電気抵抗によるコンクリート中の水分量の時空間分布計測

コンクリート研究室　高畑　友彦
指導教官　下村　匠
丸山　久一

1. はじめに

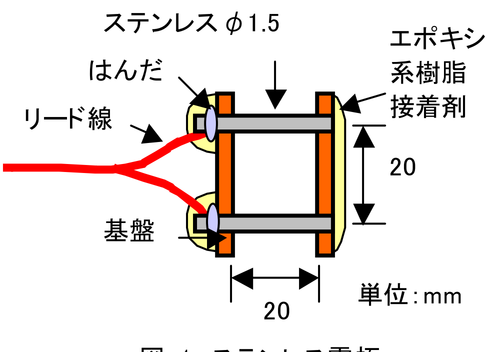
コンクリート構造物は供用される環境条件下のもと，供用期間内において安全性や使用性などの要求性能を満足する必要がある．鉄筋コンクリートでは，水分，塩分，二酸化炭素，酸素などの腐食促進物質がコンクリート中に侵入し，鉄筋が腐食することにより構造物の各種性能が低下することがある．また，水以外の腐食促進物質はそれ自身の濃度拡散だけでなく，水を媒体としてコンクリート内部へ浸透する．したがって，コンクリート中の水分の移動現象を把握することは，あらゆる腐食促進物質の移動を扱う上で重要である．

水分移動現象を把握する方法としては，数値解析による方法と実験による方法がある．本研究室では数値解析による方法が進んでいるが，本研究では実測で水分量を測定することを選択した．水分測定方法として電気抵抗法を採用し，コンクリート中の局所的な水分量と電気抵抗の関係を，乾燥，吸湿，吸水過程において検証を加え，これを基にコンクリート有限供試体中の各位置，各時間における水分量をより一般的にかつ定量的に推定する方法の検討を行い，実際に乾湿繰返しによってコンクリート供試体中の水分量がどのように変動しているかを明らかにし，水分移動メカニズムの解明，水分移動モデルの検証に有効な知見を得ることを目的とした．

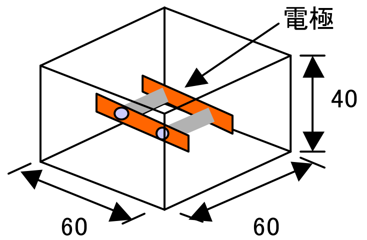
2. キャリブレーション試験

2.1 実験概要

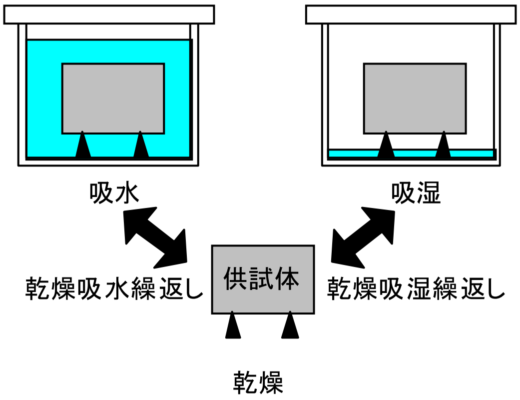
比抵抗から水分量を推定するためのキャリブレーションカーブを作成するキャリブレーション試験を行った．実験で使用する電極の概要を図-1 に，キャリブレーション用供試体の概要を図-2 に，実験環境を図-3 に示す．キャリブレーション用供試体は W/C50%のコンクリートで作成し，水和の影響を極力小さくするため封緘養生 20 日後実験を開始した．実験条件は乾燥吸水繰返し，乾燥吸湿繰返しの 2 種類とし，経時的に供試体重量と電気抵抗を測定した．実験は温度 20℃, 湿度 60%の恒温室にて行っ



図−1　ステンレス電極



図—2　キャリブレーション供試体



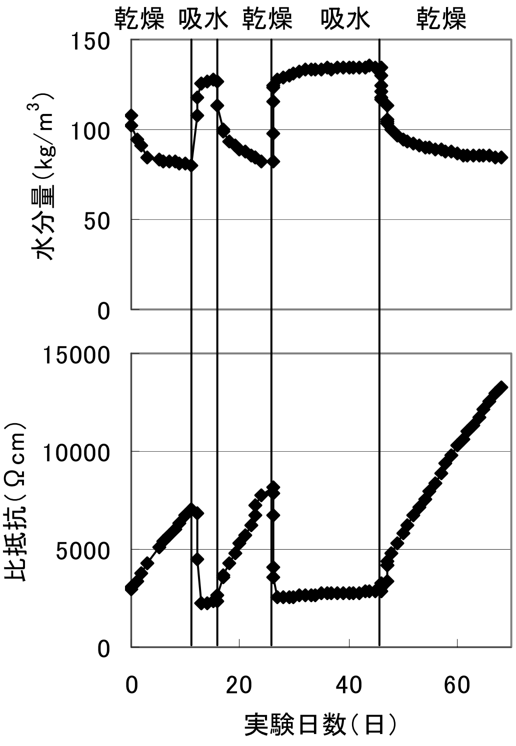
図―3　実験環境

た．水分量は予め絶乾状態の供試体の重量を測定しておき，そこから算出した．電極個体誤差の相殺のため，電気抵抗を比抵抗に換算した．

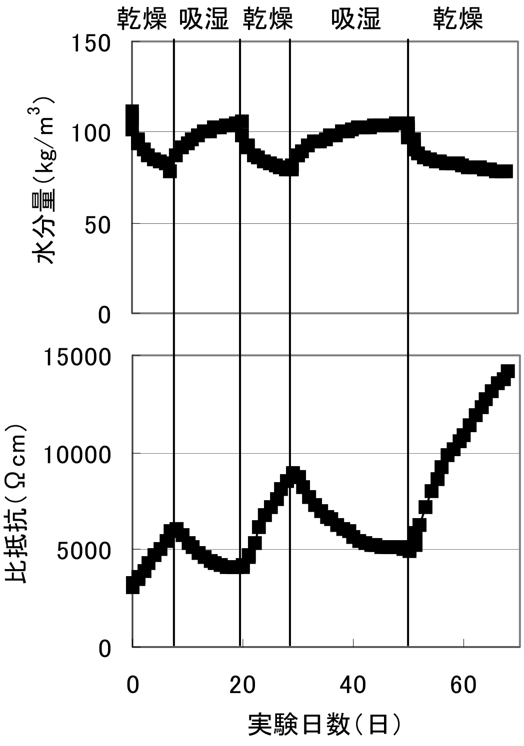
2.2 実験結果

乾燥吸水繰返しの実験結果を図-4 に，乾燥吸湿繰返しの実験結果を図-5 に示す．乾燥吸水繰返しでは，乾燥時には水分量は減少し，比抵抗は増加する．そして，吸水時には水分量は増加し，比抵抗は減少している．また，飽水 100%の状態においても比抵抗は増加している．乾燥吸湿繰返しの吸湿過程では，吸水と比べ，緩やかに水分量は増加し，比抵抗は減少している．

乾燥吸水繰返し，乾燥吸湿繰返しの実験結果から比抵抗と水分量の関係であるキャリブレーションカーブを作成したものをそれぞれ図-6, 図-7 に示す. 乾燥吸水繰返し，乾燥吸湿繰返しのキャリブレーションカーブはともにループを描きつつ，右にシフトしている．乾燥吸湿繰返しのキャリブレーションカーブは乾燥吸水繰返しと比べ，潰れた形のループを描いている．乾燥過程，吸水過程,吸湿過程などから作成されたキャリブレーションカーブは同一線上にはな



図―4　乾燥吸水繰返し実験結果

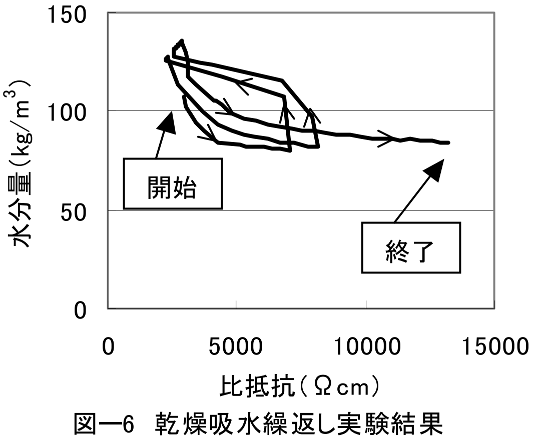


図―5　乾燥吸湿繰返し実験結果

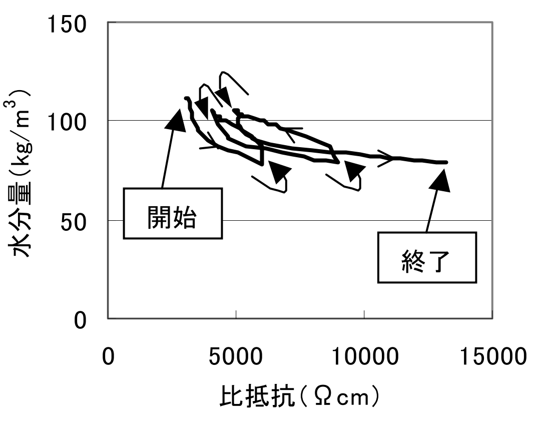
く，履歴性を持たないことがわかる．加えて，同じ乾燥過程の繰返しにおいてもキャリブレーションカーブは同一曲線上には乗らない．

キャリブレーションカーブが右にシフトする原因としては，水和反応の影響とコンクリート供試体の水分分布の影響が考えられる．前者はまずセメントの水和反応によってコンクリートが緻密になっていき，細孔径分布が変化していく．それによってコンクリート内部の電極間の水分量が変化し，それに対応した比抵抗が変化することが考えられる．後者は乾燥過程のキャリブレーションカーブでは，乾燥過程の回数によって同じ水分量時においても比抵抗は異なる．そして，必ず電極間の比抵抗と電極部位での水分量の対応関係が一対一であると仮定すると，同じ水分量時においても一回目の乾燥過程と二回目の乾燥過程では，内部の水分分布が違う．それによって，電極位置における水分量の差異が原因で比抵抗が異なると考えられる．

次に，乾燥過程と吸水過程のキャリブレーションカーブの履歴は同じにならない原因としては，まず乾燥過程では外側のコンクリートが乾燥し，コンクリート内部が外部の乾燥に追随して，水分量が減少する．そして，吸水過程では外側のコンクリートが徐々に水分を吸湿し，内部がそれに追随し，水分量が増加する．つまり，コンクリート供試体全体の平均水分量とコンクリート中の電極間の水分量が違うことにより，履歴が異なると考えられる．



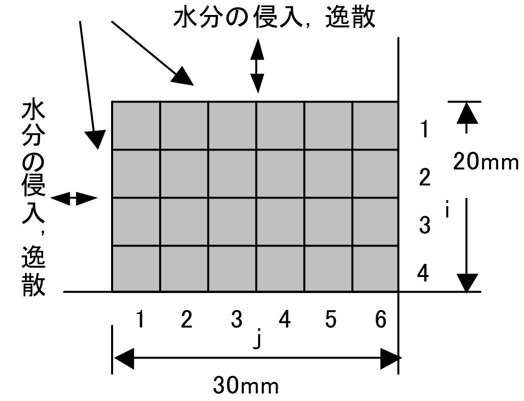
図―6 乾燥吸水繰返し実験結果



図―7 乾燥吸湿繰返し実験結果

3. キャリブレーション試験の解析

キャリブレーション試験の結果から，キャリブレーションカーブはループを描くことがわかり，その原因としては内部の水分分布の影響していることが考えられた．そこで，小林[1)]の開発した水分移動解析プログラムを用い，キャリブレーション用供試



図―8 解析モデル

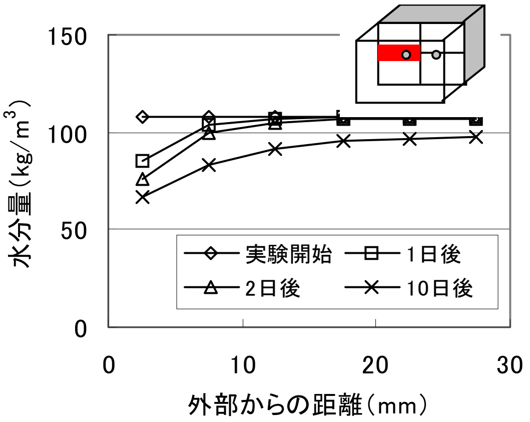
体内部の水分分布を数値解析によって求めた．解析手法などの詳細な説明は小林の研究に記されているので，ここでは省略する．図-8 に水分移動の解析モデルを示す．

供試体中心から外部までの解析結果を図-9，図-10 に示す．乾燥過程において乾燥開始から外側の水分量が非常に減少している．中心での水分量の減少は外側と比べると緩慢である．吸水過程において吸水開始から急激に増加し内部の水分量も乾燥と比べて早く変化していることがわかる．以上の結果から，コンクリート供試体中の水分分布は乾燥過程と給水過程で大きく異なることがわかる．キャリブレーション試験から得られた結果は比抵抗と平均水分量であり，中心水分量ではない．このことから，乾燥吸水繰返しにおいて乾燥経路と吸水経路のキャリブレーションカーブが同じ履歴を通らないことが証明された．

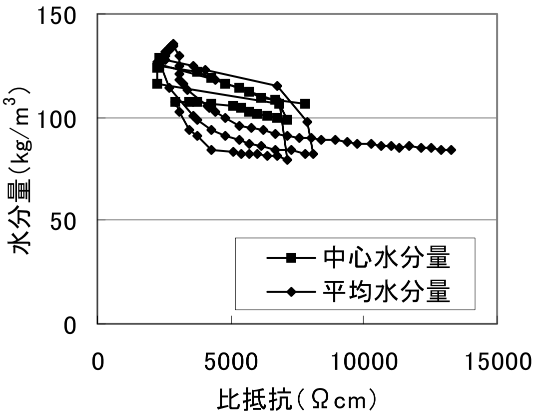
4. キャリブレーションカーブの設定

解析結果から得られた中心水分量，実験から得られた平均水分量と比抵抗の関係を図-11 に示す．実験値が曲線的に変化しているの対して，埋め込まれた電極間の水分量である解析値の中心水分量は直線的に変化していることがわかる．既往の研究で行われているキャリブレーション試験からは局所的な水分量と比抵抗の関係を求めることができない．

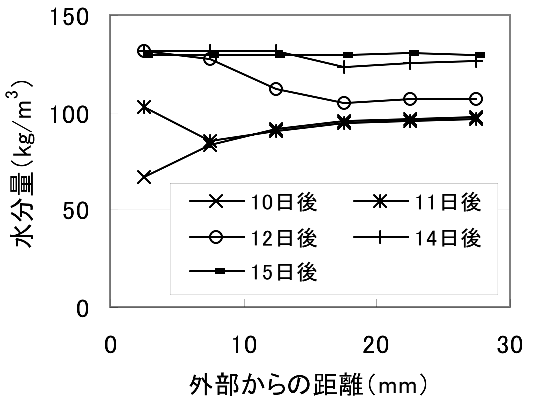
以上の結果から一意的なキャリブレーションカーブを設定する．中心水分量と比抵



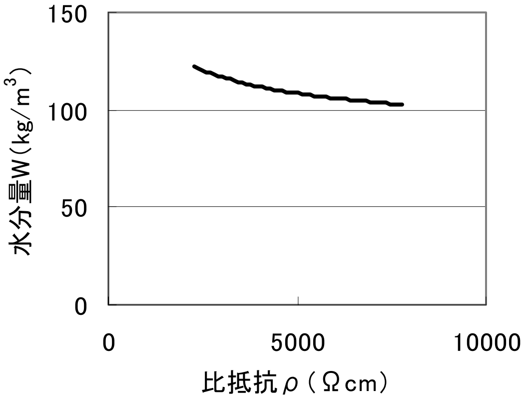
図—9　解析結果(乾燥過程)



図—11　中心水分量と平均水分量の比較



図—10　解析結果(吸水過程)



図—12　キャリブレーションカーブ

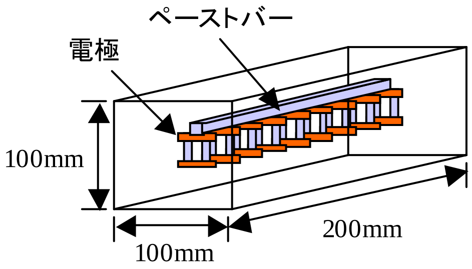
抗の関係から中心水分量の平均を三次曲線で近似させたものを図-12 に示す.

5. 乾湿実験結果の水分推定

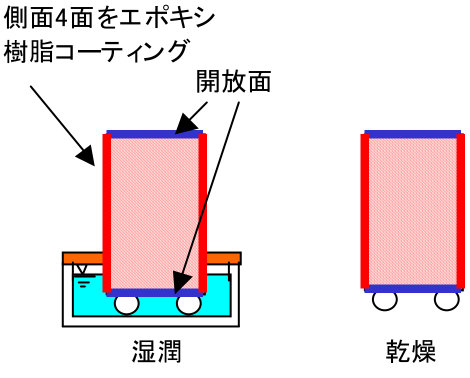
乾湿繰返し実験を行い、コンクリート供試体内部の電気抵抗を測定し，一意的なキャリブレーションカーブから局所的な水分量の増減を電気抵抗法によって表すことができるかを検討する。

5.1 実験概要

供試体概要を図-13 に，実験条件を図-14 に示す．供試体は 100×100×200mm の角柱供試体とし，キャリブレーション用供試体と同様の配合とした．電極も同様のものを使用し，電極の埋め込み間隔は 20mm とした．供試体は打設後 1 日で脱型し 22 日間封緘養生した。供試体は水の出入りを一軸方向の 2 面に限定するため、その他の 4 面に対して 2 液混合型エポキシ系樹脂を用いて、水の出入りを遮断した。乾燥時、供試体は恒温室内（室温 20℃、湿度 60%）に静置して、浸透時は、供試体底部から 20㎜ までを水中（20℃）に沈めた。1 日浸透 6 日乾燥のサイクルで行い，経時的に供試体重量と電気抵抗を測定した.



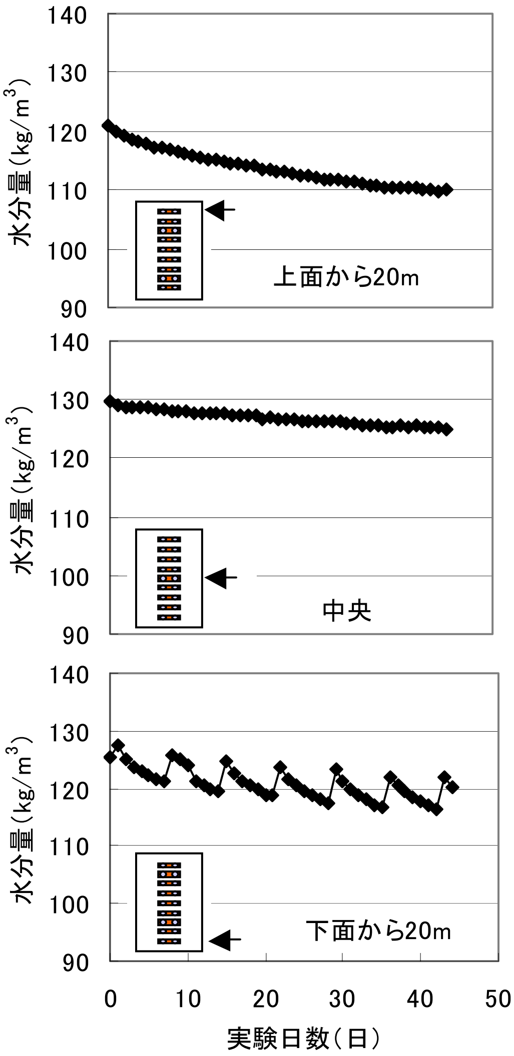
図―13　供試体概要



図―14　実験条件

5.2 実験結果

実験結果から図-12 の一意的なキャリブレーションカーブを使って水分量を推定した結果を図-15 に示す. 推定水分量と供試体重量から求めた平均水分量を比較するため,

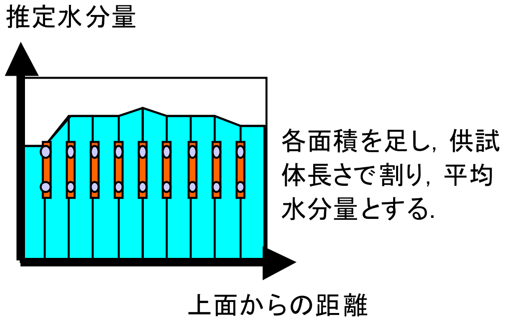


図―15　推定水分量

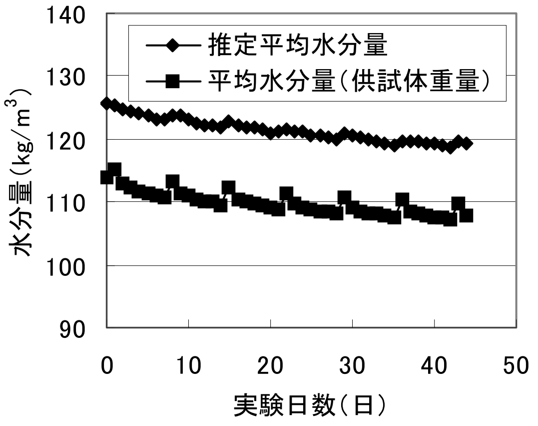
簡易的ではあるが図-16 に示すようにして平均水分量を求めた．推定水分量の平均と実験値を図-17 に示す．開放面の水分量は最も近い測定位置での水分量と同じであると仮定する．

キャリブレーションカーブから推定された水分量は全体的に減少傾向にあり，各部位の水分変化は開放面付近や乾湿の影響をよく表している．推定水分量は平均水分量と比べて 10kg/m³程度多いが，水分減少量はほぼ同じであり，相対的な変化を掴むことには成功している．

以上のことから，今後の課題としてはキャリブレーション供試体と乾湿実験を行った供試体の初期水分量が違うことを明らかにすることと，解析ではなく実験のみでキャリブレーションカーブを作成する方法を考えることなどが挙げられる．



図―16 平均推定水分量の簡易計算



図―17 平均推定水分量と供試体重量から求めた平均水分量の比較

6. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す．

(1) 乾燥吸水繰返し，乾燥吸湿繰返しのキャリブレーション試験から得られたキャリブレーションカーブはループを描く．

(2) キャリブレーションカーブのループの原因は，キャリブレーション供試体中の水分分布の影響である．

(3) 乾燥吸水繰返しの結果から数値解析を用いてキャリブレーションカーブを設定し，乾湿実験を行った供試体中の局所的な水分量の同定に成功した．

(4) 1次元方向の水分分布を経時的に非破壊で推定することができた．

参考文献

1)小林　悟志：コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析，長岡技術科学大学修士論文，2002.2

2) 笠井芳夫・松井勇・湯浅昇・佐藤弘和：小ステンレス電極を用いたコンクリートの含水率測定，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17,No.1, pp.671-6761995

3) 矢田一也・HUSEEIN Nour-Allab・田中和幸・佐藤良一：電気抵抗法に基づく鉄筋コンクリートひび割れ部での水分移動の評価について，コンクリート工学年次論文集，Vol.25,No.1,2003