

高温加熱されるコンクリート中の含水率測定法

一 瀬 賢 一 長 尾 寛 博
中 根 淳

Method of Measuring Moisture Content in Concrete Heated to High Temperature

Ken-ichi Ichise Kakuhiro Nagao
Sunao Nakane

Abstract

This study was carried out to experimentally examine application of the electrode method which measures the state of water distribution and water migration when the main concrete members in a nuclear structure would be heated from normal to high temperature. The examinations concerned five points: (1) the influences of electrode spacing and other materials such as reinforcing bars, (2) the influences of electrode size, and size and shape of specimen, (3) examination of the sealing method during heating to high temperature, (4) comparison with the gravimetric method, and (5) examination of reproducibility of measured values.

As a result of the study, it was found that the electrode method can measure moisture content of concrete even at high temperature owing to the method of sealing concrete developed, which serves as the criterion for estimating moisture content.

概 要

この研究は、原子力構造物を対象とし、その主体をなすコンクリート部材が、常温から高温（175°C程度）まで加熱されたときのコンクリート中の水分分布状態およびその移動性状を測定する方法として電極法を取りあげ、その適用性について実験的に検討したものである。検討事項は、以下の5点である。(1) 電極の埋込み間隔および鉄筋など他物質の影響、(2) 電極の寸法、供試体の寸法・形状の影響、(3) 高温加熱時におけるシール方法の検討、(4) 電極法と重量法との比較、(5) 測定値の再現性の検討。

試験の結果、電極法は、含水率を推定する基準となる供試体のシール方法の開発により、高温下においても含水率の推定が十分可能であることが分かった。

1. まえがき

原子力構造物では、その設計に先だちその主要構造体となるコンクリートの高温下における強度特性、熱特性などの調査・検討を行なう必要がある。特に、コンクリート中の含水状態がこれらの特性に大きな影響を与えることは、定性的に認められている。しかし、定量的な把握は、現状ではほとんどなされていないため、高温下におけるコンクリートの諸物性が適確にとらえられていない。これは、高温加熱に対応した適切な測定方法がないこと、またコンクリート中の自由水が高温加熱され水の状態から水蒸気になるまで包含できる適切な解析方法が

ないことが挙げられ、実態に対応する予測が困難となっているためである。これに対し、既にコンクリート中の含水率の測定方法として電極法¹⁾を用い、常温（20°C～60°C程度）における含水分布の測定を行ない、その適用性を確認している²⁾。この研究は、電極法が高温加熱下のコンクリートにおいても適用可能か否かを検討したものである。そのため、まず電極の埋込み間隔、電極の最適寸法、形状の検討、高温・高圧（約10気圧）に耐えられるシール容器のシール方法の開発を行なった。次に、実際にコンクリート供試体の高温加熱測定を行ない、重量法（後述）との比較から電極法の含水率推定の可能性および測定値の再現性について検討した。

2. 試験概要

2.1. 試験項目とその内容

2.1.1. 電極の埋込み間隔および鉄筋など他物質の存在が測定に及ぼす影響に関する検討方法 図-1に示す電極の長さを $L=8\text{ cm}$ とし、コンクリート中の自由水を想定した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液（水 1 l 当り 0.82 g 溶解）に入れ、(a)電極と電極、(b)電極と鉄筋、(c)電極と他物質（塩化ビニル製容器）との距離を 0.3 cm から 5 cm まで変化させた時における電極間抵抗値を比較した（図-2）。また同時に、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液温度を 20°C 、 65°C の 2 水準とし、温度の影響についても検討した。

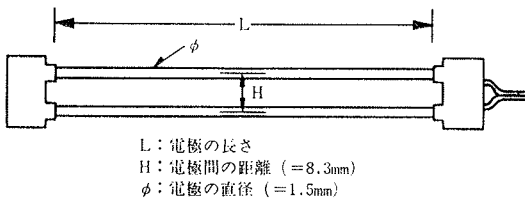


図-1 電極の形状

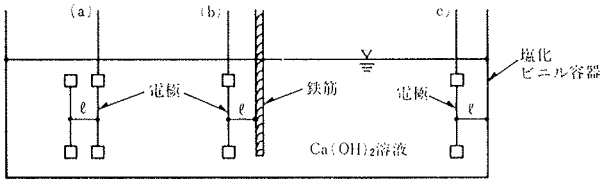


図-2 電極の埋込み間隔

2.1.2. 電極の寸法、および校正曲線作成用供試体の寸法・形状が測定に及ぼす影響に関する検討方法 電極の寸法を 6 種類（5, 6, 7, 8, 9, 10 cm）、試供体の寸法・形状を 3 種類（A: $4 \times 4 \times 16\text{ cm}$, B: $4 \times 4 \times 12\text{ cm}$, C: $5\phi \times 10\text{ cm}$ ）、加熱温度を 3 水準（ 20°C 、 65°C 、 110°C ）として、電極間抵抗に及ぼす影響を検討した。表-1に試験条件の組合せを示す。供試体は、表-2に示す調合のモルタルにより作成した。

形状寸法 (cm)	電極寸法 (cm)						加熱温度 ($^\circ\text{C}$)			総供試体数
	5	6	7	8	9	10	20	65	110	
A ($4 \times 4 \times 16$)	●	●	●	●	●	●	○	○	○	54
B ($4 \times 4 \times 12$)	●	●	●				○	○		18
C ($5\phi \times 10$)	●	●					○	○		12

表-1 試験条件の組合せ

セメントの種類	骨材の種類	水セメント比 (%)	モルタルの調合		
			セメント (kg)	水 (ℓ)	砂 (kg)
フライアッシュB種	標準砂	55	31.30	17.21	50.05

表-2 モルタルの調合

2.1.3. 校正曲線作成用供試体のシール方法 電極法は、完全に水分の放散しない条件で、あらかじめ測定し

た校正曲線から供試体の含水率を推定するものである。従って、校正曲線をつくるための供試体は、完全にシールしなければならない。このため、図-3に示す 3 水準のシール方法について検討を行なった。シール条件は、(a), (b), (c)の順に厳しくなっている。シール性能は、シール容器内に一定量の水（約 50 cc）を入れ、 175°C 一定温度で加熱を行ない、加熱前後における容器全体の重量減少量の有無により評価した。

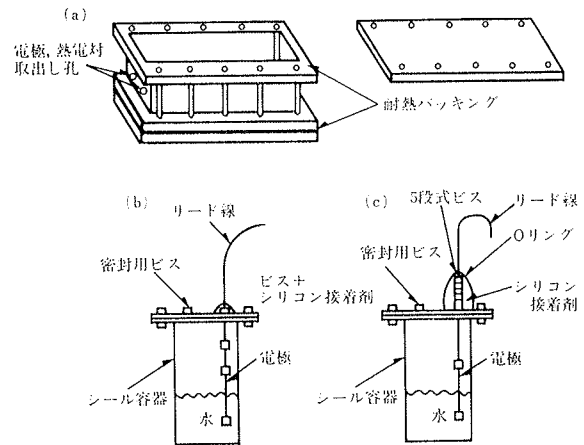


図-3 各シール容器

2.1.4. 校正曲線作成材令の違いによる電極法と重量法との比較方法 $15\phi \times 30\text{ cm}$ 供試体を用いて電極法と重量法による含水率の測定値を比較し、電極法の測定精度を検討した。供試体中の電極の埋込み位置は、図-4に示す。供試体に用いたコンクリートの調合、コンクリートの性質をそれぞれ表-3、表-4に示す。測定は、重量法用供試体と電極法用供試体を同一加熱炉に入れ、加熱温度を同一とし連続的に行なった。供試体の加熱は、加熱速度 $6^\circ\text{C}/\text{hr}$ として 175°C まで上げ、一定温度とした。加熱開始材令は、28日と91日とし、含水率は、各材令に

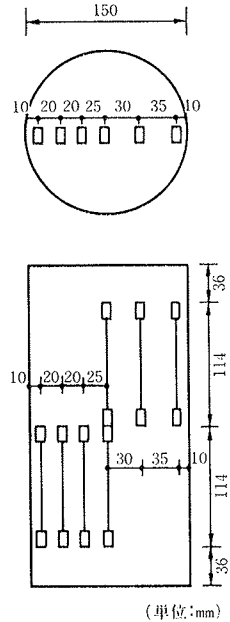


図-4 電極の埋込み位置

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (ℓ/m ³)	単セメント量 (kg/m ³)	砂 (7:3) (kg/m ³)	砂利(7:3) (kg/m ³)	混和剤 (g)
55	43	164	298	777	1,030	626

表-3 コンクリートの調合

スランパ (cm)	フロー (mm \times mm)	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/ℓ)	練り上り時のコンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)	圧縮強度 (kg/cm ²)	
					7	28
10.5	226 \times 228	4.3	2.34	20	215	315

表-4 コンクリートの性質

おける校正曲線により求めた。

2.1.5. 測定値の再現性に対する検討方法 試験は、前項2.1.4.で使用した材令91日の供試体を用いて行なった。再現性の検討は、この供試体を再び吸水させたのち加熱測定を行ない、1回目と2回目の加熱による含水率の変化を重量法による含水率との対比により行なった。

2.2. 含水率の測定方法

2.2.1. 重量法 重量法は、加熱炉内に供試体 (15φ × 30 cm) を吊し、てこの原理を利用して、加熱に伴う重量変化をロードセルの出力に置き換え連続的に測定した。

2.2.2. 電極法 電極法は、図-1で示した電極をコンクリート中に埋込み、図-5で示す測定回路により2次電圧 V₂ の測定を行なう。この V₂ を (2-1)式に代入し、電極間抵抗 R を算出し、あらかじめ求めた校正曲線から含水率を読み取る。校正曲線の作り方は、文献³⁾による。

$$\text{電極間抵抗 (R)} = R_0 \cdot V_2 \cdot \left(\frac{1}{V_1 - V_2} \right) \dots \dots \dots (2-1)$$

R: 電極間抵抗 R₀: 既知抵抗 (=600 Ω)
V₁: 1次電圧 (=5V) V₂: 2次電圧

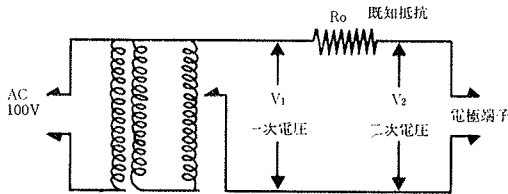


図-5 測定回路

3. 試験結果と考察

3.1. 電極の埋込み間隔および鉄筋など他物質の存在が測定に及ぼす影響

図-6は、電極間抵抗値と(a)電極と電極、(b)電極と鉄筋、(c)電極と容器(塩化ビニル)の距離の関係を示す。これによると(a)、(b)、(c)ともに距離が変わっても電極間抵抗値は、影響を受けず、どの条件の場合も溶液温度20°Cで約114 Ω、65°Cで約88 Ωと一定値を示した。この結果

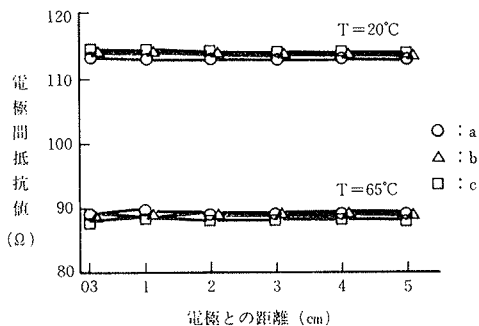


図-6 電極の埋込み間隔の影響

から(1)電極の埋込み間隔は、他の電極の影響を受けないこと。(2)電極近傍に鉄筋や他物質(塩化ビニル容器)が存在しても測定値に影響を及ぼさないこと。さらに(3)溶液温度が変わった場合、抵抗値は変化するものの(1)、(2)の傾向に変化がないことが分かった。

3.2. 電極の寸法、および校正曲線作成用供試体の寸法形状が測定に及ぼす影響

図-7は、電極間抵抗値と電極の寸法との関係を示す。各値は、供試体の中心温度が雰囲気温度と同一になった時のものを示す。これによると供試体の含水率が高い場合、電極の寸法の違いによる抵抗値の差は、ほとんどない。しかし、供試体の含水率が低くなると電極の寸法により抵抗値の差が生じ、電極の寸法が短いもの(8 cm以下)ほど抵抗値が大きくなった。これは、寸法の短いものほど測定感度が高いこと、また電極間抵抗値が、電極寸法が短いほど測定する電極の間にある空隙や骨材の影響によりばらつく可能性を含むこととに起因していると考えられる。この結果から、電極の寸法は、長いものほど平均的に抵抗値を測ることができることが分かる。しかし、電極の寸法の長いものは、110°C加熱において電極端部の膨張により、供試体にひびわれが生じたものもあった。このため、比較的抵抗値が安定しており、供試体にひびわれを生じさせないよう以下の試験では、電極寸法を8 cmと定めた。

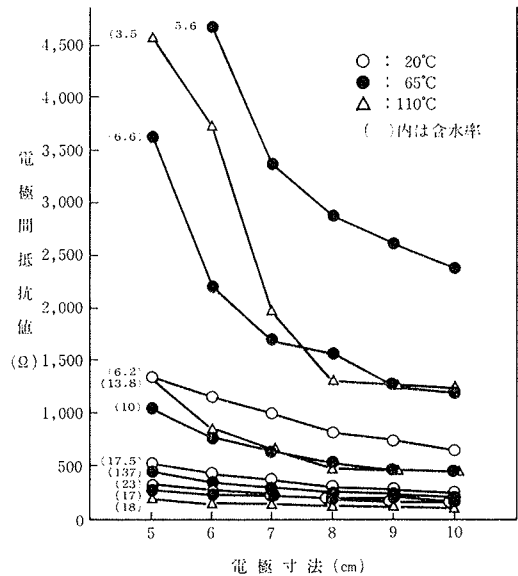


図-7 電極間抵抗値と電極寸法との関係

図-8は、含水率と2次電圧の関係を供試体の形状をパラメータとして示したものである。電極寸法5 cm、6 cmともに供試体の形状は、電極の測定値に影響を及ぼしていないと考えられる。また、図-8は、65°Cの結果であるが、20°Cにおいても同様の傾向が見られた。

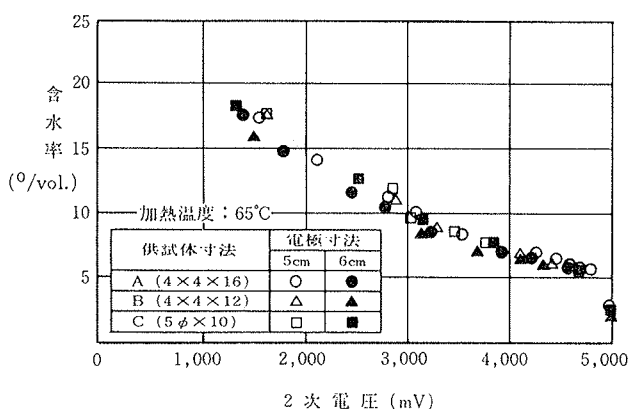


図-8 供試体の形状寸法と二次電圧との関係 (加熱温度65°C)

3.3. 校正曲線作成用供試体のシール方法の検討

図-9は、各シール方法による加熱時間と重量減少量との関係を示す。これによると前述の図-3に示す(a), (b)のシール方法では、高温加熱時において完全に密封できないことを示す。これは、シール容器から取り出されたリード線端部のシール性能が、水蒸気圧に耐えられなかったことによる。しかし、(c)のようにリード線の取り出し端部をビスおよびテフロン製のリングで密封し、シリコンで固めた場合、図-9に示すように加熱時間60時間後においても容器全体の重量減少量は1g未満であった。この結果、シール容器は、高压に耐えるため、かなり高いシール性能を必要とすることが分かった。

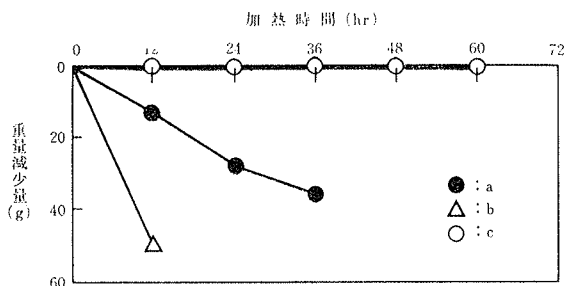


図-9 各シール容器のシール性能

以上のシール容器およびシール方法の検討に基づき、図-10に示すシール容器を製作した。

このシール容器は、シール容器筒部に熱電対、電極を埋込んだコンクリート供試体を入れ、シール容器筒部と端部の間にOリングをはさみ、取り合いのシール性能を確保している。また、コンクリート供試体に埋込んだ電極の温度変化による伸縮から生じるひびわれを防止するため、コンクリート供試体は、拘束フレームで拘束した。その上、シール容器と供試体のすきまは、吸水性のない高温耐久性シリコンパッキングで充てんした。なお、シリコン中の鉄筋は、試験後の供試体を取り出しやすくするため挿入したものである。熱電対、電極から取り出したリード線は、供試体中の水がこれを伝って外へ出ない

ようにそれぞれ単線としてテフロン被覆を行ない、取り出し用ビスからテフロン加工のOリングを介して取り出した。この方法により高温加熱時において、リード線から水が抜け出すことなく、供試体のほぼ完全なシールができたと考えられる。

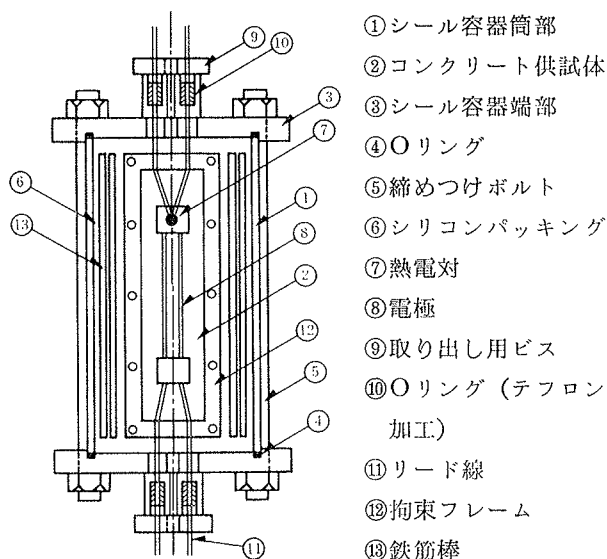


図-10 シール容器

3.4. 校正曲線作成材令の違いによる電極法と重量法との比較

材令91日で作成した校正曲線を図-11に示す。

電極法と重量法により測定した含水率の関係を図-12に示す。重量法による含水率は、次式により求めた。

$$\text{含水率} (\%/\text{Vol.}) = \frac{\text{各測定時における重量}(\text{g}) - \text{絶乾重量}(\text{g})}{\text{供試体の体積}(\text{cm}^3)} \times 100$$

また、電極法による含水率は、平均含水率 (図-4で示す測点を基に、供試体中心軸から同心円状に同一含水率とみなし供試体全体で平均して求めたもの) で表わした。

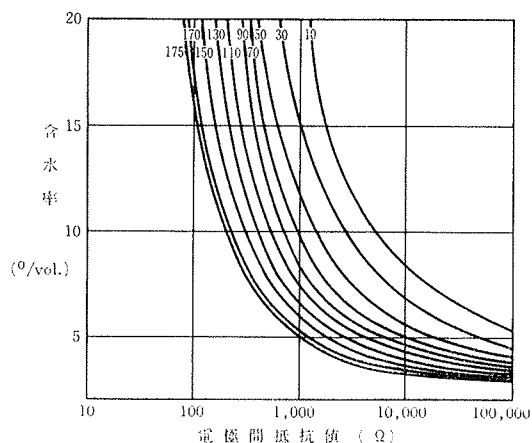
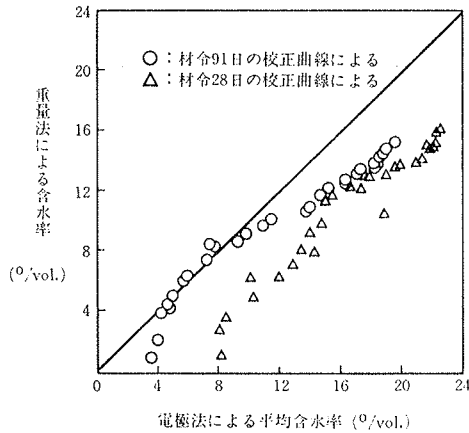


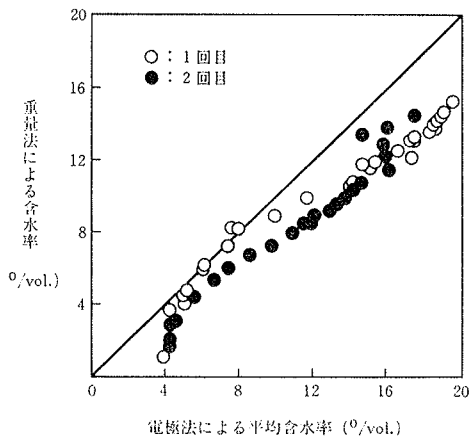
図-11 校正曲線 (材令91日)



図一12 電極法と重量法による含水率の比較

図一12によると、材令28日、材令91日どちらの校正曲線を用いた場合も重量法に較べ電極法による含水率が大きい。材令28日の校正曲線で推定すると4~6°/Vol.大きく、材令91日の校正曲線で推定すると、低含水率ではほぼ一致し、高含水率では約4°/Vol.大きい。材令28日の校正曲線を基に求めた含水率が重量法に較べ大きくなったのは、コンクリートの水和の影響が、校正曲線の作成に大きく作用したものと考えられる。また、材令91日の校正曲線による含水率が、重量法に較べ高含水率において高くなった理由として以下のことが考えられる。

第1に、アンシール状態で測定を行なったため、加熱初期において供試体のごく表層部で乾燥が進み、供試体の最も外周部に埋込まれた電極でもその変化をえられず含水率を高めに評価したためと考えられる。第2に、供試体の軸方向にも水分こう配が生じたものを中心部で評価したためと考えられる。このように、重量法と電極法による含水率の推定値は、一致はしていないが、その相関性は高く、常温時同様、高温加熱時の含水率推定に十



図一13 電極法の再現性

分適用できると考えられる。

3.5. 電極法による測定値の再現性

図一13は、材令91日で加熱測定した供試体を再び14日間吸水させ、前項同様の加熱測定した結果を示す。この結果、1回目と2回目の含水率の推定値はほぼ等しく、電極法による含水率の推定が再現性のあることを示した。

4. まとめ

この試験により以下のことが確認できた。

(1) 電極による測定値は、その埋込み間隔および近傍に介在する鉄筋、他物質などの影響を受けない。このため、実部材に自由な間隔で電極を埋込むことができ、水分分布の測定が可能である。

(2) 電極の寸法は、長いものほどその近傍の平均的な抵抗値を測定できる。しかし、寸法を長くすると校正曲線作成用供試体の寸法が長くなり、取り扱いにくいだけでなく校正曲線の作成時に供試体にひびわれが生じる危険性が高い。

(3) 校正曲線作成用供試体の形状は、電極間抵抗値にあまり影響を与えない。

(4) 校正曲線作成のためのシール容器は、かなり高いシール性能を必要とする。

(5) 電極法は、重量法と相関性が高く、高温加熱時の含水率推定に十分適用できる。

(6) 電極法による含水率の推定は、再現性がある。

付 記

この研究は、東京工業大学大学院生 鄭 尚鎮氏、神奈川大学学生仲居耕一氏が大林組技術研究所において実施した修士論文および卒業論文のための研究の成果を、筆者らがまとめ直したものであることを付記します。

参考文献

- 1) 田畑, 他: 電極法によるコンクリート含水率の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和51.10.) pp. 117~118
- 2) 一瀬, 長尾, 中根: 構造物躯体コンクリートの強度管理に関する研究(その9) ——実構造物における含水率の調査結果——, 大林組技術研究所報, No. 31, (1985), pp. 55~58
- 3) 高橋, 久保田, 永井, 長尾: 電極法による含水率の測定法に関する検討結果, 大林組技術研究所報, No. 26, (1983), pp. 71~75