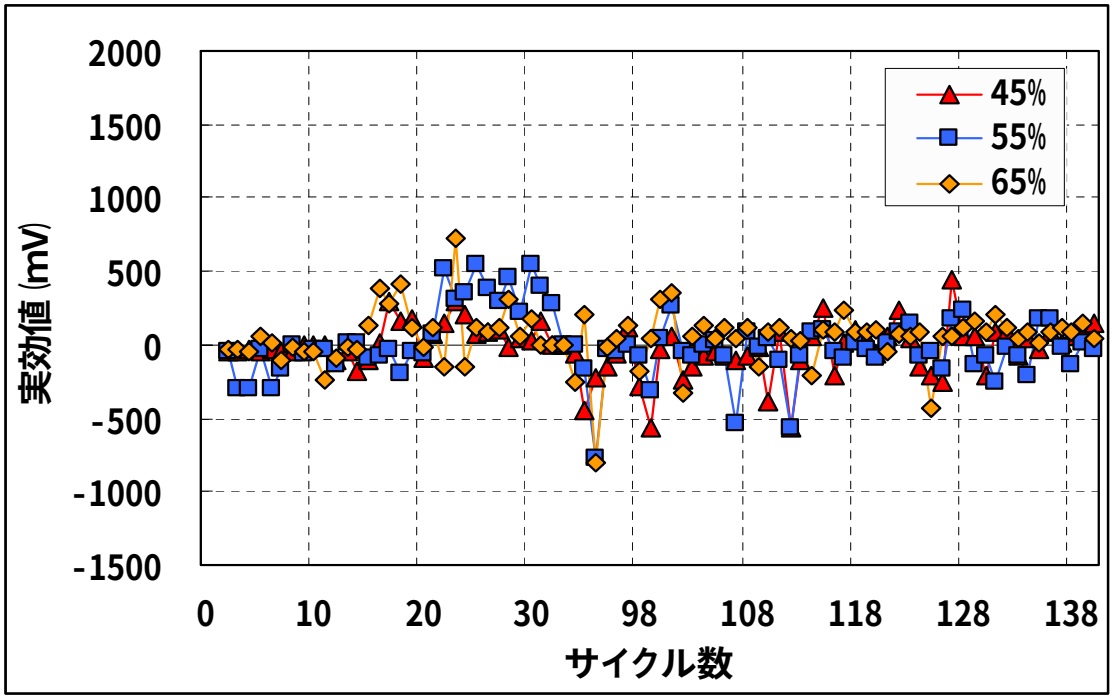


図 5-7-3　かぶり深さ 10cm との差分（かぶり深さ 2cm）

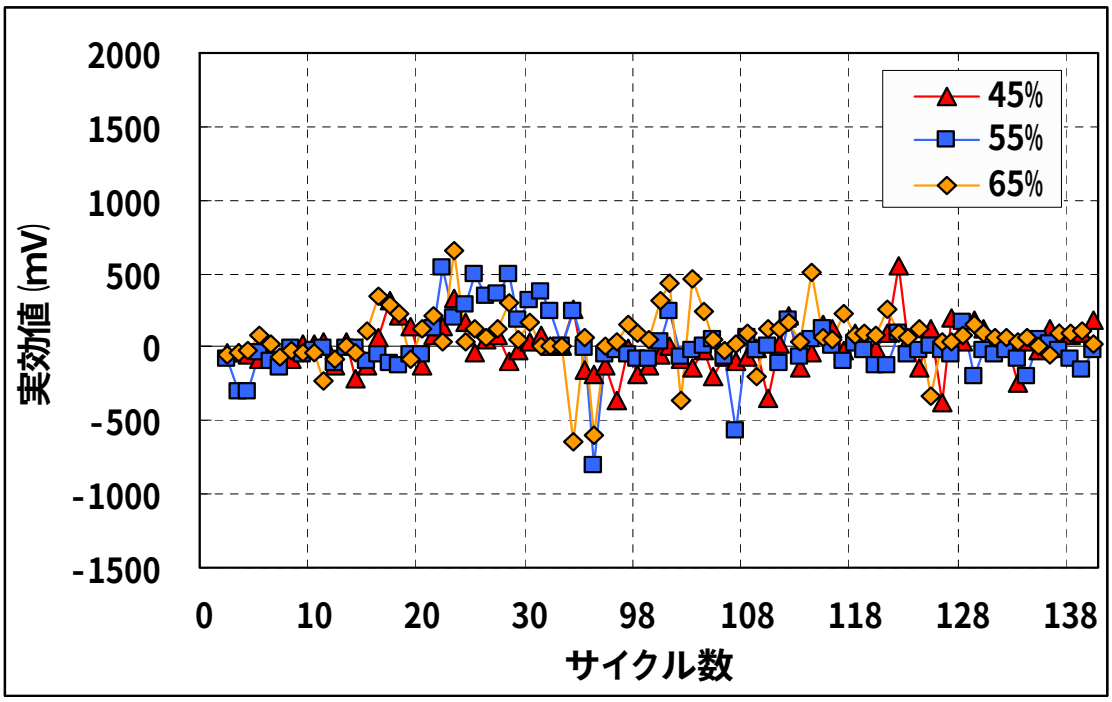


図 5-7-4　かぶり深さ 10cm との差分（かぶり深さ 3cm）

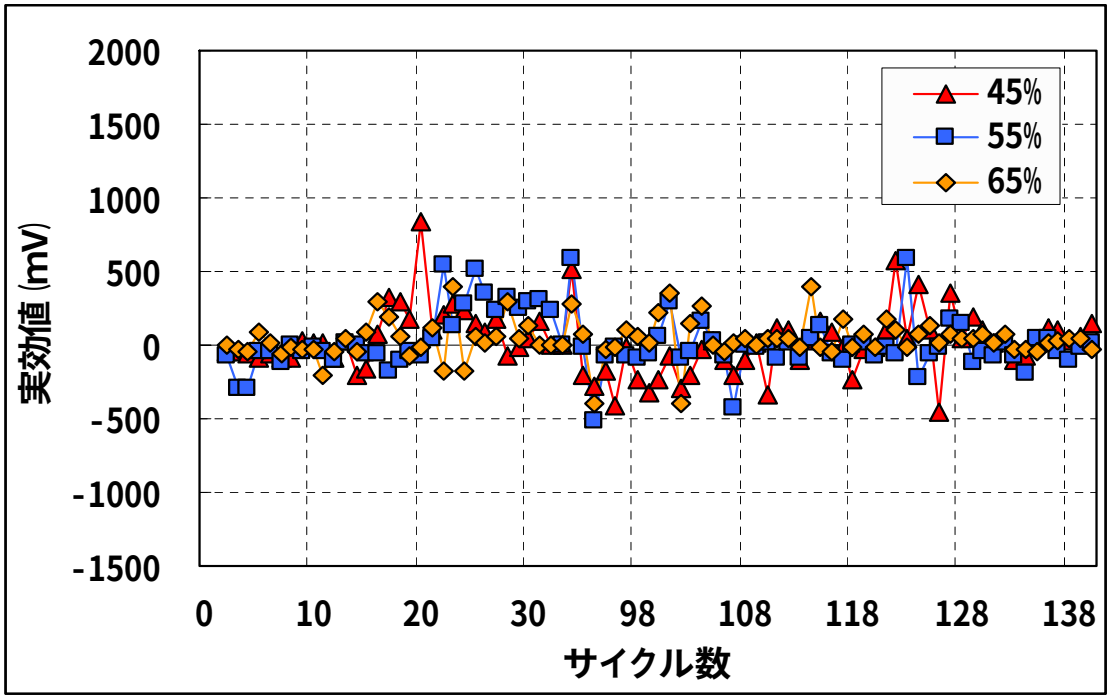


図 5-7-5　かぶり深さ 10cm との差分（かぶり深さ 4cm）

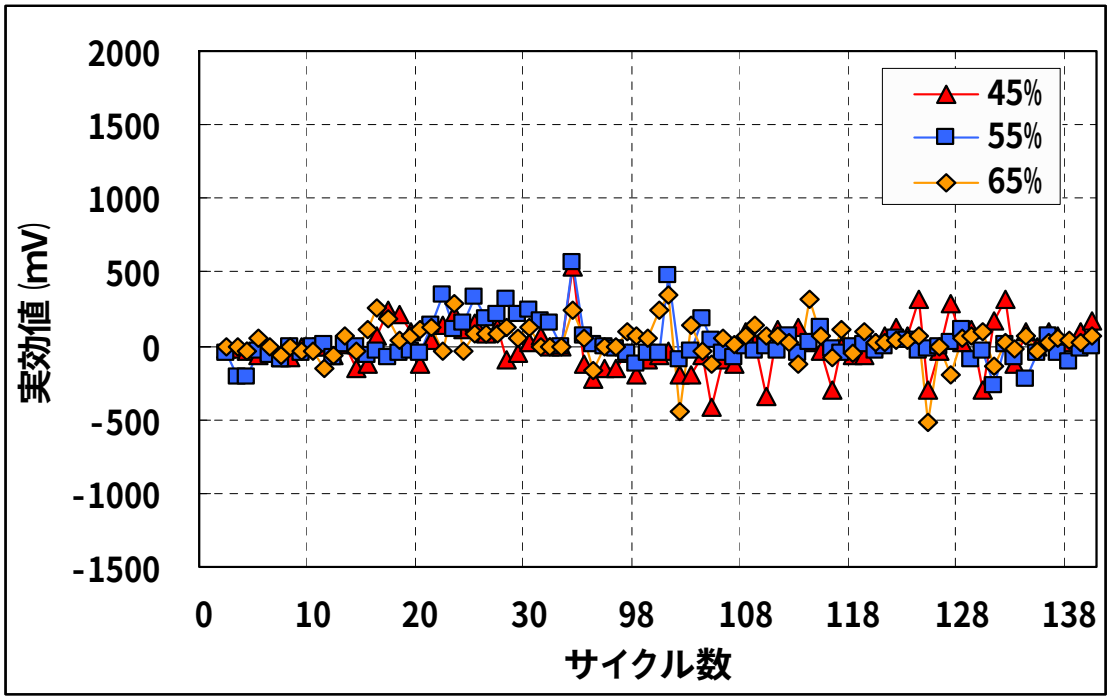


図 5-7-6　かぶり深さ 10cm との差分（かぶり深さ 5cm）

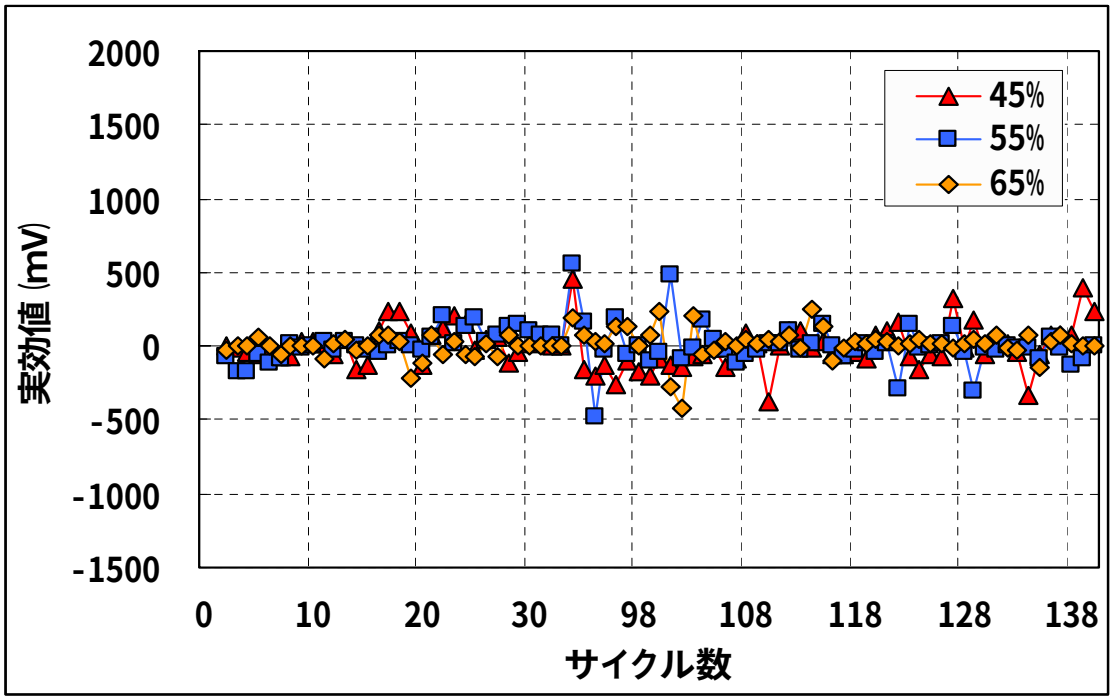


図 5-7-7　かぶり深さ 10cm との差分（かぶり深さ 7cm）

第６章　塩分量の推定値及び，実測値との比較

本研究の室内実験データより算定される推定塩分量と，コア試料の採取データとの間にどの程度差異が生じるのかについて比較・検討を行う。また，電磁波法及び，インピーダンス法の両実験データより塩分量の推定曲線を作成。

6.1　コア採取データによる試験結果

本研究で推定した塩分量と実際に含まれる塩分量を比較するため，測定条件と同条件下にある供試体よりコア試料を採取し，表面からの深さごとに電位差滴定法により塩分量の分析を行った。採取したコアの概要については表 6.1 に示す。試験方法については，第 3 章を参照。コア試料の採取による塩分量の実測値について可溶性塩分量は図 6-1-1 に示し，全塩分は図 6-1-2 に示す。

表6.1　供試体の概要

<table>
<tr><th>試験区分</th><th>W/C (%)</th><th>スランプ (cm)</th><th>供試体 (mm)</th><th>鉄筋･電極位置 (mm)</th></tr>
<tr><td rowspan="9">電磁波法
インピ-ダンス法</td><td rowspan="3">45</td><td>5</td><td rowspan="9">400×200×300</td><td rowspan="3">鉄筋位置＝
0,50,70,100</td></tr>
<tr><td>12</td></tr>
<tr><td>21</td></tr>
<tr><td rowspan="3">55</td><td>5</td><td rowspan="6">電極位置＝
0,10,20,30,40,
50,70,100</td></tr>
<tr><td>12</td></tr>
<tr><td>21</td></tr>
<tr><td rowspan="3">65</td><td>5</td></tr>
<tr><td>12</td></tr>
<tr><td>21</td></tr>
<tr><td rowspan="3">電位差滴定法</td><td>45</td><td rowspan="3">12</td><td rowspan="3">φ50×100</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>55</td></tr>
<tr><td>65</td></tr>
</table>

<u>結果・考察</u>

図 6-1-1，6-1-2 より全塩分，可溶性塩分のどちらのグラフも水セメント比が大きいほど塩分が浸漬しているという傾向が見られる。同スランプかつ，単位水量を固定しているため塩分浸漬にはコンクリート中の単位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漬しにくく、逆に少ないほど浸漬しやすいと考えられる。また，どちらのグラフも W/C=45，55%では 5cm まで，W/C=65%では 7cm まで塩分が浸漬している結果となった。また，塩分量の分布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といった既往と同様の結果を得ることができた。図 6-1-1 において W/C=65%の表面から 1～2cm で可溶性塩分量の変化が同程度になっているのは, おそらくコア試料を採取する際に可溶性の塩分量が水により流されたためであると考えられ，表面付近であるかぶり 1cm ではグラフに表れる結果よりも大きな値を示すものと考えられる。全塩分に関しては値がばらつく傾向にあった。セメントに含まれる塩基など全ての塩分に対しての結果であるためこのような結果になったのだと考えられる。本研究では，全塩分との関係について検討は行っていないが，打ち込み時に含まれる塩分量について調べてみる必要もあるかもしれないと考えられる。

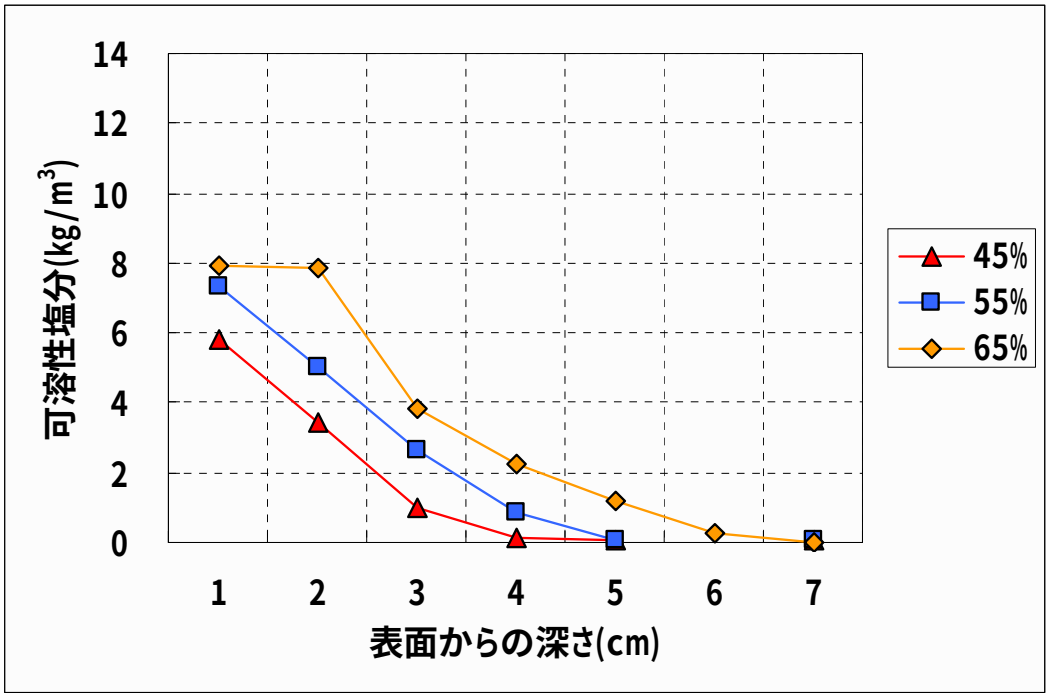


図 6-1-1　表面深さ毎の可溶性塩分量分布

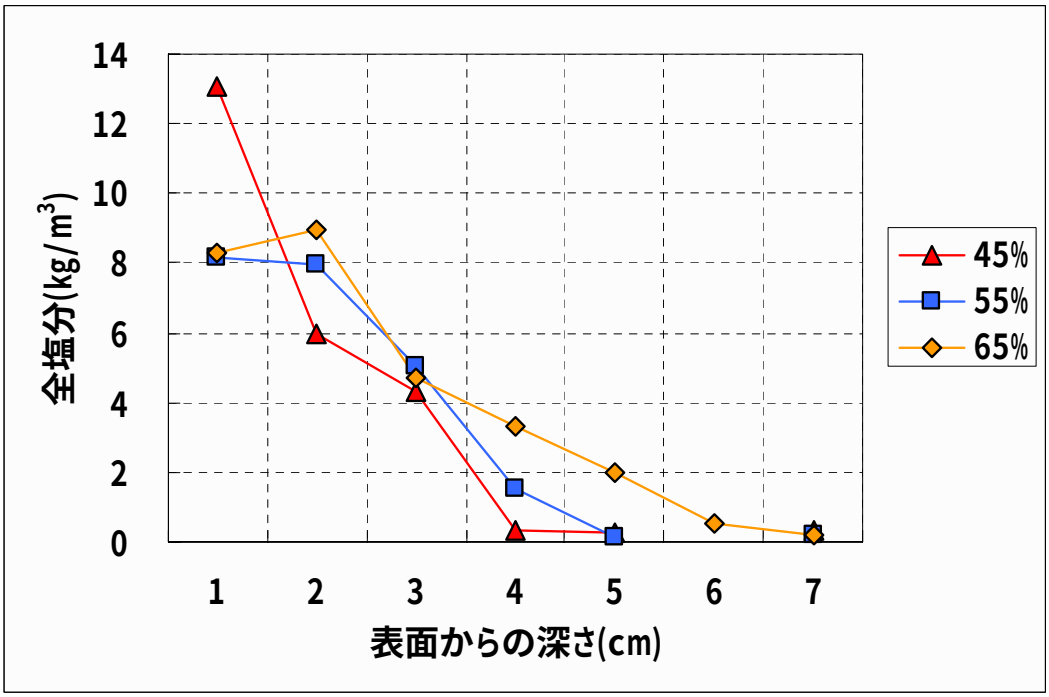


図 6-1-2　表面深さ毎の全塩分

6.2　塩分量の推定方法

6.2.1　インピーダンス法による塩分曲線の推定方法

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

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

から推定塩分量を算出した。

ここで,

$C(x,t)$：時間ｔ、距離 x における塩化物量（ｋｇ/㎥）

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（㎠/s）

t：経過時間（ｓ）

なお，見かけの表面塩化物量は重回帰分析により算出し，D_c は海洋コンクリート構造物（w/c=45%）では一般に用いられる 10^{-8}cm²/ｓを用いた。以下に重回帰式を示す。

$$C_0 = 0.001441 \times \text{最大実効値}(mV) + 0.12826 \times W/C - 0.23424$$

6.2.2　電磁波法による塩分量の推定方法

電磁波法で得られる塩分推定量は対象かぶり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算出し，それを対象かぶり深さで除し，平均塩化物濃度を縦の長さとし，それぞれの鉄板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、平均塩化物濃度を用い比較する。また，電磁波法の推定塩分量は、2003 年度の研究より得られている鉄板深さ毎に異なる重回帰式より算出。

・　鉄筋かぶり厚 50mm

$$C_c = 0.146 \times \varepsilon - 0.068 \times \alpha - 0.248 \times T + 0.779 \times \mu + 6.241$$

・　鉄筋かぶり厚 70mm

$$C_c = 0.314 \times \varepsilon - 0.089 \times \alpha - 0.273 \times T - 0.086 \times \mu + 7.015$$

鉄筋かぶり厚 100mm

$$C_c = -0.602 \times \varepsilon - 0.240 \times \alpha - 0.116 \times T - 1.382 \times \mu + 25.271$$

ここで，Cc は塩化物量（kg/m^3），T は外気温（℃），μはコンクリートの含水率（%），εは比誘電率，αは出力波形において着目している波形の振幅値である

また，μについては W/C４５%，測定日の湿度により相対含水率を算出したものである。

また，6.2.1～6.2.2 までのフローを以下に示す。

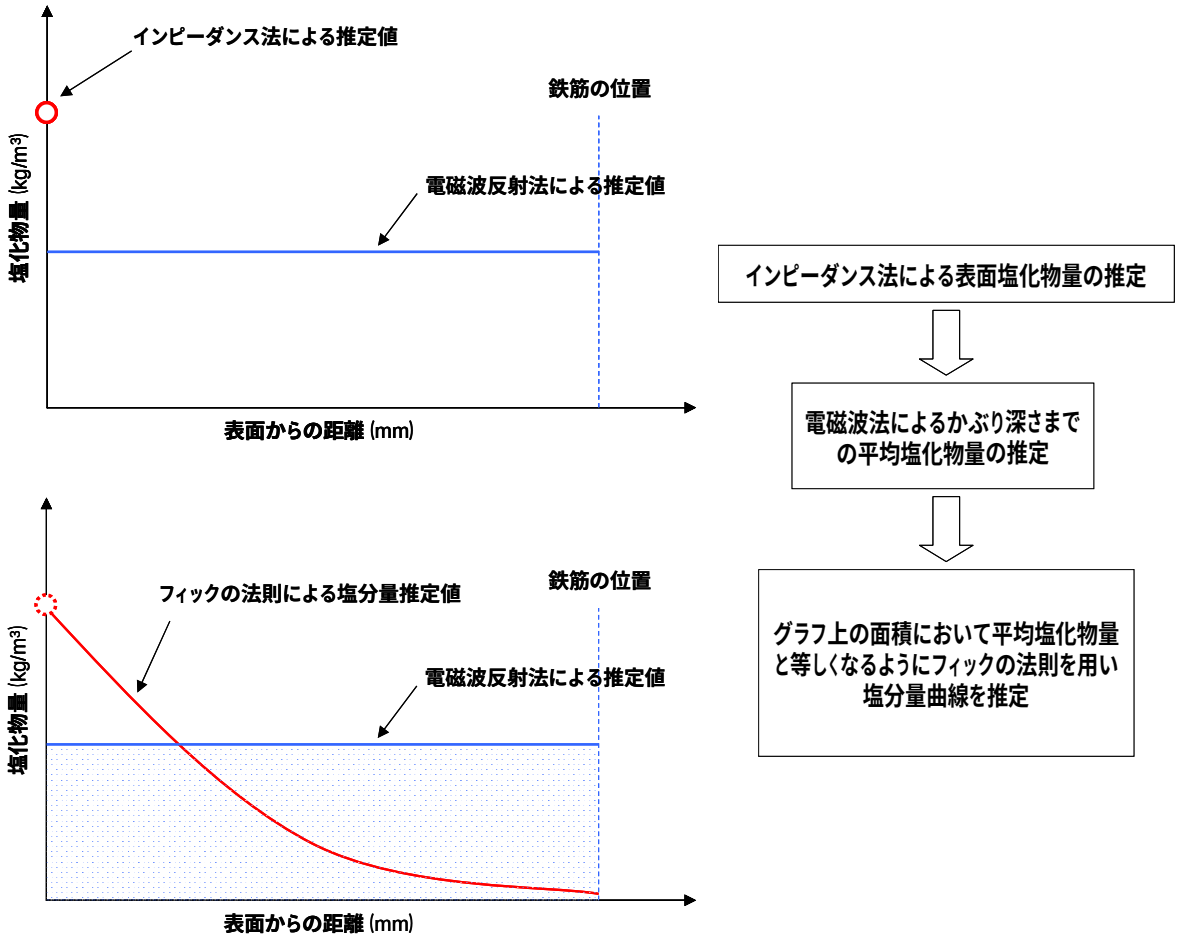


図 6-2-1　推定塩分曲線のフロー図

6.3　インピーダンス法の実験データを用いた塩分量推定結果

6.2.1 のインピーダンス法による推定方法から得られた結果である。重回帰式により用いたのは表面塩化物量であるが，表面からの深さ毎の重回帰分析結果と実測値について図 6-3-1 に示し，フィックの第 2 法則を用いた塩分量の推定値と実測値について図 6-3-2 に示す。また，塩化物イオンの拡散係数をコア試料の実験データに合わせた推定値について図 6-3-3 に示す。

<u>結果・考察</u>

図 6-3-1 についてだが，表面塩化物量はほぼ期待したとおりの値となったが，W/C=65%における表面からの深さ 10～20mm 辺りの凹凸により全体的に予想した値よりも若干ではあるが大きくでる結果となった。しかし，今回の重回帰分析については，コア採取による塩分量とのものであるため誤差も小さいが，コア試料を何度か採取し比較することで重回帰式も精度がよくなるのではないかと考えられる。

図 6-3-2 の結果についてだが，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。この原因としては，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（$Dc=10^{-8}cm^2/s$）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。実際に，第 7 章で載せている実構造物の表面からの深さごとの塩分量分布よりも室内実験で用いた供試体のコア採取データは勾配が明らかに急である。おそらく，室内実験で用いた供試体は塩分の乾湿繰り返しを行ったため，急激にコンクリート内部に塩分が浸漬したものだと考えられる。

図 6-3-3 についてだが，これは，フィックの第 2 法則における塩化物イオンの拡散係数を供試体の塩分量分布の勾配に合わせて変化させたものであり，$Dc=10^{-7.489}cm^2/s$ であった。一般に用いられるものと－0.5 程度の誤差があり，供試体での乾湿の繰り返しによる塩分の浸透速度の速さなどの影響が考えられる。また，フィックの法則が海洋コンクリート構造物に適用されているため W/C=45%についての誤差が他の水セメント比よりも小さいといった結果になった。今後は，塩分浸透速度や水セメント比などを考慮した塩化物イオンの拡散係数を算定していく必要があると考えられる。

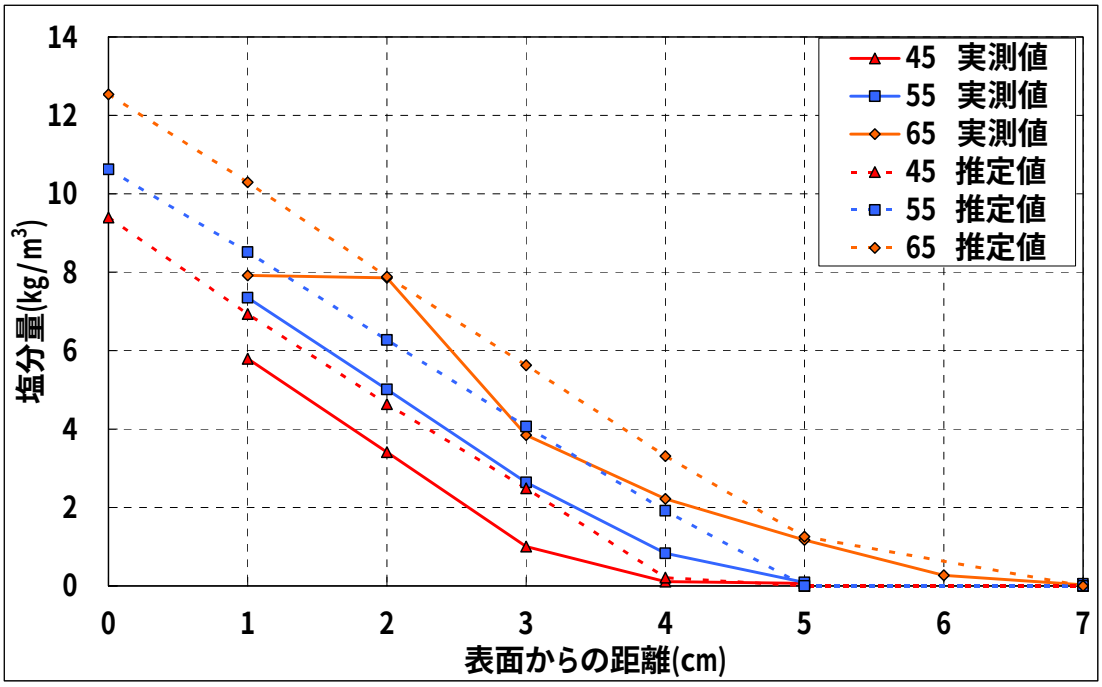


図 6-3-1　重回帰分析による塩分量推定値と実測値

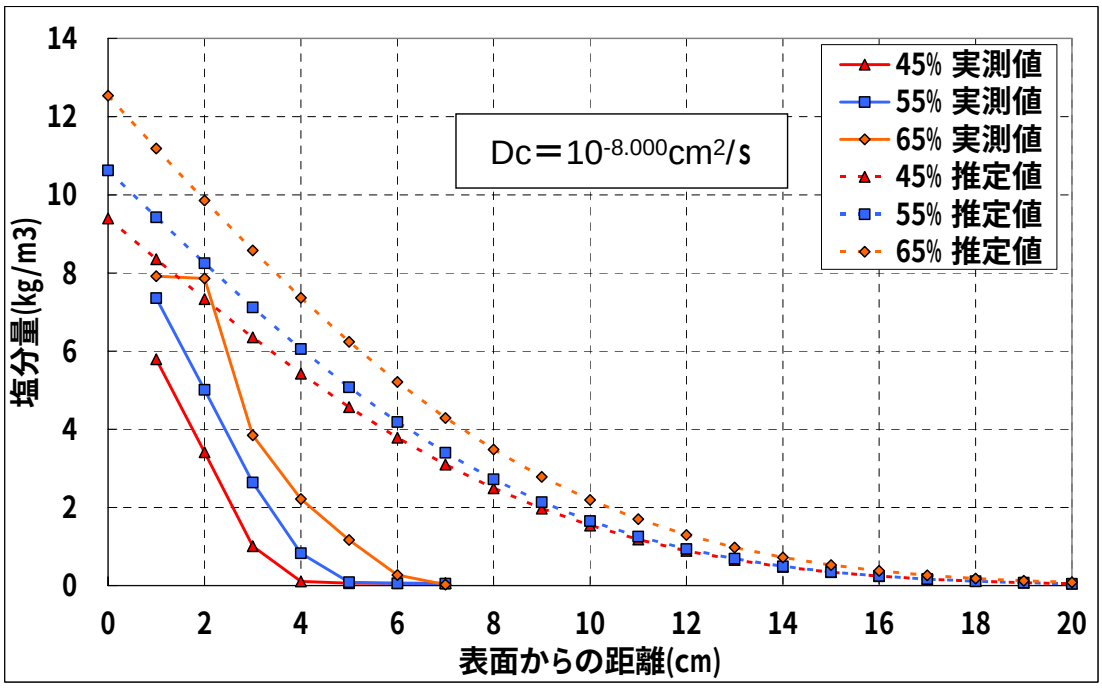


図 6-3-2　フィックの法則による塩分量の推定曲線

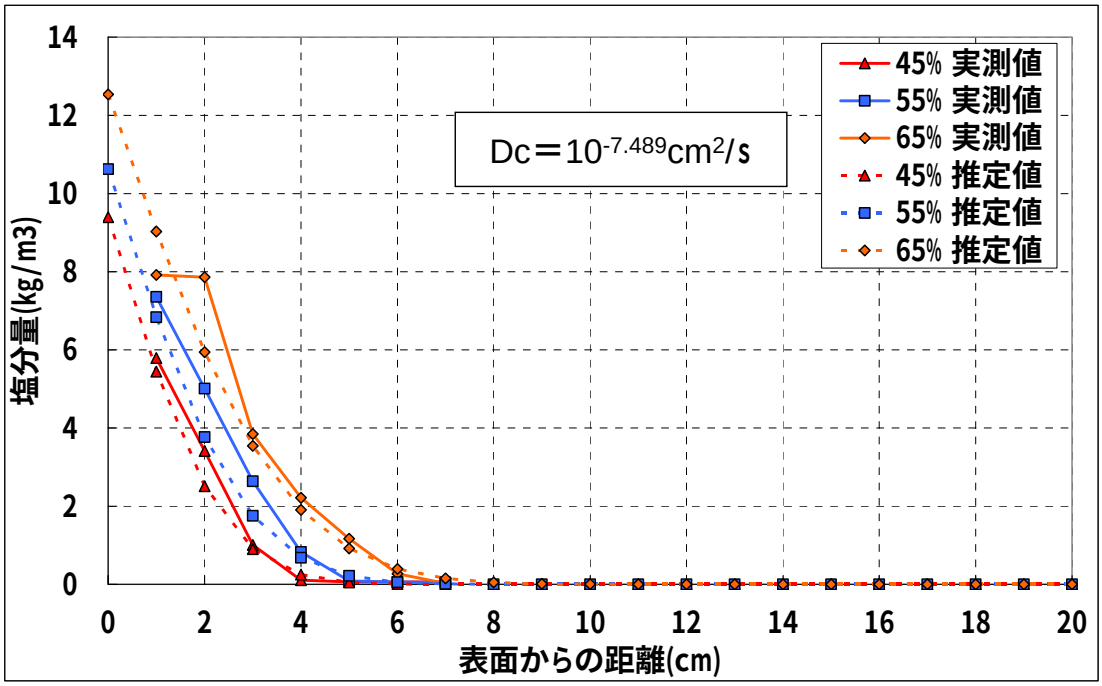


図 6-3-3　フィックの法則による塩分量の推定曲線

6.4　電磁波法の実験データを用いた塩分量推定結果

6.2.2 による推定方法を用いた W/C=45%の推定平均塩分量と実測値を図 6-4-1 に示し，同様に W/C=55%の塩分量推定値と実測値を図 6-4-2 に，W/C=65%を図 6-4-3 に示した。また, 塩分の含有が認められる位置までの推定値と実測値についての比較を図 6-4-4 に示した。

結果・考察

図 6-4-1～6-4-3 における実測塩分量と推定塩分量の比較については，全体的に推定値は実測値を 2 倍～3 倍程度大きくなる結果となった。W/C=45％における鉄板深さ 10cm においては推定値と実測値がかなり近似している。表面からの深さが深いほど電磁波法においては実測値及び，推定値は平均化される距離が長くなるため誤差が小さくなるのではないかと考えられる。同様に W/C=55%においても反射対象物までの距離が長くなるとともに塩分量の推定値と実測値の平均化されたものは近似してくる傾向にあった。先にも述べたが，平均化する距離が長くなれば推定値の精度が向上すると考えられる。かぶりの浅い部分において推定値と実測値の誤差を小さくするためには用いる重回帰式にかぶり深さを考慮する必要があると考えられる。

図 6-4-4 に示すのは推定値と実測値の比較であるが, 推定値と実測値の関係は推定値が実測値の約 2 倍程度の値となった。現段階では，まだ供試体からコアを採取し，取得した実測値のデータが少ないため，今後、実測塩分量のデータを増やしていくことにより，プロット数も増え，今回とは異なった傾向が読み取れることができる可能性が考えられる。これら電磁波法の推定結果において，実測値との誤差が大きくなった要因としては，含水率を実際に測定したわけではなく，水セメント比や外気温，湿度から相対的に算出したものであることや，説明変数の設定項目が少ないことがある。また，比誘電率の大小によっても大きく推定値が変化することからも誤差が生じたのではないかと考えられる。

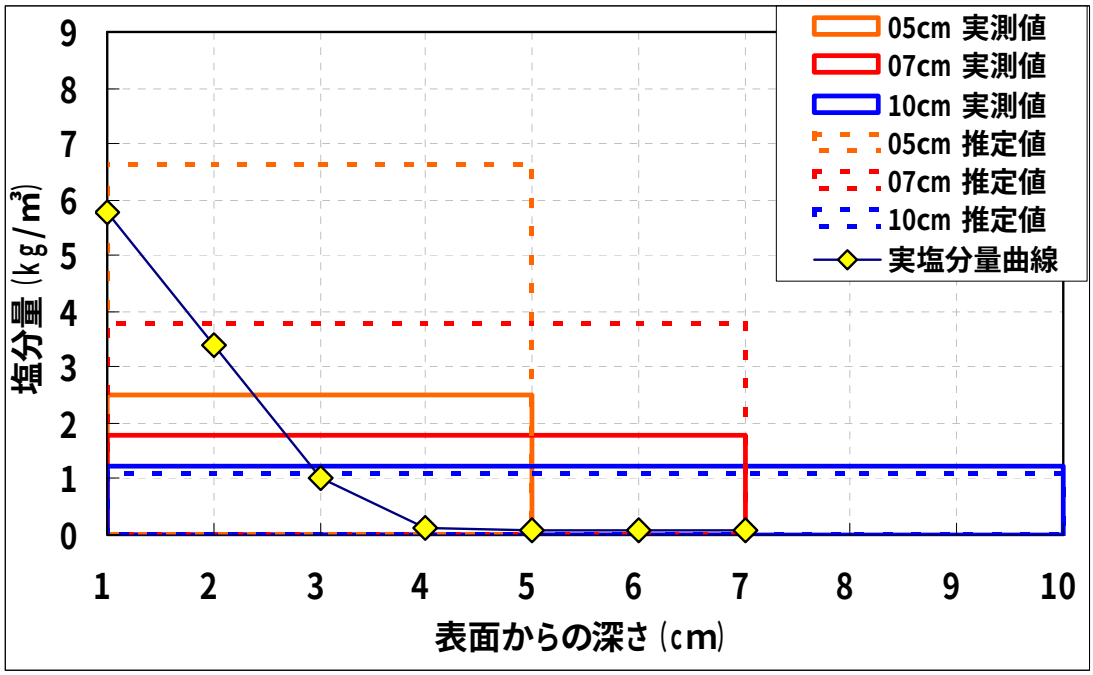


図 6-4-1　W/C＝45%における塩分量比較

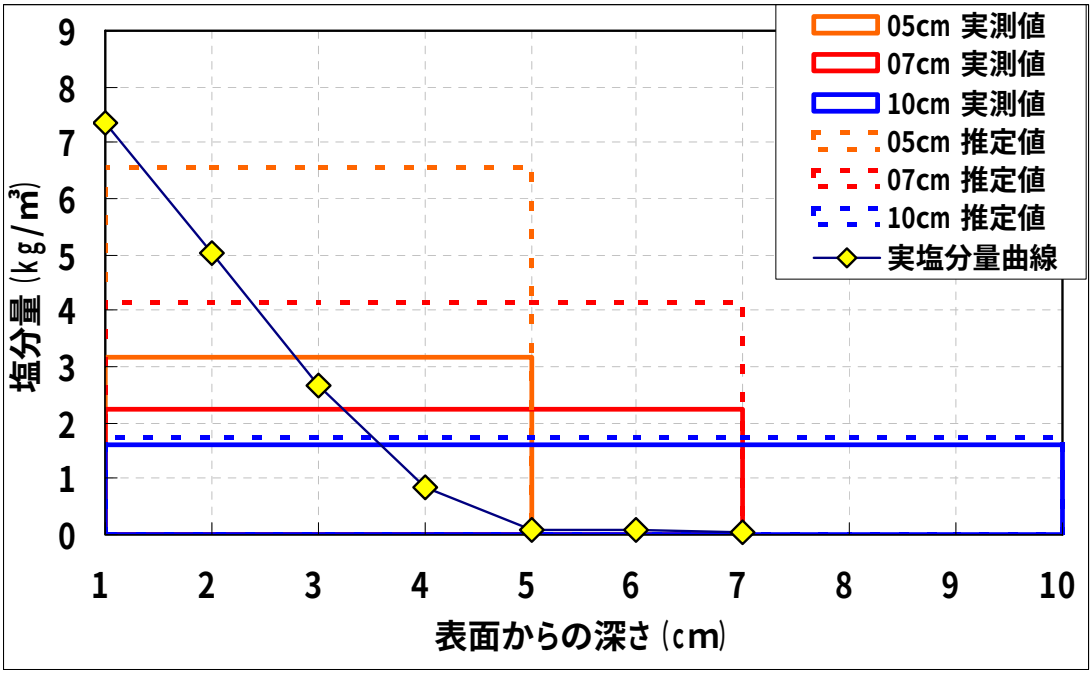


図 6-4-2　W/C＝55%における塩分量比較

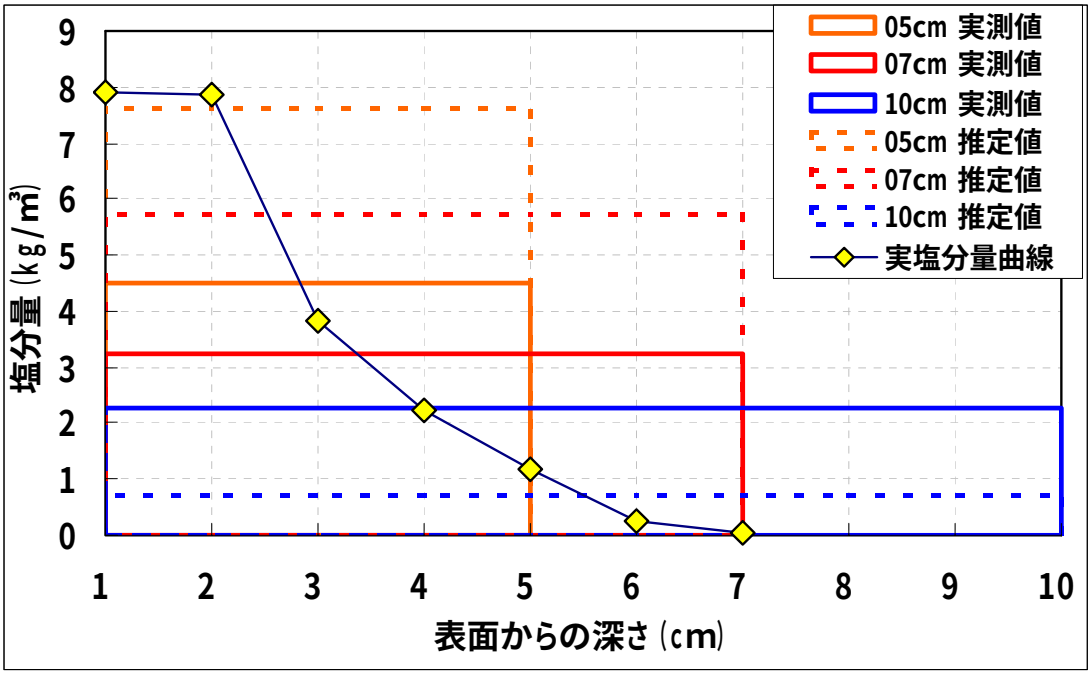


図 6-4-3　W/C＝65%における塩分量比較

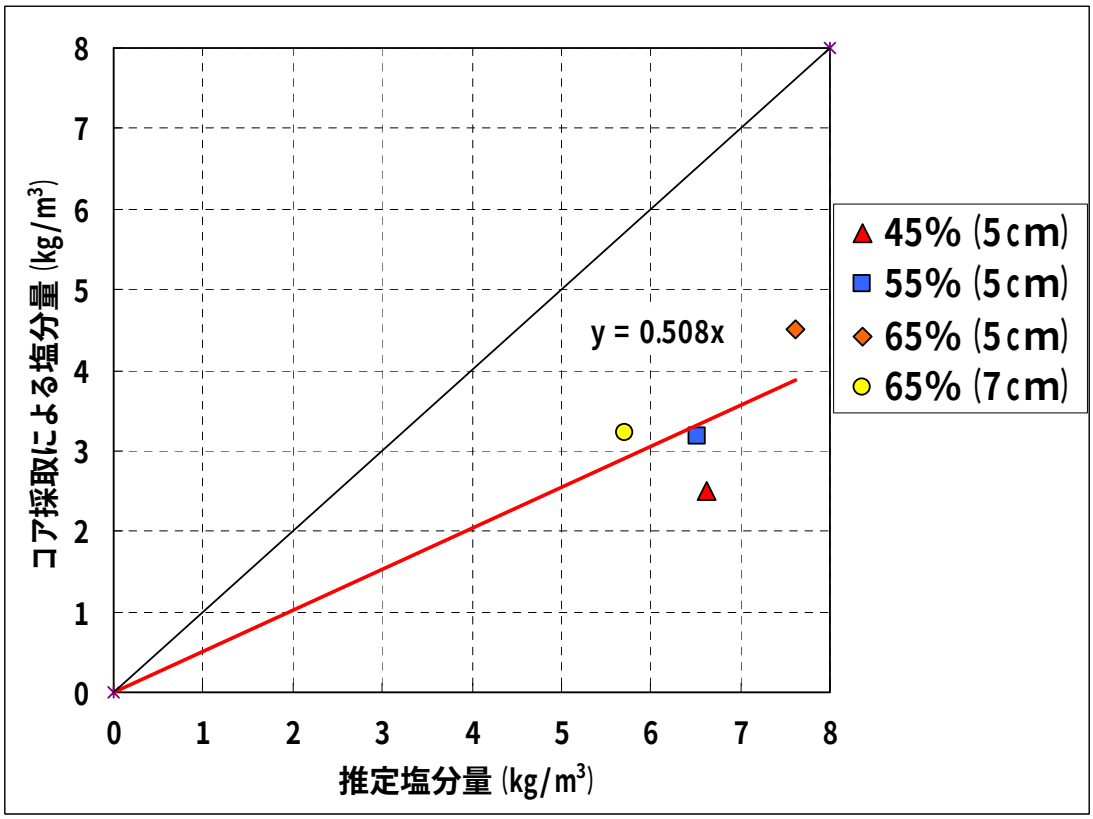


図 6-4-5　推定値と実測値の塩分量比較

6.5　電磁波法及び，インピーダンス法を用いた塩分量の推定曲線

表面塩化物量は 6.2.1 でインピーダンス法から重回帰分析したものを用いる。ここでは 6.4 において電磁波法による対象かぶり深さまでの平均塩化物量が既知であるため，フィックの第２法則の拡散係数を変化させ，電磁波法で推定した平均塩化物量とグラフ上の面積が等しくなるよう推定曲線の作成を行った。その結果及び，各々に用いた塩化物イオンの拡散係数 Dc(cm^2/s)を表 6-5 に示す。そして，W/C=45%の推定塩分曲線と実測値を図 6-5-1 に示し，同様に W/C=55%の結果を図 6-5-2 に，W/C=65%を図 6-5-3 に示す。

<u>結果・考察</u>

図 6-5-1 について実際にコア試料を採取したデータによると, 前にも記述したように表面からの深さ 5cm の位置までしか入っていないため，5cm の推定値との比較をしてみると実測値の約 2 倍程度の値を示す結果となった。電磁波法での推定が 2 倍程度あったため，結果に影響したと考えられる。若干値は小さく推定されたが 10cm での推定が実測値に近い塩分曲線を示す結果となった。

図 6-5-2 についても図 6-5-1 と同様に実際に塩分量の含まれていたのは表面から 5cm の辺りであったため 5cm での推定と比較すると, W/C=45%よりも誤差は小さくなってはいるが，10cm での推定塩分曲線の方が比較的実測値と近似している結果となった。

図 6-5-3 については実際に塩分量が含まれていたのは表面から 7cm の位置であったので 7cm の推定値と比較すると W/C=45,55%よりも推定塩分曲線は実測値に近似する結果となった。10cm での推定塩分曲線が急激に低下しているのは，電磁波法での推定が実測値よりも 3 倍程度小さくなったためであると考えられる。

推定される塩分曲線は水セメント比が大きくなるにつれて実測値に近似するといった結果を得ることができた。この結果は，水セメント比が大きくなるにつれて電磁波法から推定される塩化物量の精度が高くなると考えられる。また，これらの結果から，電磁波法により平均化された推定塩分量についてフィックの第 2 法則を適用することが有効であると考えられる。また，電磁波法及びインピーダンス法から推定される塩化物量の測定精度が向上することで，この推定される塩分曲線も実測値とより近似した値を描くと考えられる。

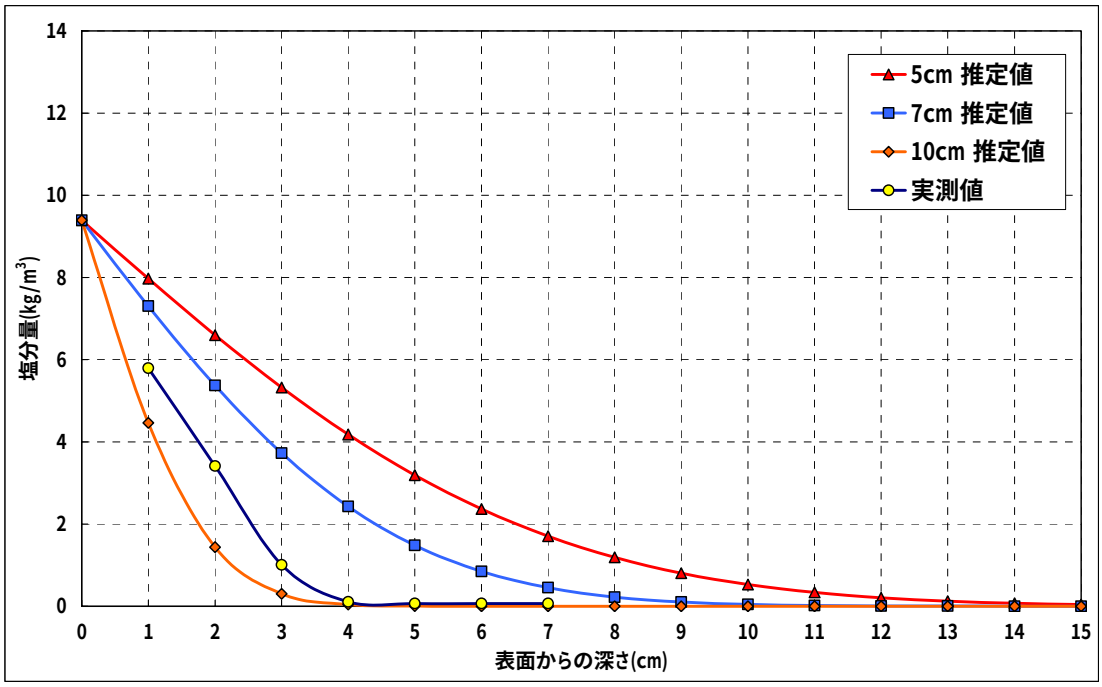


図 6-5-1　W/C=45%における推定塩分量曲線の比較

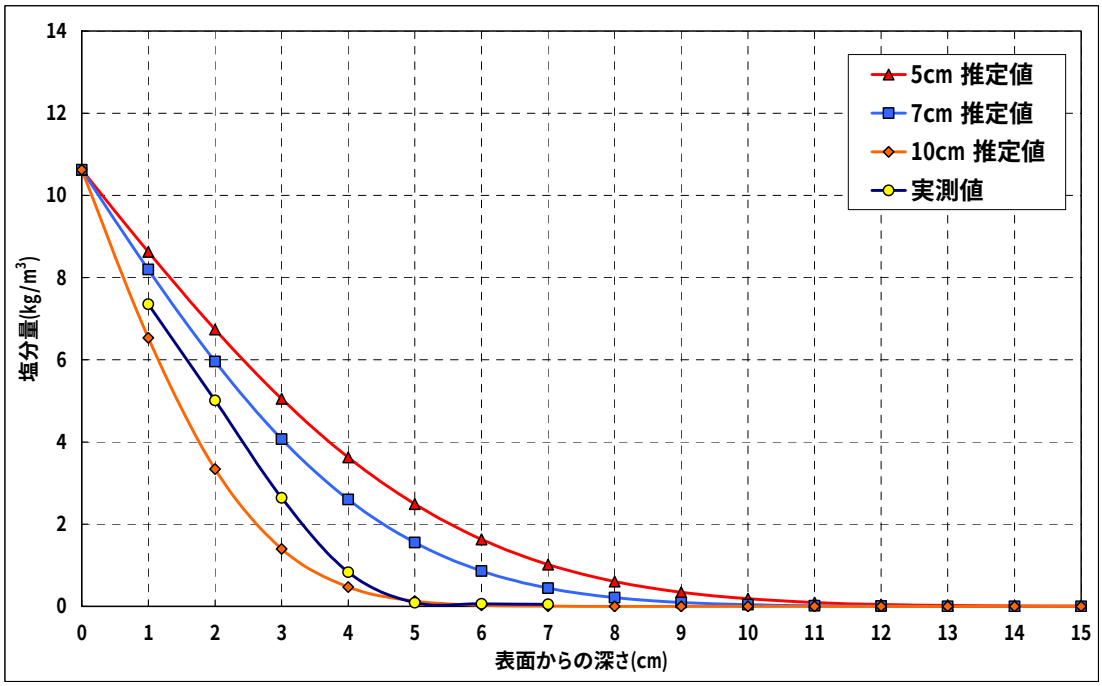


図 6-5-2　W/C=55%における推定塩分量曲線の比較

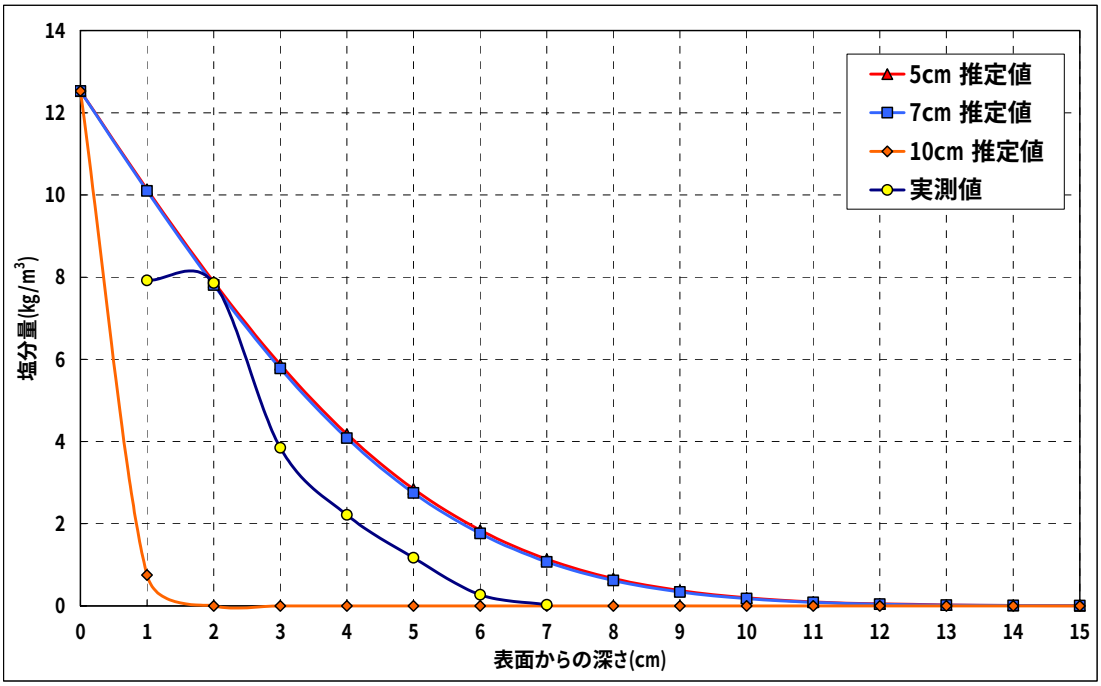


図 6-5-3　W/C=65%における推定塩分量曲線の比較

第７章　実構造物での実験結果

7.1　目的

コンクリート内部の塩分量を把握するためには，一般にコア試料を採取して分析する必要がある。この場合，同一部位での塩分量を経時的に測定することは難しく，コア試料を採取した箇所が脆弱部となってしまう。そこで，室内実験及び，実構造物調査を実施し，測定精度の向上を図るためにより多くの実構造物データを取得し，塩分量の推定値を実測値とキャリブレーションしていく必要がある。

7.2　実施場所及び，実施条件

（１）実施日時　2006 年 3 月 28 日
　　2006 年 7 月 18 日

（２）外気温　10.8℃（2006.3.28）
　　21.0℃（2006.7.18）

（３）湿度　56%（2006.3.28）
　　89%（2006.7.18）

（４）実施場所
　　知多埠頭桟橋（愛知県）
　　測定範囲は図 7-2 に示す３m×４m程度の範囲

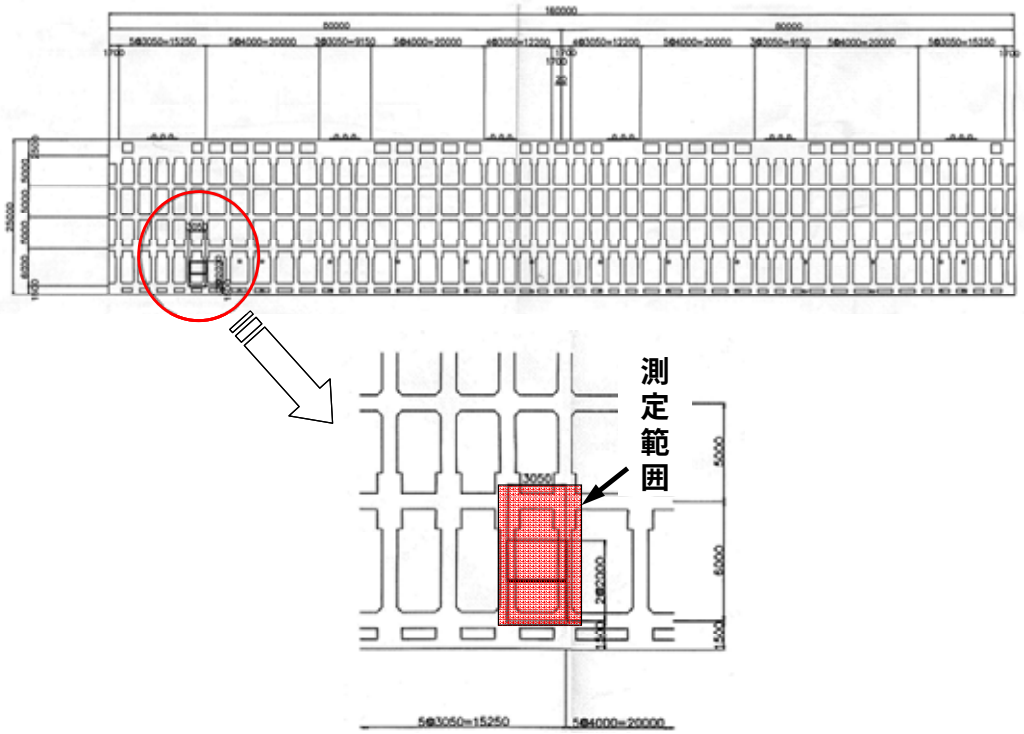


図 7-2　測定範囲位置

7.3　試験方法

床板内に走査測線をチョークで描き，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，基準点を設定し，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。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。

写真 7-3-1　走査状況

写真 7-3-2　走査測線

7.4　実施箇所における塩分量分布の推定

塩分量の推定には，コア試料の採取位置での鉄板かぶり厚が 122mmであり，説明変数にコンクリートの比誘電率と含水率，振幅値，外気温を含んだ 2003 年度に得られた重回帰式 100mm を用いた。以下に用いた重回帰式を示す。

・ 鉄筋かぶり厚 50mm

$$C_c = 0.146 \times \varepsilon - 0.068 \times \alpha - 0.248 \times T + 0.779 \times \mu + 6.241$$

・ 鉄筋かぶり厚 70mm

$$C_c = 0.314 \times \varepsilon - 0.089 \times \alpha - 0.273 \times T - 0.086 \times \mu + 7.015$$

・ 鉄筋かぶり厚 100mm

$$C_c = -0.602 \times \varepsilon - 0.240 \times \alpha - 0.116 \times T - 1.382 \times \mu + 25.271$$

ここで，Cc は塩化物量（kg/m^3），T は外気温（℃），μはコンクリートの含水率（%），εは比誘電率，αは出力波形において着目している波形の振幅値である。また，μについては W/C４５%，測定日の湿度により相対含水率を算出したものである。

重回帰式 100mm のものを用い，2006 年 3 月 28 日の推定塩分量の平面分布を図 7-4-1 に示し，平面分布と現場の写真を合成したものを図 7-4-2 に，推定塩分量の分布を 3D 化したものを図 7-4-3 に示した。同様に 2006 年 7 月 18 日に測定した結果について図 7-4-4～図 7-4-6 に示す。なお，2006 年 7 月 18 日は，前回測定時との間で補修工事が行われている。

実構造物において距離測定機能を利用し，走査し，解析を行うことで図 7-4-1～7-4-6 のように面的な推定分布を作成することができる。従来ではコア試料を採取し分析するといった，点的な測定しかできず，同一箇所における経時的な変化を把握することは困難である。また，コア試料を採取した箇所においては脆弱部分となってしまい，構造物の劣化に影響を及ぼすといったことが考えられる。図 7-4-2，7-4-5 のような測定範囲の写真と塩分量の平面分布を合わせることで視覚的に塩分量分布を分かりやすく把握することができる。測定範囲では上部からとうもろこしや，鳥の糞などの落下により，コンクリートが酸化され，かなり劣化しているところがはっきりしている状況であり，図 7-4-2 の右中央辺りの最も塩分量が高く，青色の濃くなっているところも視覚化できている。また，図 7-4-3，7-4-6 に示す 3D 分布により，より視覚的に塩分量を把握することが可能である。全体的に，私が測定した実構造物はコンクリート打ち込みから 30 年程度以上経過しており，塩分量もかなり浸漬しており，直接海水に触れていない飛沫帯であるのにも関わらず 10kg/m^3 程度の塩分量が含んでいると推定された。図 7-4-4～7-4-6 に関しては，本来は補修工事をしたばかりであるので，実際の塩分量に関してはほぼ 0 kg/m^3 に近い状態である。推定した分布においてもほぼ塩分量は近い値を示しており，実構造物の推定分布は実際の塩分量分布に近い値で視覚化できているのではないかと考えられる。

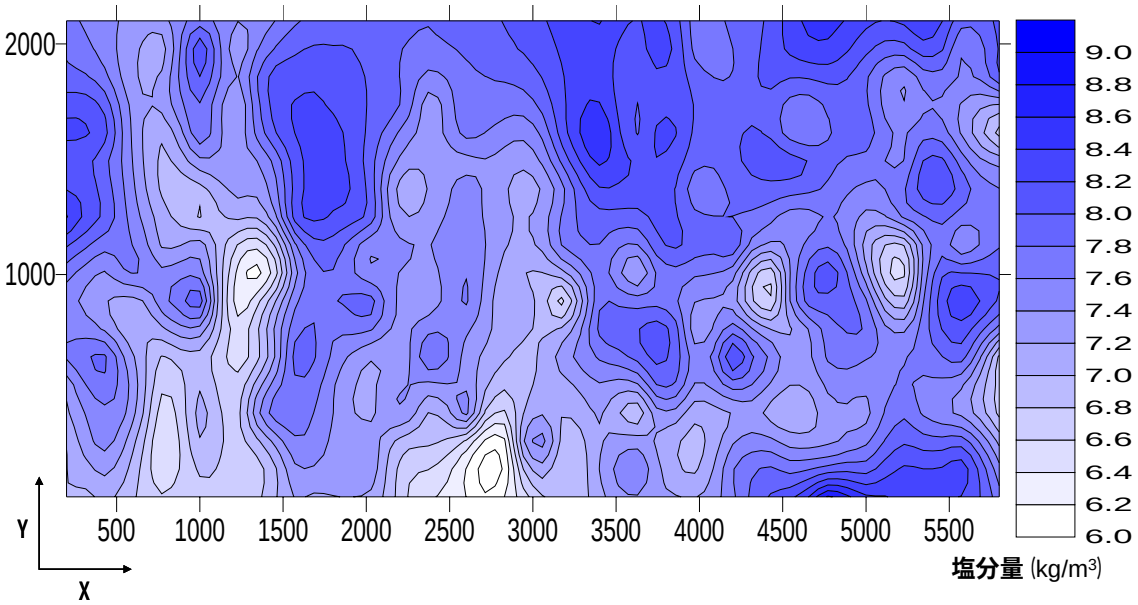


図 7-4-1　塩分量の平面分布

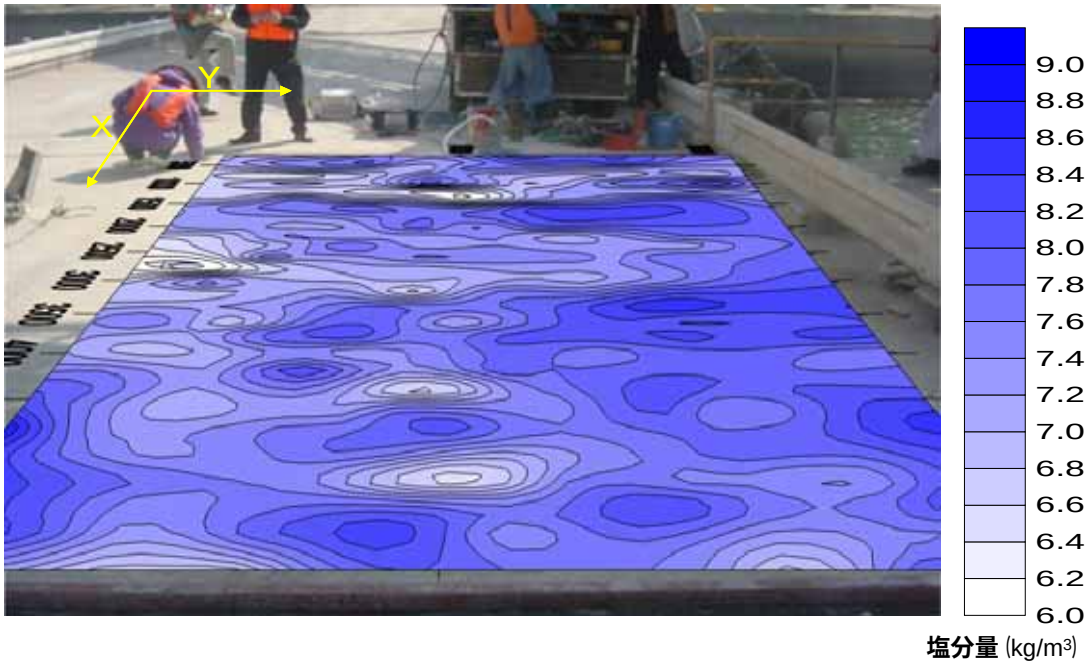


図 7-4-2　平面分布図と測定範囲（写真）との合成

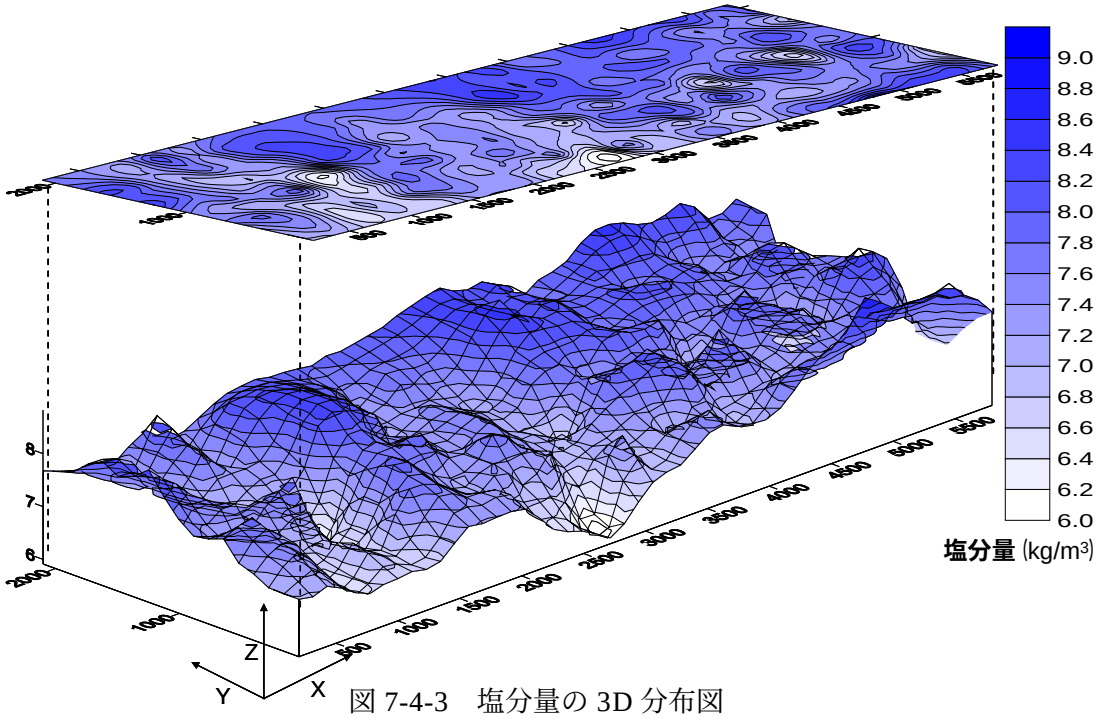


図 7-4-3　塩分量の 3D 分布図

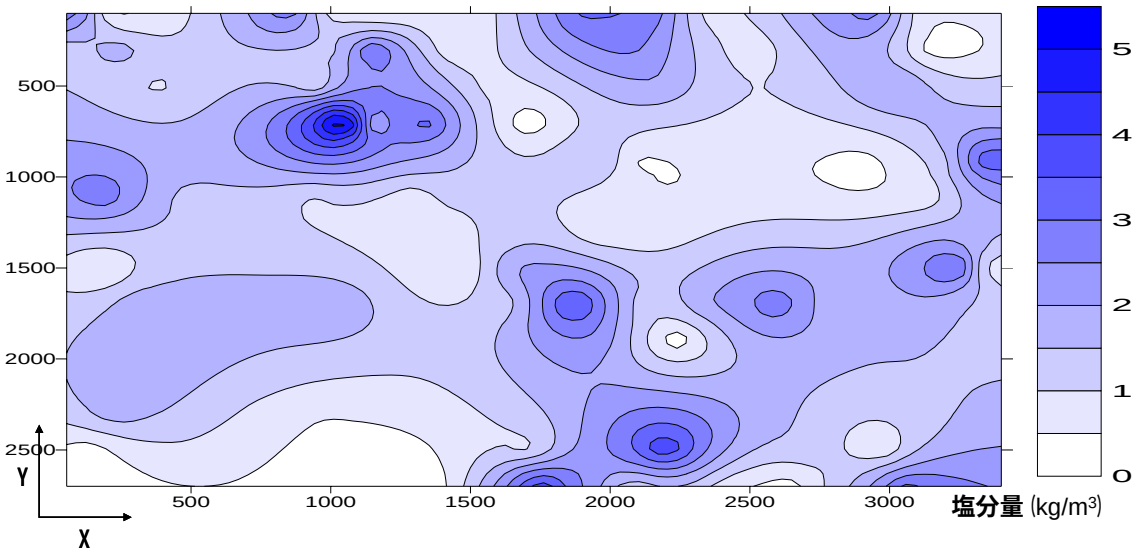


図 7-4-4　塩分量の平面分布

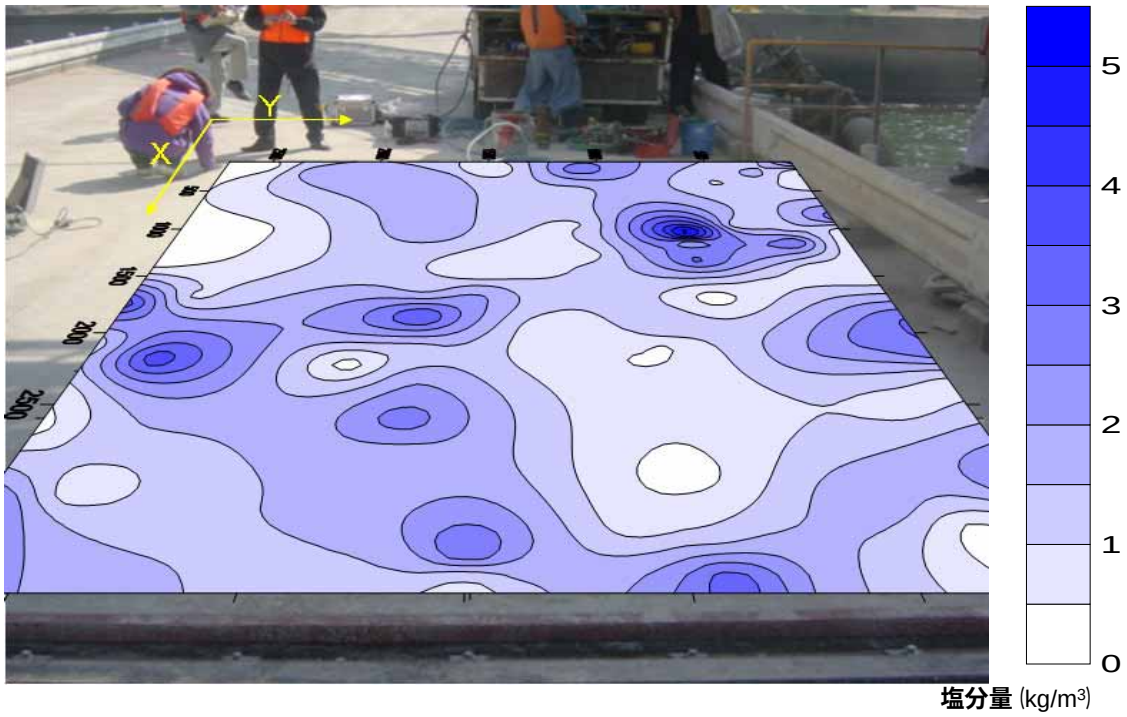


図 7-4-5　平面分布図と測定範囲（写真）との合成

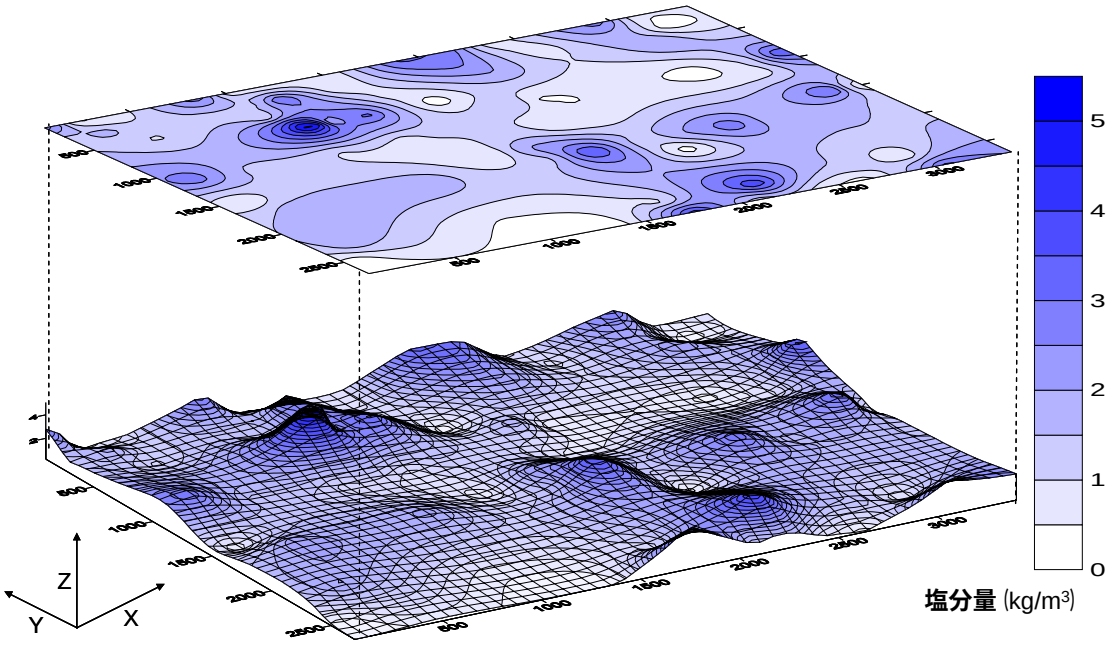


図 7-4-6　塩分量の 3D 分布図

7.5　コア試料の採取データによる試験結果

7.5.1　コア試料の採取位置

測定範囲内のコア試料の採取した位置について図 7-5-1 に示し，測定範囲の実際の現場写真とコア試料の採取した位置について写真 7-5 に示す。また，コアのサンプリングは海側から A，B，C，D，E となっている。

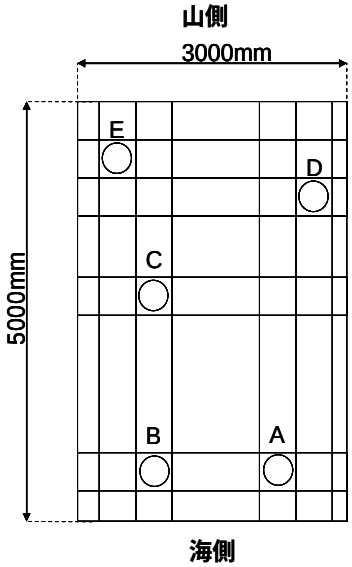


図 7-5-1　コア試料の採取位置

写真 7-5　コア試料の採取位置

図 7-5-1 で示す A～E までのコア試料の採取データの可溶性塩分量を図 7-5-2 に示し，全塩分量を図 7-5-3 に示す。

<u>結果・考察</u>

図 7-5-2，7-5-3 であるが，電磁波法では塩化物イオン量を測っており可溶性塩分量に注目すると，表面からの深さごとの塩分量の違いが顕著にでていた。コア試料の採取位置により塩分量に差が生じたのはおそらく，A，B は海水に近いコンクリート部分であるためだと考えられる。また，D においては先に述べたコンクリート劣化部に近い箇所であり，海水の溜まりやすくなっている状況であったためであると考えられる。また，室内実験の供試体より採取したコアのデータと表面からの深さ 10mm の近くでは同程度の値であったが，実構造物のほうは勾配が緩やかであり，ゆっくりと塩分が浸漬していったのだと考えられる。

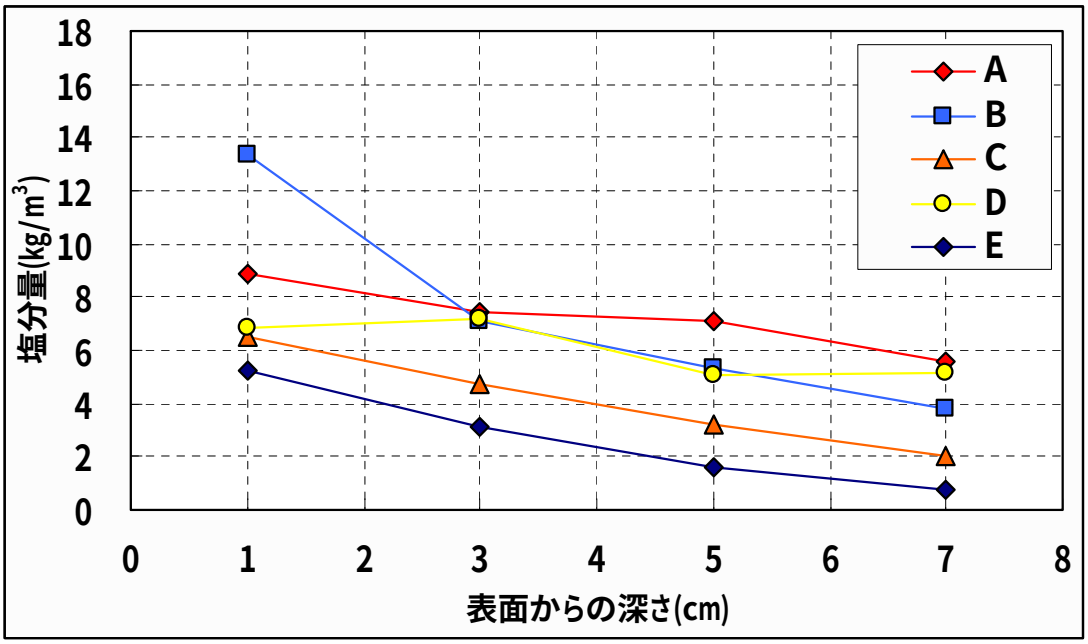


図 7-5-2　表面からの深さの違いによる可溶性塩分量

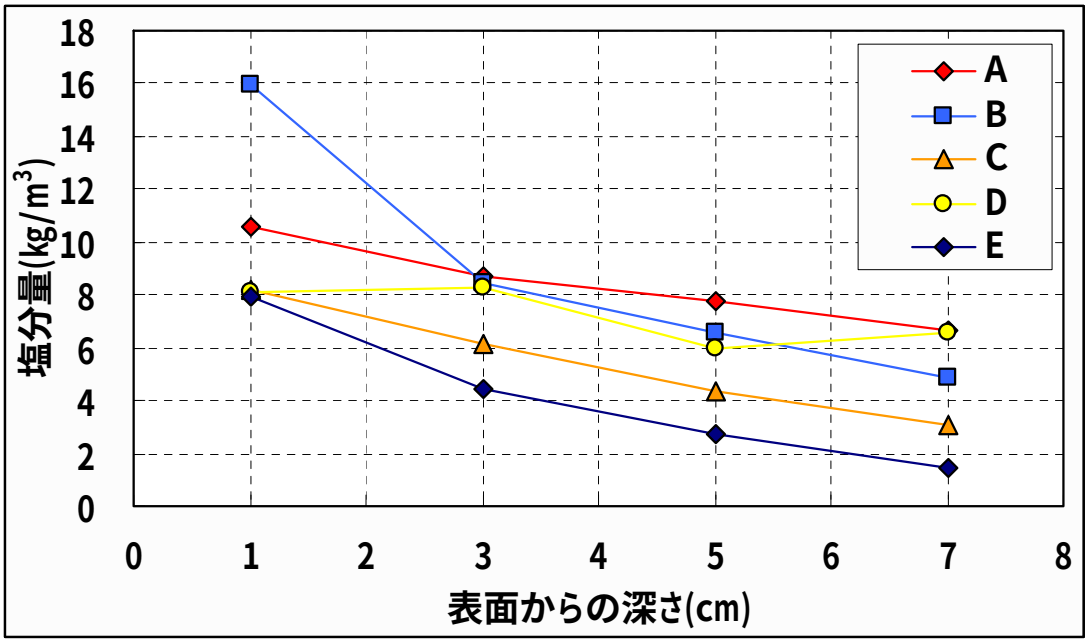


図 7-5-3　表面からの深さの違いによる全塩分量

7.6　推定値と実測値の比較

コア試料による塩分量が表面からの深さ 70mm までのものしかないため，表面からの深さ 50mm と 70mm における推定値と実測値の比較をいった。また，コアを採取したのは 2006 年 3 月 28 日であり，後日行われた 7 月 18 日の塩分量はほぼ 0kg/m^3 に近いものであると考えられる。

かぶり 50mm での塩分量の推定値と実測値の比較を図 7-6-1 に示し，かぶり 70mm での塩分量推定値と実測値の比較を図 7-6-2 に示す。また，比較し平均値による補正を行ったものと，補正前の推定塩分量の平面分布を図 7-6-3 に示し，同様に推定塩分量の 3D 化したものを図 7-6-4 に示す。

<u>結果・考察</u>

図 7-6-1，7-6-2 について，表面からの深さ 50mm においては全体的に推定値のほうが大きくでるという傾向があった。コア試料を採取した位置による誤差も考えられるが，最大で 5kg/m^3 程度の誤差が生じた。表面からの深さ 70mm においては 50mm ほど誤差も大きくなく，どちらかに大きく偏るといったこともなく，平均的にみると塩分量推定値と実測値との誤差は少なくなる結果となった。電磁波法はかぶり厚までの平均塩分量を推定するものであるため，表面からの距離が長くなり，平均化される距離も長くなるため誤差も表面からの距離が長くなるにつれ小さくなっていくと考えられる。

図 7-6-3，7-6-4 は誤差を補正したものとの比較であるが，コア試料を採取せずに推定塩分量と実測値との誤差をできるだけ少なくするためには，実構造物での測定データを多く取得し，どれくらいの補正が必要なのかということ，また，その補正値が一定でない場合は新たな説明変数を重回帰式に加えることが必要であると考えられる。

また，電磁波による測定において鉄板の腐食が進んでおり反射波の得られない箇所や，中性化などの影響によりコンクリートかぶり部分が浮いていたりすると電磁波による反射波が受信できないといった条件がでてくるため，どのように今後測定するかは課題となってくる。

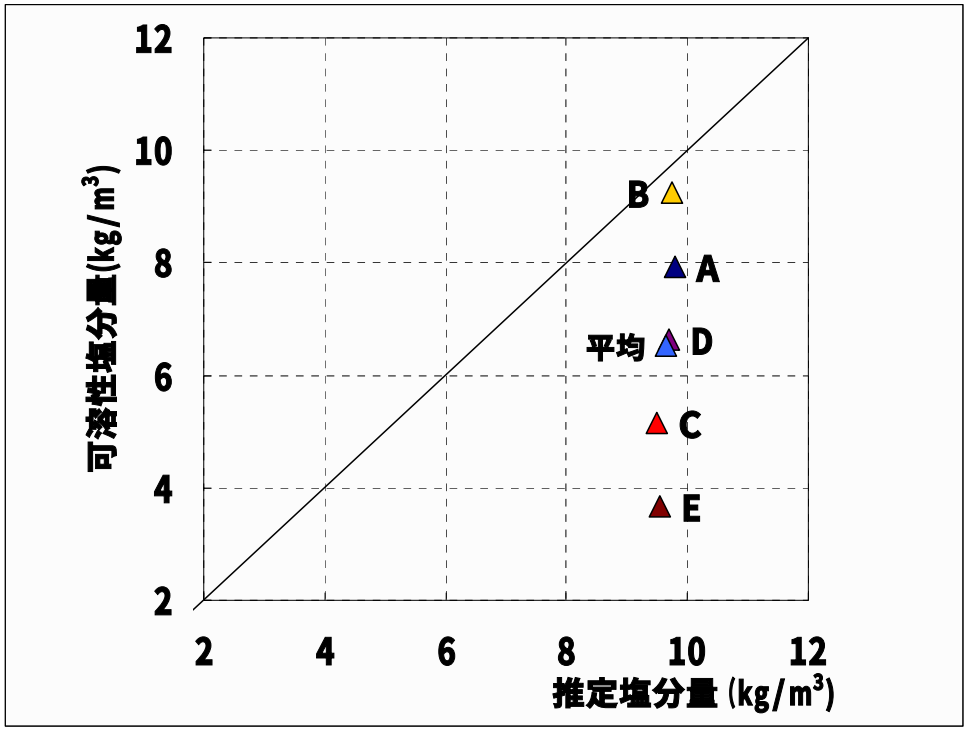


図 7-6-1　表面深さ 50mm での推定値と実測値との比較

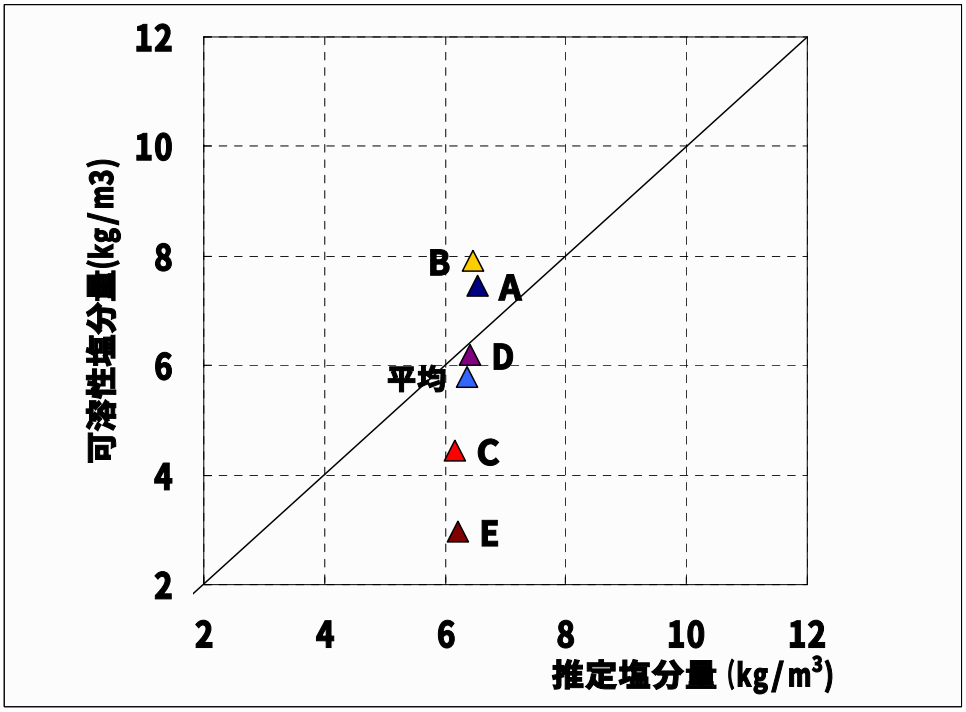
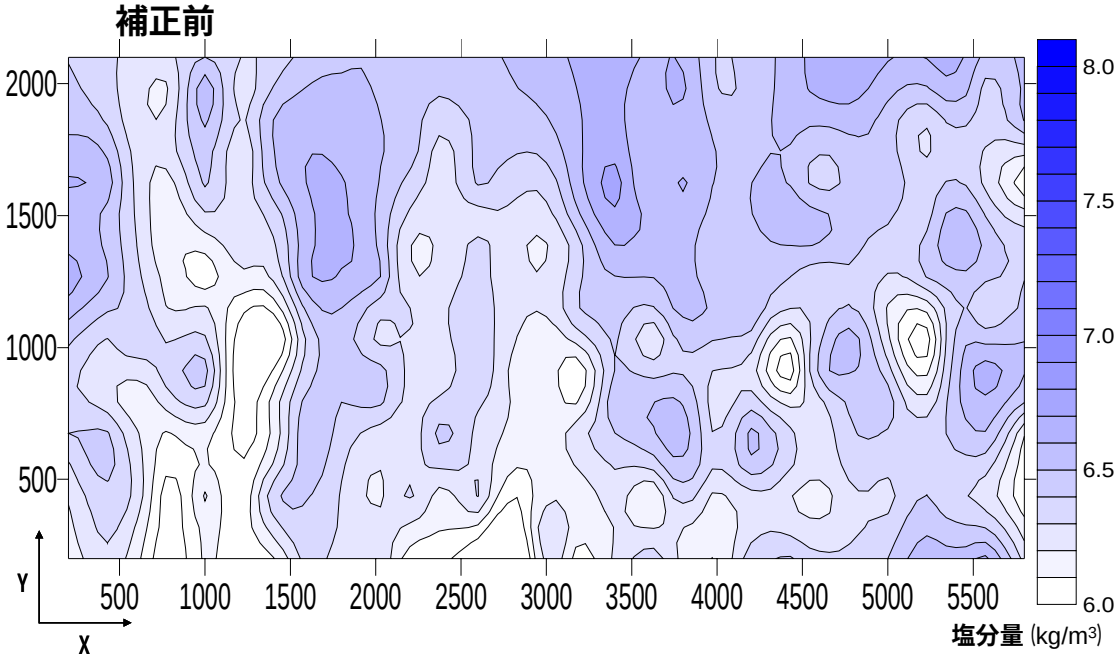


図 7-6-2　表面深さ 70mm での推定値と実測値との比較



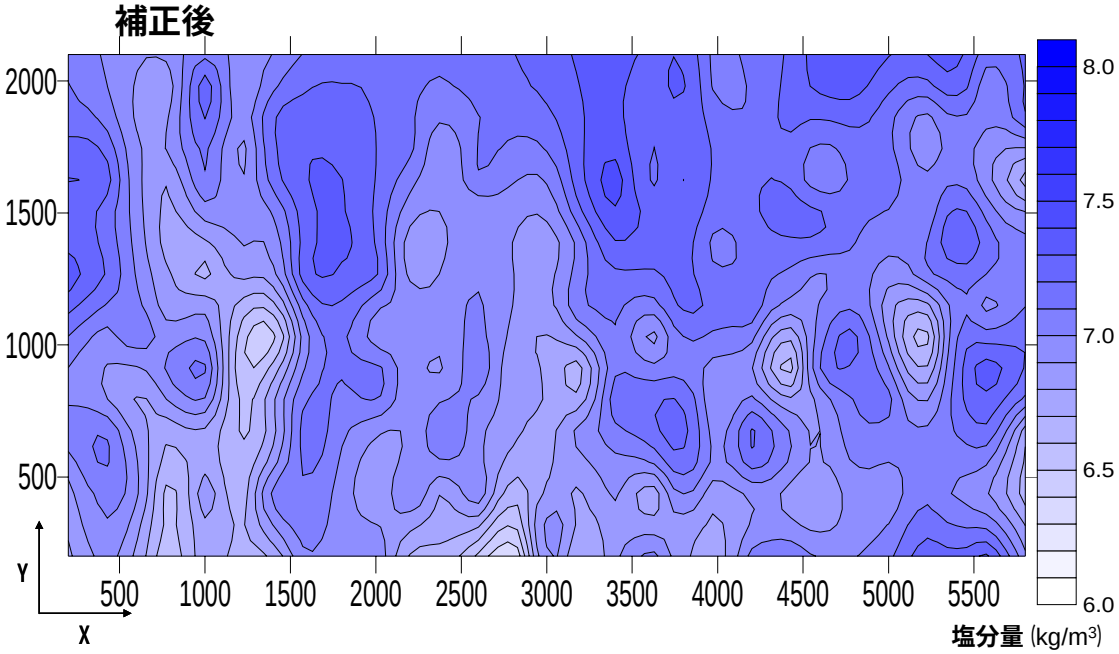


図 7-6-3　平面分布における推定値と実測値との比較（70mm）

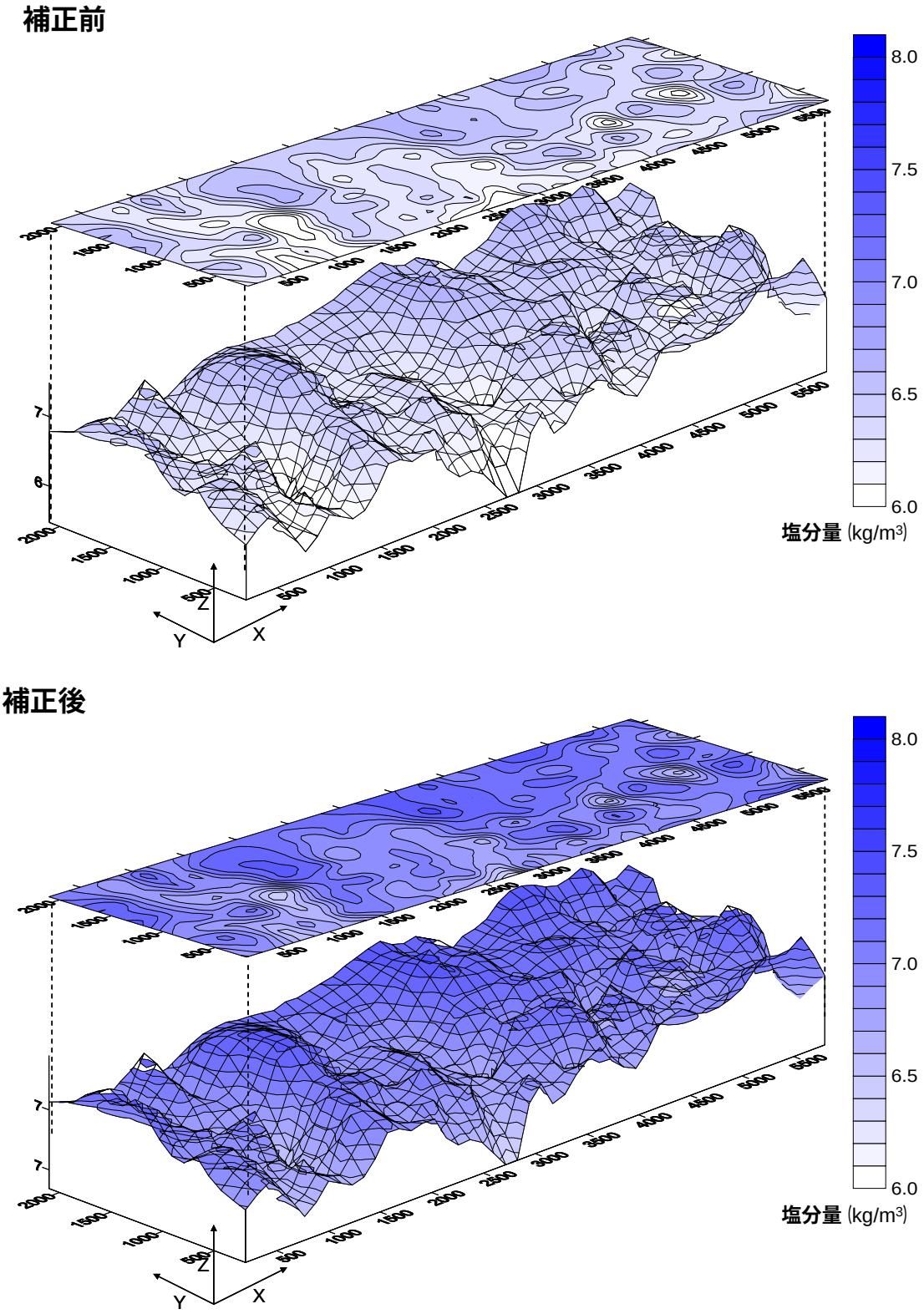


図 7-6-4　3D 分布における推定値と実測値との比較（70mm ）

第8章　結論

8.1　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。

電磁波法の結果

(1)　鉄板かぶり深さ

振幅値は，時間の経過とともに増加傾向であったが，徐々に増加量も小さくなり収束していく傾向にあった。測定が可能な塩分量に限界があるのではないかと考えられる。また，鉄板のかぶり深さの影響が大きく，かぶりが深くなるとともに振幅値は小さくなることが明らかになった。

比誘電率については，大きな経時変化はみられなかった。コンクリート内部の含水状態などの影響がほとんどないと考えられる。しかし，振幅値と同様にかぶりが深くなるとともに比誘電率は小さくなることが明らかになった。コンクリート上部での含水量が同程度であるとすると，測定対象距離の増加に伴い体積水分率が減少するためであると考えられる。

(2)　スランプ

振幅値の変化については，若干ではあるがスランプが大きくなるとともに振幅値が小さくなる傾向にあった。

比誘電率については，ほとんど変化はなく，スランプによる影響はないと言える。

(3)　水セメント比

振幅値は，水セメント比が大きくなるとともに小さくなることが明らかになった。既往の研究と同様に単位セメント量が影響しているのであると考えられる。つまり，単位セメント量の増加に伴い，振幅値も増加傾向にある。

比誘電率については水セメント比の影響はほとんどなく，同程度の値を示す結果となった。

(4)　塩水と真水

振幅値については，塩水を浸漬させたものは真水を浸漬させたものより小さくでることが明らかになった。塩化物イオンの影響が顕著にみられる結果を示した。

比誘電率については，振幅値と異なり，大きな差異がみられず，塩化物イオンの影響をほとんど受けないことが明らかとなった。

インピーダンス法の結果

(5)　埋設される銀電極のかぶり深さ

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。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。

(6)　スランプ

スランプの大きさによる最大実効値の変化はみられなかった。

(7)　水セメント比

水セメント比が大きくなるとともに, 最大実効値は小さくなる傾向にあった。これより，実効値は水セメント比による影響を受けていることが明らかになった。また，時間の経過とともに最大実効値は減少傾向にあり，塩化物イオンの影響を受けているのではないかと考えられる。

(8)　塩水と真水

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。このことからも、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。また，(5)～(8) 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。

(9)　電磁波法及び，インピーダンス法による推定

推定した塩分量については，表面から深くなるとともに実測値との誤差が大きく生じる結果となった。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（$Dc=10^{-8}cm^2/s$）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。電磁波法においては，かぶりが深くなるとともに精度が上がっていたため対象かぶり深さまでの推定についての重回帰式について設定し直す必要があると考えられる。しかしながら，多少ばらついた実験データからでも推定塩分曲線を描くことが可能であった。

(10)　実構造物への適用

実構造物において，同一の測定範囲の測定を行ったが，2003 年度に得られた重回帰式ではかぶり 10cm 以上になると適用が困難であり, 実測値と誤差が生じてしまう結果となった。また，等しいかぶり深さでは推定値のほうが実測値よりも塩分濃度が高くでてしまう傾向にあった。(9)でも述べたが，重回帰式に用いる説明変数についてかぶり深さを考慮したものを取り入れるべきではないかと考えられる。しかしながら，塩分量の分布図は視覚的にも把握しやすく，測定や解析自体について測定者の特別な技術は必要ないため，精度がよ

く，本手法においてはっきりとしたシステムが確立されたときは有益なものとなると考えられる。そのためには，やはり実構造物においても室内実験とどうようにさまざまな箇所を経時的に測定していく必要があると考えられる。

(11)　今後の課題

インピーダンス法について得られる実効値のばらつきが大きすぎることに関して改善が必要不可欠である。まず，接続クリップの接続方法や，コードのたるみによる変化，表面測定のアタッチメントについて簡易的なものであったため測定最中はできるだけ空気にふれないように工夫すること，コンクリート表面状態はできるだけ一定になるように表面水分をふき取ってから一日乾燥が必要であるのではないかなど細かいことが考えられる。

電磁波法においては，アンテナ台車の置く位置を毎回同一になるよう印をする必要があるとともに，インピーダンス法同様に表面状態を同一にする必要があると考えられる。

今後の研究の継続，改善によって、両非破壊試験方法を組み合わせて行うことによって塩化物量推定は可能であると考えられる。

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.549-557，2000 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　PartⅡ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

本研究を行うにあたり，終始御懇意なる御指導を賜りました溝渕　利明教授に厚く御礼申し上げます。また，実験にあたり御指導頂きました満木　泰郎教授，山添　量文氏に御礼申し上げます。

実験にあたり，御協力を賜りましたリテックエンジニアリング株式会社の新井　淳一氏，コマツエンジニアリング株式会社の吉村　明彦氏，青木　定治氏，鹿島建設株式会社の芦澤　良一氏，中国化薬株式会社の新開　一生氏，そして，研究を手伝って頂いた皆様に深く感謝致します。

法政大学大学院　工学研究科　建設工学専攻
05R5106　佐竹　伸康