

[1121] 交流2電極法によるコンクリート中の含水率測定についての理論的検証

桂 修*1・吉野利幸*1・田畑雅幸*2・鎌田英治*3

1. はじめに

コンクリートは、セメントペースト、細骨材、粗骨材からなる複合材料であり、硬化セメントペースト中には大小様々な空隙があり、その空隙中には水が存在する。コンクリートの諸性状を考察するにはその水分の在り方が重要な関心事となる。しかし、建築部材としてのコンクリート中の含水分分布の経時変化を非破壊で知る方法は確立されているとは言えないのが現状である。

コンクリート中の含水分分布、及びその経時変化を電気的性質から推定する方法について、古くは十代田らの研究[1]、その後著者ら[2][3]、笠井ら[4]、小野ら[5][6]、田代ら[7]による研究があり、電気抵抗及び誘電率の測定による含水率測定法が報告されている。これらの研究によると、セメント硬化体の電気抵抗あるいは誘電率は含水率と温度に大きく依存し、実験値から温度に関する校正曲線を作成することにより含水率を知ることができるとされているが、現段階では、それらの理論的な関係が一般化されてはいない。

本研究では、セメント硬化体の電気的性質としての比抵抗に着目し、これまでの研究に理論的見地からの検討を行ったうえで、含水率を比抵抗と温度の関数として記述する式を誘導した。また、セメントペースト及び、コンクリートによる実験からその適用を検証し、結果として、従来の校正曲線を用いずに、数値解析により含水率を測定する方法を示したものである。

2. 理論的見地

物質の電気伝導機構には電子伝導と電解質伝導があり、金属に代表される電子伝導では温度の上昇とともに比抵抗が高くなるのに対し、電解質伝導では逆に比抵抗が低下する[9]。既往の研究によると、含水率が高いほど、また、測定時の温度が高いほどセメント硬化体の比抵抗は小さくなり、水分の存在する量と測定温度に依存する事が示されている。セメント硬化体中の水分は各種の電解質を含み、また、比抵抗の温度依存性は電解質伝導体としての性質を示すことから、ここでは、セメント硬化体の電気伝導はその空隙中に含まれる電解質溶液の量としての含水率と電解質溶液自体の電気的性質に依存するものとして理論的見地を述べる。

2.1 セメント硬化体の比抵抗と含水率の関係

吸湿性物質の吸湿率 M と比抵抗 ρ の間には一般に式(1)の関係が成立する。式(1)中の定数 a_1 、 a_2 は試料の種類、測定温度で異なる定数であり、ある特定の試料について利用すれば電気抵抗から含水率を知ることができる[10]。セメント硬化体も吸湿性物質であることから、特定のセメント硬化体のある温度における比抵抗 ρ と含水率 M の関係は式(1)により記述される。

$$\ln(\rho) = a_1 + a_2 \cdot M \quad (1)$$

* 1 北海道立寒地住宅都市研究所 生産技術部、工修(正会員)

* 2 北海道職業能力開発短期大学校 建築科、工博(正会員)

* 3 北海道大学教授 工学部建築工学科、工博(正会員)

2.2 セメント硬化体の比抵抗と測定温度の関係

(1) 電解質溶液の比抵抗と測定温度の関係

ある電解質溶液の電気伝導度 K は比抵抗 ρ の逆数であり、電解質のモル電導率 Λ と濃度 C により式 (2) で記述される。溶液中の電解質が多種類である場合は、各電解質の電気伝導度 K の総和が溶液全体の電気伝導度となる。

$$K = 1 / \rho = \Lambda \times C \quad (2)$$

ここに Λ : 電解質溶液のモル電導率 ($\Omega^{-1} \text{cm}^2 \text{mol}^{-1}$) C : 電解質溶液濃度 (mol cm^{-3})

式 (2) に示した電解質溶液の電気伝導度は、イオン分布がボルツマン分布に従うものとした移動度 μ を用いることにより絶対温度 T を含む (3) 式で記述される。

$$K = 1 / \rho = \Lambda C = C |z e| \mu = C |z e| \mu_0 \exp(-U/kT) \quad (3)$$

ここに z : イオンの荷数 e : 電子の電荷

μ : 移動度 $\mu = \mu_0 \exp(-U/kT)$

U : 移動エネルギー k : ボルツマン定数 T : 絶対温度

式 (3) 中の絶対温度 T 以外の変数は各電解質固有の値を持つことから、濃度 C_i のある電解質溶液 i については、これらを定数 A_i 、 B_i として整理することができ、電解質溶液 i の電気伝導度 K_i は (4) 式に示す温度の関数として記述される。

$$K_i = A_i \exp(-B_i/T) \quad (4)$$

(2) セメント硬化体の比抵抗と測定温度の関係

セメント硬化体中の電解質溶液には数種の電解質が含まれ、溶液全体の電気伝導度 K は各電解質 i による電気伝導度 K_i の総和 K ($K = \sum K_i$) として得られる。式 (4) 中の A_i 、 B_i は各電解質の種類とその濃度により異なり、溶液全体の比抵抗と温度の関係を知るには溶液中の全ての電解質の種類とその濃度が既知である必要がある。しかし、ここで B_i の値が電解質の種類により大きくは異ならないと仮定すると、溶液全体の比抵抗 ρ はある温度範囲で近似的に (5) 式で表わすことができる。セメント硬化体の比抵抗はそこに含まれる電解質溶液の電気的性質に依存すると考えられることから、セメント硬化体の比抵抗の温度依存性も (5) 式で記述される。

$$\rho = a_3 \cdot \exp(a_4/T) \quad (5)$$

2.3 セメント硬化体の含水率、比抵抗、測定温度の関係

セメント硬化体の比抵抗 ρ の対数は、(1) 式から含水率に比例し、また、(5) 式から絶対温度の逆数に比例することが示された。ここで、含水率の変化による溶液全体の濃度変化が無視できるものと仮定すると、ある測定温度範囲で、セメント硬化体の含水率 M 、比抵抗 ρ 、測定温度 T の関係を記述する式 (6) が成立し、特定の試料において任意の温度で比抵抗を測定することにより含水率を知ることが可能となる。

$$\ln(\rho) = b_1 + b_2 \cdot M + b_3 / T \quad (6)$$

ここに b_1 、 b_2 、 b_3 ：特定の試料についての定数

2.4 電極形状と測定方法

本研究で用いる電極は鎌田らによるコンクリートの含水量を測定した研究[2]に基礎を置いており、それによると、使用する電極形状、測定抵抗値 R と比抵抗 ρ の関係は以下に示される。

$$R = \log(d/a) / (\pi \cdot l) \cdot \rho = Sf \cdot \rho \quad (7)$$

ここに a ：電極棒の半径 d ：電極間隔 l ：通電部長さ

Sf ：電極固有の形状係数 $Sf = \log(d/a) / (\pi \cdot l)$

また、測定にあたり、電解質溶液における測定と同様、電極における電解質の分極効果を避ける目的で、1 kHz程度の比較的高周波の交流を3 V以下の低電圧で印加する方法が望ましい。

3. 実験的検討

3.1 実験の目的

実験は大きく3に分けて行った。2章「理論的見地」では比抵抗の温度依存性として(5)式が近似的に成立すること、また、含水率 M の変化による溶液の濃度変化が比抵抗値に大きな影響を与えるものではないことを仮定し、含水率を比抵抗と測定温度の関数として記述する(6)式を誘導している。セメントペーストによる実験1はこれらの仮定を含む理論的見地を検証することを目的とする。また、コンクリートによる実験2ではコンクリートへの適用と測定温度範囲の影響を検討することを、さらに、電解質溶液による実験3はコンクリート中の含水分布測定の際に重要な電極の有効測定領域を確認することを目的とする。

3.2 実験計画及び方法

(1) セメントペーストによる実験

水和反応の進行による調湿期間中の空隙構造の変化を避ける目的で、長期材齢の供試体を用いた実験とした。水セメント比は30%、50%の2水準とし、試験体の調湿環境は水中養生直後、及び、相対湿度95%、90%、75%、66%の5水準とした。表1に実験計画を示す。試験体は4×4×16 cmの角柱体とし、中心部に電極と熱電対を埋設した。使用材料は普通ポルトランドセメント、水道水、混和剤は水セメント比30%にナフタレン系の高性能減水剤とした。混練成形後の試験体は材齢3ヵ月まで水中養生を行った後、所定の相対湿度環境下で定重量になるまで調湿した。測定温度範囲を2~20℃とし、温度変化を約1.7℃/時に管理した槽内で試験体温度、

電気抵抗の自動測定を行った。電気抵抗測定後の試験体は105℃絶乾とし重量含水率を算定した。

(2) コンクリートによる実験

表1に示す様に、水セメント比は28%、37%、55%の3水準とし、養生条件は水中養生、封緘養生の2水準、測定材齢は3日、1週、4週の3水準とし

表1 実験計画

セメントペースト		コンクリート		
水セメント比	調湿条件	水セメント比	材齢	養生条件
30%	水中	28%	3日	水中
50%	R.H.95%	37%	1週	封緘
	R.H.90%	55%	4週	
	R.H.75%			
	R.H.66%			

た。試験体は10φ×20cmのシリンダーとした。使用材料は普通ポルトランドセメント、水道水、細骨材として鶴川砂、粗骨材に常盤碎石を用いた。混和剤は、アミノスルホン酸系高性能AE減水剤を用いた。コンクリートの調合は単位水量を170kg/m³一定とし試し練により決定した。調合を表2に示す。混練成型後の試験体を所定の材齢まで養生した後、測定温度範囲を5～50℃とし、温度変化を約1.7℃/時に管理した槽内で温度、電気抵抗の変化を経時的に測定した。ただし、材齢3日の試験体については、測定中の水和反応進行による影響を考慮し測定温度範囲を20～5℃とした。測定後の試料は105℃絶乾とし重量含水率を算定した。

(3) 電解質溶液による実験

電極の有効測定領域内に電導体が存在する場合、測定抵抗値はその影響を受け小さくなることから、電導体であるステンレス製容器中に濃度を5水準に調製した塩化カリウム溶液を満ち、容器底面と電極との間隔を4～25mmの範囲で変化させ電気抵抗値の変化を測定し、非電導体容器中での同一溶液の測定抵抗値との比較から電極の有効測定領域を検討した。

3.2 測定に用いたシステム及び電極

実験に使用したシステムは温度可変槽、温度測定装置、電気抵抗測定装置、自動測定用コンピューターからなり、図-1にその概要と本実験に用いた電極形状を示す。電極はあらかじめ比抵抗が既知であるKCl 0.1N溶液によるキャリブレーションを行い、各電極固有の形状係数Sfを(7)式により決定した。

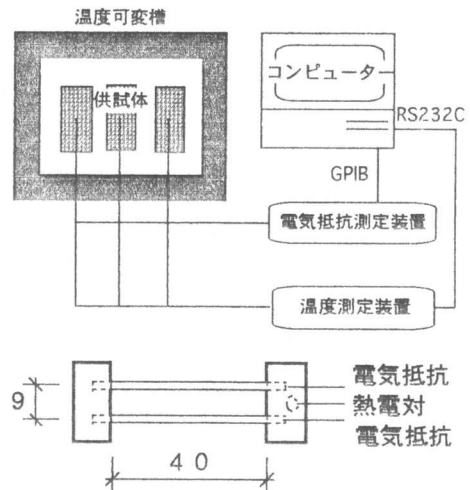


図1 測定システムの概要と電極形状

4. 実験結果及び考察

4.1 セメントペーストによる実験

(1) 比抵抗と測定温度の関係

比抵抗と測定温度の関係を水セメント比ごとに図2に示す。図中記号で示した実測値と実線で示した(5)式による近似値には極めてよい適合が認められることから、溶液中の電解質種類、及び、その濃度が既知ではなくとも比抵抗の温度依存性を記述する

(5)式が近似的に成立するものと考えられる。

(2) 比抵抗と含水率の関係

測定温度20℃での比抵抗の実測値、(1)式による近似値と重量法による含水率の関係を図

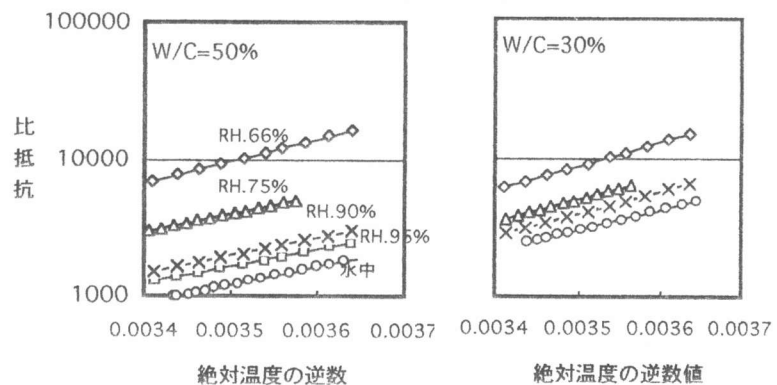


図2 比抵抗と測定温度の関係

表2 調合表

記号	水セメント比	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			重量 (kg/m ³)			混和剤 (C×%)
			C	S	G	C	S	G	
1	28%	170	193	261	356	607	686	943	2.5
2	37%	170	146	302	362	459	744	959	1.8
3	55%	170	98	356	356	309	936	943	1.8

3に示す。図中実線が(1)式による近似値であり、比抵抗の対数値と含水率は線形と考えられ、含水率の変化に伴う溶液の濃度変化を考慮せずに、(1)式により含水率と比抵抗の関係を評価することが可能であると考えられる。

(3) 含水率測定法としての精度

(6)式の各定数の最適値を重回帰分析により水セメント比ごとに解析し、比抵抗と測定温度から電極法による含水率を算定した。電極法による含水率と重量法による含水率の関係を図4に示す。重量法による含水率と電極法による含水率の差の標準偏差は水セメント比30%、50%でそれぞれ、0.1%、0.5%と良い適合を示し、理論的見地の適用を確認することができた。

4.2 コンクリートによる実験

比抵抗と測定温度の関係を水セメント比ごとに図5に示す。5~50℃の測定温度範囲では、いずれの水セメント比においても比抵抗の対数値と絶対温度の逆数値はリニアな関係からややはずれる傾向を示し、電極法を適用する温度範囲によっては測定誤差の原因になるものと考えられる。電極法による含水率と重量法による含水率の対応を、解析に用いた温度範囲ごとに図6に示す。

解析に用いた温度範囲が5~50℃の場合に電極法による含水率のばらつきが大きくなるものの、重量法との差の標準偏差は水セメント比55、37、28%でそれぞれ0.07、0.17、0.11%であった。

4.3 電解質溶液による実験

図7に、電導体と電極の間隔による溶液電気抵抗の変化を非電導

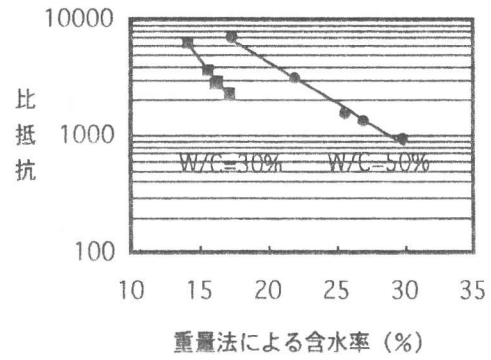


図3 比抵抗と含水率の関係

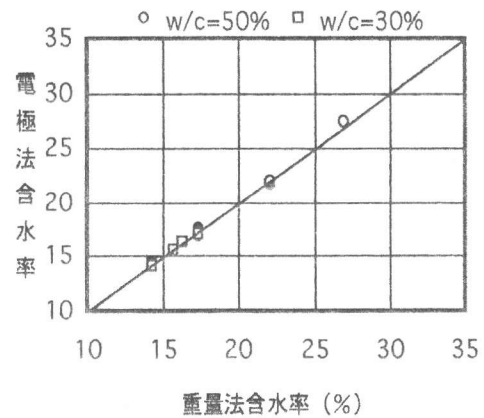


図4 電極法と重量法

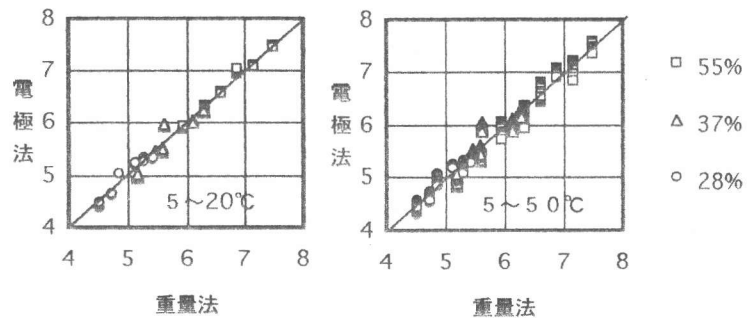


図6 コンクリートにおける電極法と重量法の対応

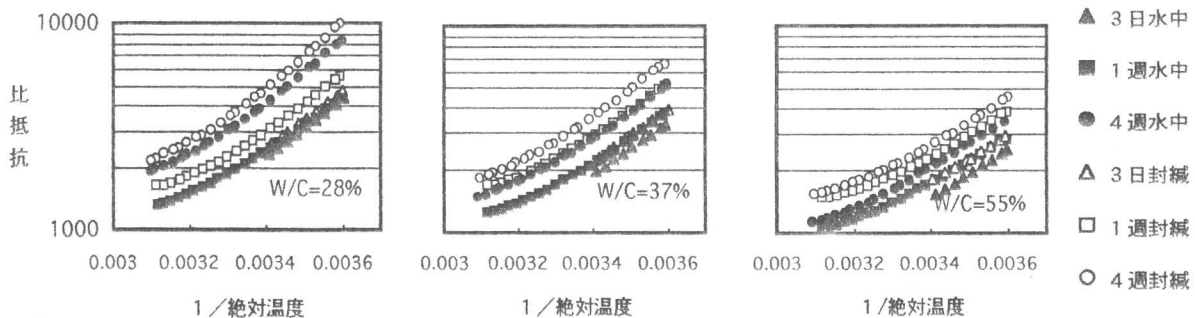


図5 コンクリートにおける比抵抗の温度依存性

体容器中での測定値に対する百分率で示す。溶液濃度によりばらつきはあるものの、電導体と電極の間隔が増すに従い測定抵抗値は大きくなり、距離が約20mm以上の範囲では非電導体容器中での測定値と等しくなることから、電極から20mm以上の距離にある物質の電気抵抗が測定値に与える影響は無視でき、本実験に用いた電極の有効測定範囲は半径20mm以下と考えられる。

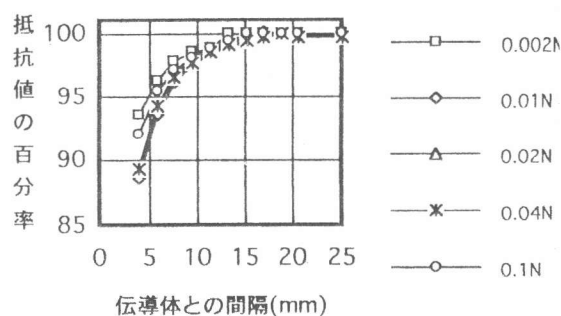


図7 電極の有効測定領域

6. 結論

以上の検討の結果、本研究は以下に要約される。

(1) セメント硬化体中に含まれる電解質溶液の量と電気的性質から交流2電極法による含水率測定法に関する理論的見地を示した。

(2) セメントペースト、コンクリートによる実験を行い、本研究で述べた理論的見地の成立とコンクリートへの適用を検証した。その結果、比抵抗、測定温度と含水率の関係を記述した(6)式を用いて含水率を測定する方法を示し、従来の温度による校正曲線の作成を不要とした。

(3) 本研究で用いた電極の有効測定領域が半径20mm以下であることを実験により確認した。

本研究で示した含水率測定法を、コンクリートの凍害に関する凍結水量の推定、構造体コンクリート中の含水分布と爆裂に関する耐火性能の評価、コンクリートの乾燥収縮と内部含水率分布変化の評価、構造体コンクリート中の水分移動の評価等に応用することが今後の課題と考える。

[参考文献]

- (1) 十代田三郎・十代田三知男・田村恭：モルタル及コンクリートの含水率の電気的測定法、日本建築学会研究報告、第34号、1955.11
- (2) 鎌田英治・田畑雅幸・中野陽一郎：コンクリート内部の含水量の測定、セメント技術年報 No. 30、1976
- (3) 桂修・鎌田英治・田畑雅幸：電極法によるコンクリート中の水分凍結量測定法、日本建築学会材料施工委員会コンクリート構造物の凍害とその対策シンポジウム論文集、1992.2
- (4) 笠井芳夫他：埋め込みセラミックセンサによるコンクリートの含水率測定方法、第20回セメント・コンクリート研究討論会、論文報告集、1993.11
- (5) 小野博宣他：「セメントモルタルの電気抵抗に及ぼす測定条件の影響」、セメントコンクリート論文集、No. 46、1992
- (6) 加藤聡他：「電気抵抗法によるセメントモルタルの含水特性の評価」、日本建築学会大会学術講演概集、1993
- (7) C.Tashiro, et al.: Dependence of the electrical resistivity on evaporable water content in hardened cement pastes, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS, 6, 1987
- (8) ムーア 物理化学：W. J. Moore著、藤代亮一訳、東京化学同人第4版、1991
- (9) 電気化学(第2版)：玉虫伶太、東京化学同人、1991
- (10) 材料と水分ハンドブック-吸湿・防湿・調湿・乾燥：高分子学会、高分子と吸湿委員会編、共立出版株式会社、1968