

# 論文 電気抵抗法を適用したコンクリートの含水量評価に及ぼす材齢の影響

福安 直幸\*1・山田 和夫\*2

**要旨：**本研究では、電気抵抗値と水分量との関係に及ぼす材齢の影響およびその評価方法について検討を行った。その結果、コンクリート内部の水分量と比抵抗値との関係は、比抵抗値の測定値をその時点の水分量100%の比抵抗値で無次元化することによって材齢の影響を消去できること、試験体内部の水分状態が外部環境とほぼ平衡状態にある段階での水分量の変化状況は、材齢の影響を考慮に入れた水分量推定式を用いることによって、養生環境下の湿度の変化状況と良く対応した結果が得られること、などが明らかとなった。

**キーワード：**コンクリート, 水分移動, 電気抵抗値, 比抵抗値, 水分量, 材齢

## 1. はじめに

筆者らは、これまでにコンクリートの収縮機構およびそれに起因したひび割れの発生・進展機構の解明を目的とした基礎的研究として、普通コンクリート、鋼繊維補強コンクリートおよび高強度コンクリート内部の水分移動と収縮性状および強度発現性状との関係について一連の検討を行い、幾つかの有用な知見を得た<sup>1)~3)</sup>。

しかし、これらの実験では、いずれも試験体内部に埋設した電極によって測定した電気抵抗値<sup>4),5)</sup>を特定の材齢時に作成した電気抵抗値と水分量との関係式に代入して水分量の推定を行ったが、材齢1年程度までの水分移動性状を追跡するためには、水分量推定式の材齢依存性についても詳細に検討しておく必要があることがわかった<sup>6)</sup>。この点を踏まえて、本研究では、電気抵抗値と水分量との関係に及ぼす材齢の影響およびその評価方法、並びに本研究で提案する水分量推定式の特徴について検討を行った。

## 2. 水分量推定式の検討

### 2.1 実験方法

#### (1) 実験の概要

本研究では、図-1に示すような電極埋設の

φ75×150mm円柱試験体を用いて、高強度および普通コンクリート（水セメント比(W/C)をそれぞれ30および60%とした）内部の電気抵抗値と水分量との関係を材齢1年まで調査した。

#### (2) 試験体の製作および養生方法

本実験では、前報<sup>3)</sup>の実験と同様に、使用材料として普通ポルトランドセメント、猿投産山砂（最大寸法=5mm, 表乾比重=2.56）、猿投産山砂利（最大寸法=25mm, 表乾比重=2.61）、AE減水剤（W/C=60%の場合）および高性能AE減水剤（W/C=30%の場合）を使用した。コンクリートは、いずれもレディーミクストコンクリートとし、調合は、W/C=30%および60%とも

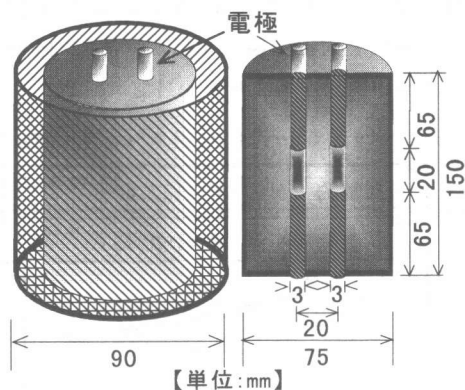


図-1 試験体の形状・寸法および測定位置

\*1 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻（正会員）

\*2 愛知工業大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

表-1 コンクリートの調合表

W/C (%)	標準調合 (kg/m <sup>3</sup> )					スランプ <sup>*</sup> (cm)	空気量 (%)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤		
30	161	536	550	1067	4.02	18	4.5
60	169	281	845	955	0.56	18	4.5

スランプが18cm、空気量が4.5%となるように設定して決定した。本実験で用いたコンクリートの調合表を表-1に示す。コンクリートの打設は電極埋設のφ75×150mm円柱試験体（前掲の図-1参照）に2層に分けて行い、各層木槌を用いて十分に締め固めを行った。試験体は、打設後1日目に脱型した後約1ヶ月間標準水中養生を行った後、内部水分量（小野ら<sup>5</sup>）の整理方法に準じて、表乾状態をW=100%、絶乾状態をW=0%とした。本研究では、飽水率と呼ぶことにする）の目標値をW=100, 80, 60, 40, 20および0%の6種類に設定して、飽水率が目標値となるまで恒温乾燥炉を用いて乾燥した。飽水率が所定量に達した試験体は、その後直ちに内径84mmの塩ビ製円筒容器と弾性エポキシ樹脂で密封し、水分が変動しないようにして以後温度21±3℃の養生室内で空中養生を行った。

(3) 測定方法

本実験では、コンクリート内部の水分量を測定するために、電気抵抗測定用のステンレス製電極（直径=3mm、測定長=20mmおよび測定間隔=20mm）を前掲の図-1に示すφ75×150mm円柱試験体内部中央にセットしてコンクリート

の打設を行った後、飽水率が所定量に保たれている試験体の電気抵抗値（LCRメータを用いて測定した）と試験体重量の計測を材齢約1年まで定期的に行った。結果の整理に際しては、電気抵抗値に及ぼす電極の表面積（A）および測定間隔（L）の影響を除去するために、測定された電気抵抗値（R）を比抵抗値（ $\rho=R \cdot A/L$ ）に変換して評価した。

2.2 実験結果とその考察

(1) 水分量推定式の材齢依存性

図-2(a)および(b)は、それぞれ高強度コンクリート（W/C=30%）および普通コンクリート（W/C=60%）の飽水率（W）と比抵抗値（ $\rho$ ）との関係に及ぼす材齢の影響を示したものである。これらの図によれば、水セメント比にかかわらず同一飽水率時の比抵抗値は、材齢の経過とともに大きくなる傾向を示している。例えば、材齢約2ヶ月および約1年時の飽水率（W(%)）と比抵抗値（ $\rho(K\Omega \cdot cm)$ ）との関係を本実験の範囲で求めてみると、

①高強度コンクリート（W/C=30%）

$$\left. \begin{aligned} \text{材齢約2ヶ月} &: W=127.62\rho^{-0.5302} \\ \text{材齢約1年時} &: W=153.75\rho^{-0.4469} \end{aligned} \right\} (1)$$

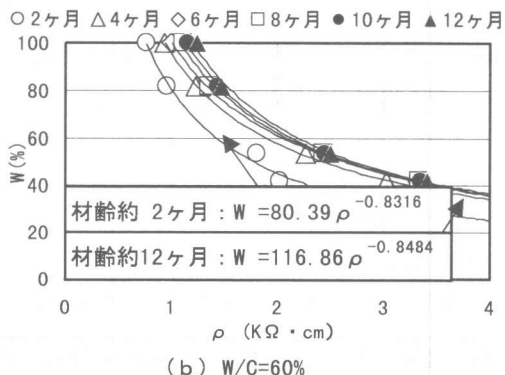
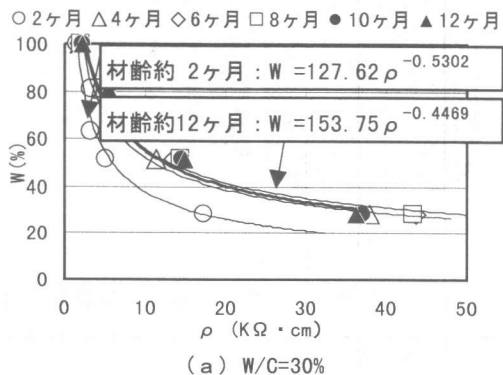


図-2 飽水率と比抵抗値との関係

②普通コンクリート (W/C=60%)

$$\left. \begin{aligned} \text{材齢約2ヶ月} &: W = 80.39\rho^{-0.8316} \\ \text{材齢約1年時} &: W = 116.86\rho^{-0.8484} \end{aligned} \right\} (2)$$

のようになり、材齢の経過に伴う比抵抗値の変化量は、一般的に水セメント比の小さいコンクリートほど大きくなる傾向を示している。このことから、若材齢から長期材齢までの範囲を対象としてコンクリート内部の水分量の経時変化を評価する際には、ある特定の材齢時に作成した飽水率と比抵抗値との関係式を一律に用いるのは問題があるといえる。

(2)材齢の影響を考慮した水分量推定式

図-3(a)および(b)は、それぞれ水中養生試験体で飽水率が100%に保持されている円柱試験体によって得られた比抵抗値と重量の材齢1年までの範囲における経時変化を示したものである。図-3(a)によれば、比抵抗値は水セメント比にかかわらず材齢の経過とともに増大しているが、その増大率は水セメント比が大きい

いほど、かつ材齢の経過に従って小さくなる傾向を示している。ただし、比抵抗値は、材齢約1年の段階ではまだ安定域に達しているとはいえない。本実験の範囲で比抵抗値 ( $\rho$ ( $K\Omega\cdot cm$ ))と材齢(T(日))との関係を求めてみると、以下のような実験式が得られた。

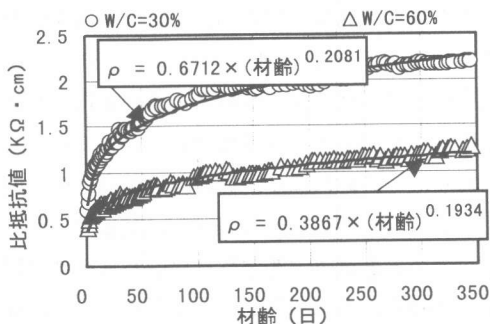
①高強度コンクリート (W/C=30%)

$$\rho = 0.6712T^{0.2081} \quad (3)$$

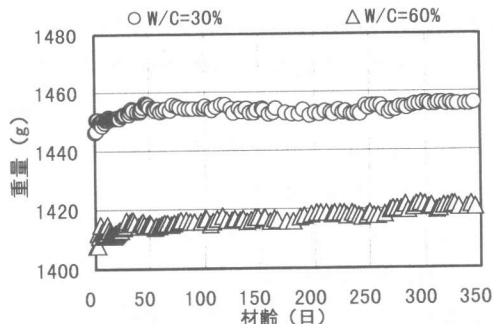
②普通コンクリート (W/C=60%)

$$\rho = 0.3867T^{0.1934} \quad (4)$$

一方、この間の試験体重量の経時変化(図-3(b)参照)に注目してみると、水中養生開始時点(材齢約24時間)から飽水率の調整を行った材齢1ヶ月までの範囲では、材齢の経過とともに7~9gの重量増加が認められたが、その後の重量変化は比較的小さく、材齢約1年までの範囲で3~5g程度の重量増加となっている。この重量増加は、セメントの水和反応によって失われた水分が外部から補給された結果によるもの

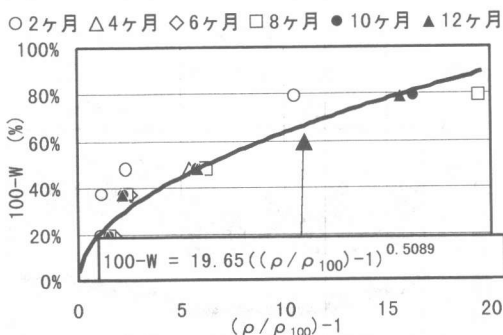


(a) 比抵抗値の経時変化

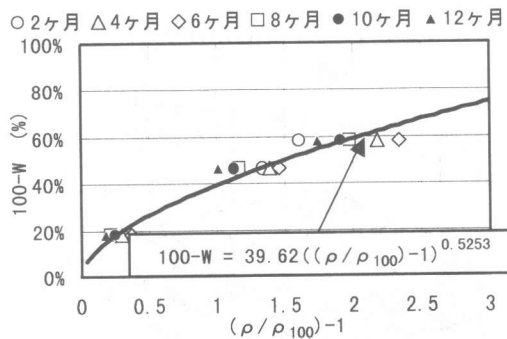


(b) 重量の経時変化

図-3 飽水率100%円柱試験体の比抵抗値と重量の経時変化



(a) W/C=30%



(b) W/C=60%

図-4 飽水率と相対比抵抗値との関係

と思われる。なお、図には示していないが、飽水率を0～80%に調節した試験体の材齢1ヶ月（飽水率調節時点）～1年の間の重量変化は2～5gの範囲にあり、塩ビパイプと弾性エポキシ樹脂で密封することによって各試験体の含水状態をほぼ一定に保持できたことがわかった。

図-4(a)および(b)は、それぞれ高強度コンクリート(W/C=30%)および普通コンクリート(W/C=60%)の飽水率(W)と比抵抗値( $\rho$ )との関係を(100-W)と( $\rho/\rho_{100-1}$ )との関係で整理することによって、比抵抗値に及ぼす材齢の影響が除去できるか否かを検討した結果である。ただし、図中の $\rho_{100}$ は、各比抵抗値測定時点における飽水率100%の比抵抗値であることを示す。これらの図によれば、高強度コンクリートの材齢2ヶ月時の結果を除けば、(100-W)と( $\rho/\rho_{100-1}$ )との関係は、コンクリートの種類にかかわらず材齢の影響を殆ど受けておらず、比抵抗値の測定結果をその材齢での飽水率100%の比抵抗値で無次元化することによって、飽水率に及ぼす材齢の影響をほぼ消去できるといえる。本実験においては、(100-W)と( $\rho/\rho_{100-1}$ )との関係に関する以下に示すような実験式が得られた。

①高強度コンクリート(W/C=30%)

$$100-W=19.65(\rho/\rho_{100-1})^{0.5089} \quad (5)$$

②普通コンクリート(W/C=60%)

$$100-W=39.62(\rho/\rho_{100-1})^{0.5253} \quad (6)$$

### 3. コンクリート内部の水分移動評価

#### 3.1 実験の概要

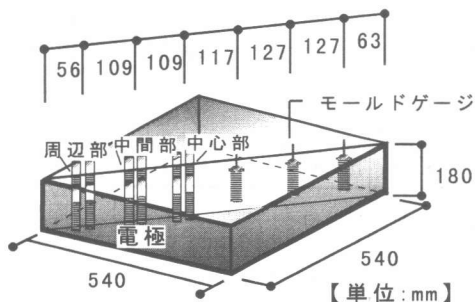


図-5 試験体の形状・寸法および測定位置

本研究で提案する飽水率推定式の特徴を検討するために、ここでは前報<sup>3)</sup>で示した4面乾燥状態にある540×540×180mm平板試験体(図-5参照)の材齢1年までの実験結果を用いた。図-6は、コンクリート打設時から材齢約1年までの期間における試験体養生室内の気温および湿度の経時変化を示したものであるが、気温および湿度は、材齢約150日までの範囲では材齢の経過とともに低下し、それ以後は逆に上昇する環境であったことが確認できる。なお、平板試験体の養生期間中の気温および湿度の範囲は、それぞれ9～31℃および37～82%であった。

#### 3.2 水分移動の推定結果

##### (1)比抵抗値の経時変化

図-7(a)および(b)は、それぞれ高強度コンクリート(W/C=30%)および普通コンクリート(W/C=60%)の比抵抗値( $\rho$ )の経時変化を測定位置別に示したものである。これらの図によれば、高強度コンクリートの全測定位置(中心部、中間部、周辺部)および外部環境の影響を受けやすい普通コンクリートの周辺部(◇印)の比抵抗値の経時変化は、前掲の図-6に示した湿度の経時変化と比較的よく対応しており、一般的に湿度が低いほど比抵抗値は増大する傾向を示している。なお、高強度コンクリートの比抵抗値が測定位置に関わらずほぼ同様の経時変化を示したのは、移動可能な内部水分の絶対量が普通コンクリートに比べて少ないため、試験体中心部であっても外部環境の影響を受けやすいためではないかとも思われるが、詳細については、今後更に検討する必要がある。

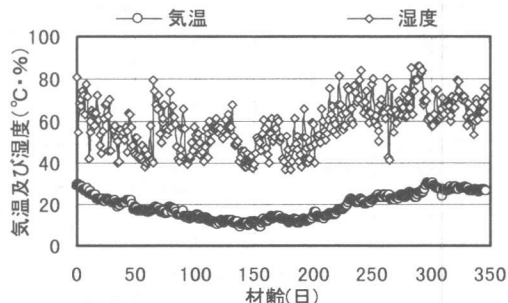
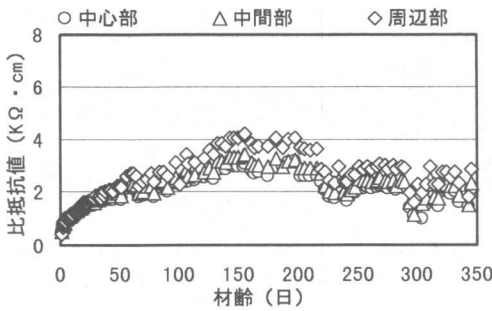
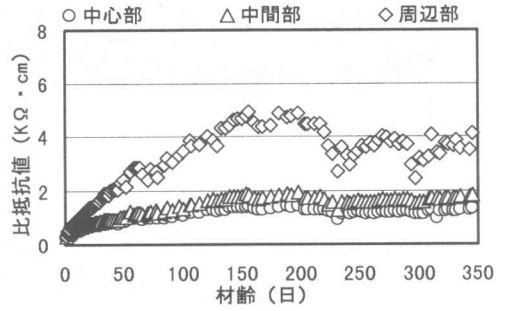


図-6 気温および湿度の経時変化



(a) W/C=30%



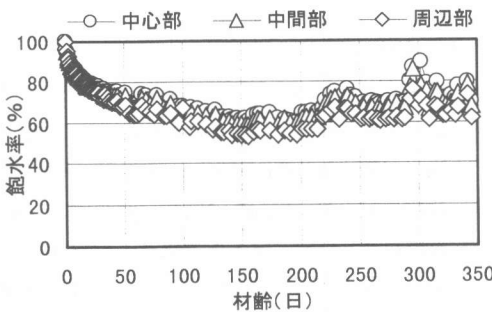
(b) W/C=60%

図-7 平板試験体内部の比抵抗値の経時変化

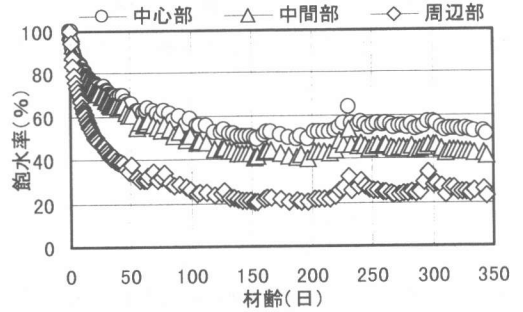
(2) コンクリート内部の水分移動性状

図-8～図-10は、試験体内部の飽水率を、それぞれ材齢約2ヶ月時に作成した飽水率推定式(式(1)および(2)の上段)、材齢約1年時に作成した飽水率推定式(式(1)および(2)の下段)および材齢の影響を考慮に入れた飽水率推定式(式(5)および(6))を用いて推定した結果を示したものである。ただし、式(5)および式(6)の適用に際しては、比抵抗値測定時点における飽水率100%の比抵抗値 $\rho_{100}$ として前掲の式(3)および式(4)による計算値を用いた。

これらの図によれば、材齢約2ヶ月時に作成した推定式よりも材齢約1年時に作成した推定式を使用した場合の方が平板試験体内部の飽水率は、一般的にコンクリートの水セメント比にかかわらず小さくなる傾向を示している。例えば、材齢約200日時点での試験体周辺部の飽水率は、普通コンクリートの場合が約10%、高強度コンクリートの場合が約15%相違しており、飽水率推定式による相違は、普通コンクリートよりも高強度コンクリートの方が著しくなっている。これに対して、材齢の影響を考慮に入れた飽水

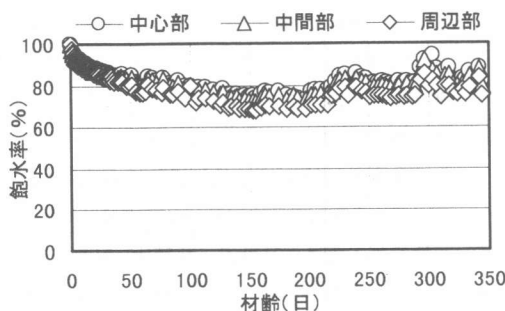


(a) W/C=30%

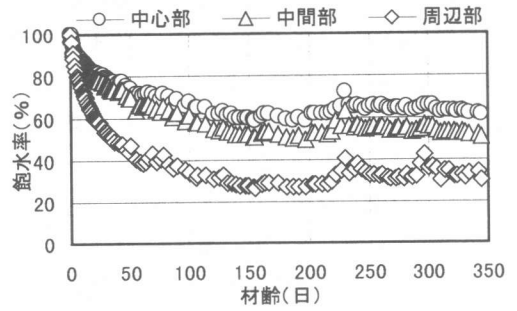


(b) W/C=60%

図-8 材齢約2ヶ月時に作成した飽水率推定式による水分移動性状

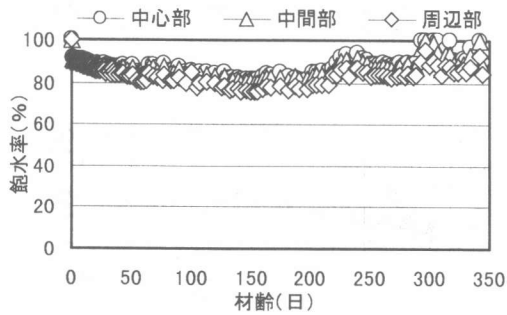


(a) W/C=30%

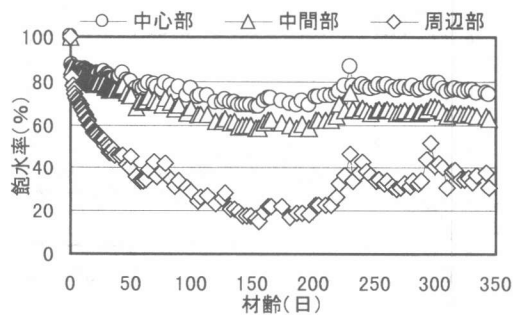


(b) W/C=60%

図-9 材齢約12ヶ月時に作成した飽水率推定式による水分移動性状



(a) W/C=30%



(b) W/C=60%

図-10 材齢の影響を考慮に入れた飽水率推定式による水分移動性状

率推定式を用いた場合の特徴は、材齢約150日以降の範囲における水分移動性状で認められ、材齢の経過に伴う各測定位置での飽水率の回復傾向が、一般的に材齢約2ヶ月および約1年時に作成した飽水率推定式による結果と比較して著しくなっている。特に、コンクリート内部の飽水率の評価に材齢の影響を考慮に入れた飽水率推定式を用いることによって、試験体内部の含水状態が外部環境とほぼ平衡状態にあると考えられる材齢約150日以降の飽水率の変化状況が、試験体養生室内の湿度の変化状況とより良く対応した結果を示しており、本研究で提案した材齢の影響を考慮に入れた飽水率推定方法の有用性が示されたといえる。

#### 4. 結論

本研究によって得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) コンクリート内部の飽水率と比抵抗値との関係は材齢の影響を受けるため、特定の材齢時に作成した関係式を用いて若材齢から長期材齢までの広範囲にわたる飽水率の推定を行うのは問題である。
- 2) 飽水率が100%に保持されている試験体においても、比抵抗値は、水セメント比に関わらず材齢の経過に伴って増大し、材齢1年の段階ではまだ安定域に達していない。
- 3) コンクリート内部の飽水率と比抵抗値との関係は、比抵抗値の測定値をその時点の飽水率100%の比抵抗値で無次元化することに

よって、材齢の影響をほぼ消去できる。

- 4) 試験体内部の水分状態が外部環境とほぼ平衡状態にある段階での飽水率の変化状況は、材齢の影響を考慮に入れた飽水率推定式を用いることによって、養生環境下の湿度の変化状況と良く対応した結果が得られる。

#### 謝辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た愛知工業大学学部学生の酒井恵里さん、西尚紀君、三井ユキ子さんに対して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 小林 健・山田和夫・山本俊彦：コンクリート内部の水分移動に起因した乾燥収縮および強度発現に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.633-638，1995
- 2) 山田和夫・小林 健・山本俊彦：4面乾燥状態にあるコンクリートの水分移動性状に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.466-471，1996
- 3) 福安直幸・山田和夫：高強度コンクリート内部の水分移動性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.607-612，1998
- 4) 小野博宣・加藤 聡・大岸佐吉：コンクリートの含水率測定における電気抵抗法の適用性，セメント・コンクリート論文集，No.48，pp.238-243，1994
- 5) 高橋武彦：電気化学概論，槇書店，1986
- 6) 福安直幸，山田和夫：材齢1年までの高強度コンクリートの収縮および水分移動性状，日本建築学会東海支部研究報告集，第37号，1999