

論文 小ステンレス電極を用いたコンクリートの含水率測定

笠井芳夫*¹・松井勇*²・湯浅昇*³・佐藤弘和*⁴

要旨：筆者らはこれまでセラミック素子を用いた含水率測定方法について研究を行ってきた。その結果、コンクリート内部の含水率分布を明らかにすることができた。本研究は、更にコンクリート内部の含水率分布を局部的に測定するため、直径0.7mm、長さ20mmのステンレス製小電極を用いた含水率測定センサを開発し、試験時の温度、印加電圧、電極の近くにある金属片の影響、比抵抗の変動係数について検討した。

キーワード：コンクリート、埋込式含水率計、含水率、比抵抗、試験方法

1. はじめに

コンクリート中の自由水は、コンクリートの強度発現や中性化、収縮とクリープの進行、鉄筋の発錆、凍結融解作用による劣化、アルカリ骨材反応の進行などコンクリート構造物の耐久性、各種内装及び外装仕上げ材の剥離やふくれなどの劣化を決定づける重要な要因である。

コンクリートの自由水量の測定は、直接コンクリートを105℃で絶乾にして減量を求めるほか、非破壊で求める技術もある[1]。非破壊による測定技術は、①水分を電気的に測定する方法[2]・[10]、②コンクリート内部に設けた小空間の湿度を測定する方法[11]・[12]、③コンクリート表面に張りつけた水分試験紙による方法[13]・[14]、④水による中性子の減衰を利用する方法[15]、⑤マイクロ（電磁）波照射による方法[16]などに大別され、使用目的や対象によって選択される。しかし、これまでの方法ではコンクリート内部の含水率を局部的に細かく測定するのには限界がある。塗料、接着材の施工時期の判定やその劣化メカニズムの解明研究等では、コンクリート内部はもとより表面付近の含水率を、局部的に細かく、長い期間にわたり測定を必要する場合がある。

本研究は、コンクリートに埋め込んだ直径0.7mm、長さ20mm、中心間隔2mmの小ステンレス電極の比抵抗と温度を用いて、コンクリートの含水率の算出を理論に求めたものである。

2. 小電極による測定原理と測定回路の試作

2. 1 既往の研究

図-1のようなステンレス製小電極をコンクリートに埋め込み、電流を流すと、電極間に存在する導体（主として含有水分）を通して電流が流れる。電極の径を a 、間隔を d 、通電部長さを ℓ とし、 $a \ll d \ll \ell$ と仮定すれば、比抵抗 ρ の導体に埋め込まれた電極間の抵抗 R は、式(1)によって示される。

$$R = \frac{\log d/a}{\pi \cdot \ell} \cdot \rho \quad (1)$$

* 1 日本大学教授 生産工学部建築工学科、工博（正会員）

* 2 日本大学教授 生産工学部建築工学科、工博（正会員）

* 3 日本大学助手 生産工学部建築工学科、工修（正会員）

* 4 日本大学大学院 生産工学研究科建築工学専攻

ここに、 $(\log d/a) / (\pi \cdot l)$ は、定数で電極によって固有の値をとる。

ここで検討する方法は、コンクリートの含水率が大きくなるほど比抵抗が小さくなることにもとづき、あらかじめ求めておいたコンクリートの含水率と比抵抗との関係に対応させ、比抵抗を測定して含水率を求めるものである。

この方法は、十代田ら[2]、笠井ら[3]が既に1950年代に報告したが、その後、鎌田らが完成度の高い方法として提案[4]し、理論的検証を行っている[17]。

2. 2 小電極及び測定回路の試作

鎌田らの作製した電極は、文献4では直径1.5mm、長さ75mm、間隔7.5mm、文献17では、直径1.5mm、長さ40mm、間隔9mmである。本研究で用いた電極を図-1に示す。電極間隔は電極の中心間距離で2mmとし、電子機器用プリント基盤と直径0.7mmの虫ピン状のステンレス棒を用いて、通電部長さ20mmの電極を作製した。この電極は、任意の隣あう電極棒を一对の電極とすることができ、2mm間隔で連続して含水率分布の測定が可能である。

式(1)より、コンクリートの電極間の比抵抗 ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)は図-2に示す回路において電圧 V_1 (V)を印加し、この時の既知抵抗 R_0 (Ω)に対する電圧 V_2 (V)を測定し、式(2)によって比抵抗 ρ を求めた。印加電圧 V_1 及び電圧 V_2 の測定には、ADVANTEST R-6450デジタルマルチメーターを用いた。

$$\rho = \frac{R_0}{C} \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_2} \quad (2)$$

ここで C は、式(1)における電極の形状係数($1/\text{cm}$)であり、コンクリート埋め込み前に、比抵抗既知な希薄溶液(0.02規定塩化カリウム溶液：20℃、 $400 \Omega \cdot \text{cm}$)中で予め求める。

なお、ここでは既知抵抗 R_0 として 560Ω の抵抗を用いた。

3. 試験方法の検討

3. 1 印加電圧の検討

図-3は、前述の0.02規定塩化カリウム溶液により測定した印加電圧 V_1 と形状係数 C との関係を示したものである。この試験では、印加電圧の上昇とともに形状係数は低下し、3V以上では変化量が小さくなった。しかし、イオン分極防止の点からは、なるべく低い交流電圧を採用することが望ましい。以

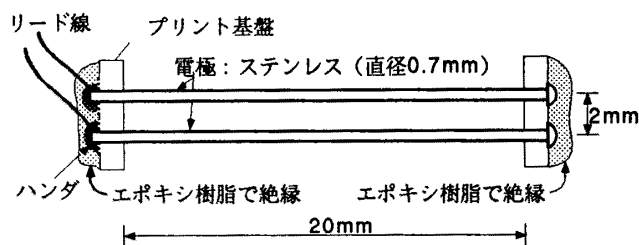


図-1 ステンレス製電極

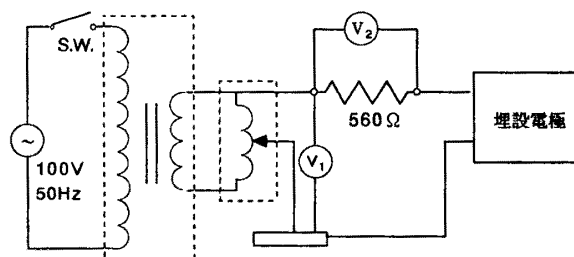


図-2 測定回路

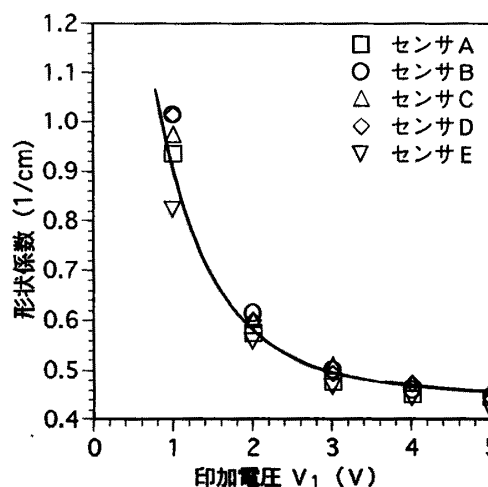


図-3 印加電圧と形状係数の関係

上のことから印加電圧は、交流3Vとした。

3. 2 コンクリートの比抵抗と質量含水率の対応

コンクリートの比抵抗と質量含水率の対応を求めるため、プリント基盤に2mm間隔で固定した10本の電極棒を中央に埋め込んだ $5 \times 4 \times 2$ cmのC:S=1:6モルタル試験体(W/C=60%、単位水量 185 kg/m^3)を作製した。この試験体を材令3日から2日間、7段階で乾燥し、その後封かん養生した。隣あう電極棒を一对の電極として比抵抗の測定を行い、初期の乾燥・養生方法に応じた供試体の比抵抗が、表面からの距離によって変化しなくなった後に 105°C の乾燥炉内で試験体を絶乾とし、質量含水率を求め、比抵抗の平均と質量含水率との関係を求めた(図-4)。

両者は下に凸な曲線をなし、試作した小電極によりコンクリートの含水率の測定が可能であることを示している。

桂・鎌田らは含水率Mと比抵抗 ρ 、測定温度Tとの関係式を提示している[17]。この式に基づき、実験結果を検討したところ、比抵抗を ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)、質量含水率をM (%) とすると、式(3)が作られ、相関係数0.98となった。

$$M = -1.73 \cdot \log_e \rho + 19.5 \quad (3)$$

4. 試験結果に及ぼす影響要因の検討

4. 1 測定時の温度の影響

図-5に、測定時の温度と比抵抗の関係を示す。同一の含水率であっても温度が上昇すると比抵抗が小さくなる。この傾向は低含水率ほど著しい。

このように、温度依存性が極めて高いことから任意の温度で測定した比抵抗を 20°C における比抵抗に補正を試みた[7]。図-6に、絶対温度Tの逆数とその温度での比抵抗 ρ_T の自然対数の関係を示す。同一含水率に対し直線性が見られ、これらは相互にほぼ平行であった。これらの直線は、Rを気体定数とすると、式(4)で表すことができる。

$$\rho_T = A \cdot \exp(-E/R_T) \quad (4)$$

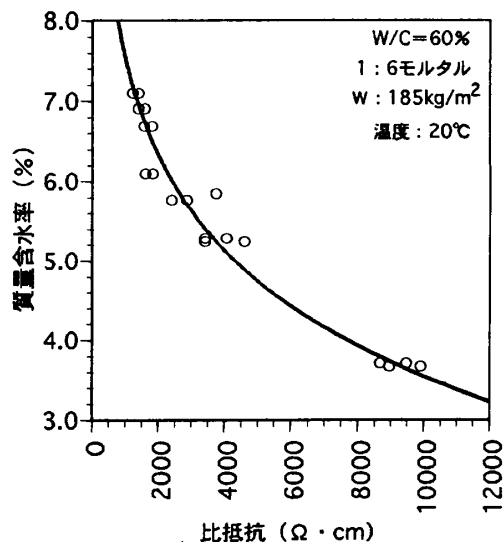


図-4 比抵抗と質量含水率の関係

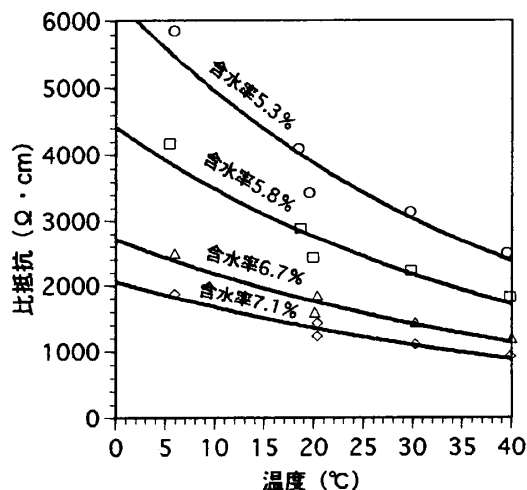


図-5 測定時の温度と比抵抗の関係

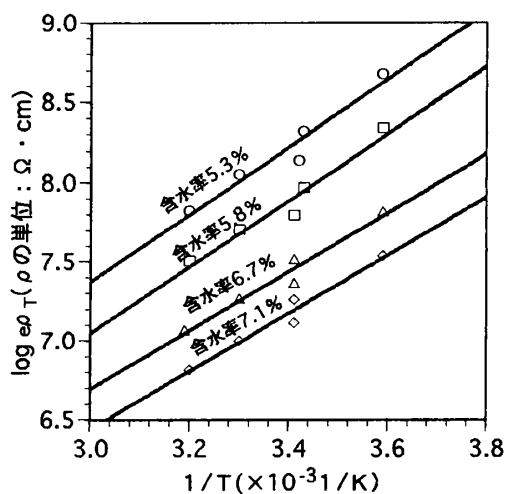


図-6 Arrheniusプロット

これは、いわゆるArrhenius式で、係数Aは含水状態によって異なる。この結果から、任意の温度T (K)で測定したコンクリートの比抵抗 ρ_T ($\Omega \cdot \text{cm}$) は式(5)を用いて20℃ (293 K)における比抵抗 ρ_{293} に補正することが可能である。

$$\rho_{293} = \rho_T \cdot \exp(-1.98 \times 10^3 (1/T - 1/293)) \quad (5)$$

よって、式(3)、式(5)より、任意の温度T (K)で測定した比抵抗 ρ_T ($\Omega \cdot \text{cm}$) に対するコンクリートの質量含水率M (%) は、式(6)で求めることができる。

$$M = -1.73 \cdot \log_e \rho_T + 3.43 \times 10^3 / T + 7.79 \quad (6)$$

4. 2 電極が近接金属の影響を受ける範囲

コンクリートの比抵抗の測定に際し、近くの金属が測定値に影響を与える範囲を確認するため、20℃の0.02N塩化カリウム溶液中で、電極面に対して垂直及び平行な方向から鉄板、ステンレス板、銅板を近づけた。

その結果、図-7に示すように、垂直方向からの接近に対して2次電圧は明らかな妨害を受けず、平行な方向からの接近に対しては電極の中心から5mm以内で、若干2次電圧が大きくなる（比抵抗は小さくなる）傾向があった。なお、金属の違いによる影響はみられなかった。

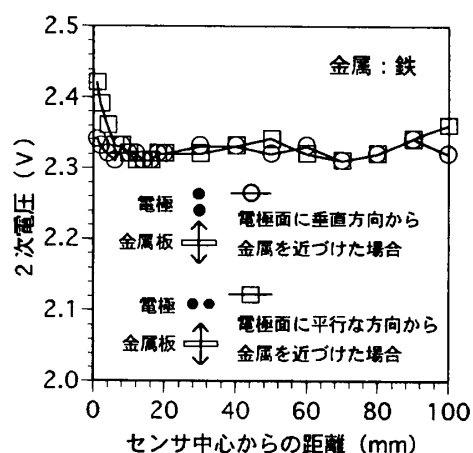


図-7 金属の影響

4. 3 比抵抗の変動係数

W/C=60%・C:S=1:3モルタル (4×4×16cm) の表面より2cmの部分に、34対の電極をモルタル表面に対して平行に埋め込み、打設直後からこの一面のみを20℃、R.H.=60%の恒温恒湿室で乾燥させた時の比抵抗の変動係数を調べた(図-8)。その結果、変動係数は打設直後から半日まで増加し、その後13%近くで安定した。これを含水率の変動係数に換算すると、0.2%程度である。

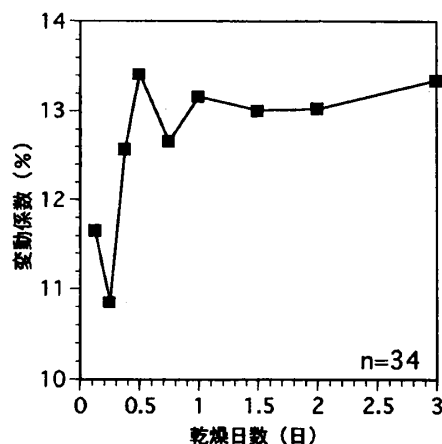


図-8 比抵抗の変動係数

5. 含水率の測定例

5. 1 実験の概要

(1) 電極の配置と固定

プリント基盤に図-9に示す間隔で電極棒を固定し、電極を構成した。これを図の上部がコンクリートの乾燥表面となるように、型枠内に細いプラスチック棒等の補助材を用いて固定した。

(2) コンクリートの調合及び乾燥

コンクリートの調合を表-1に示す。このコンクリートを

20℃、R.H.=60%の恒温恒湿室内で50×15×15cmの型枠に打設し、打設上面（50×15cm）を打設直後から乾燥させた。

(3) 含水率の測定と算出

測定された比抵抗から、式(6)を用いて質量含水率を算出した。

表-1 調合表

w/c (%)	単位 水量 (kg/m ³)	絶対重量 (kg/m ³)			混和剤 (cc/m ³)	
		セメント	細骨材	粗骨材	No.70	No.303A
60	185	308	838	957	770	38

No.70：N社製AE減水剤

No.303A：N社製空気調整剤

5. 2 実験結果

図-10は、乾燥過程における含水率分布の経時変化を示している。質量含水率は表面から急激に低下していることがわかる。ただし、含水率4%以下となると測定が不可能であった。これは測定装置の特性によるものと思われ、検討を必要とする。

しかし、これまでの方法に比し、局部的に細かく含水率分布を測定できるので、コンクリートの極く表面近くの水分の乾燥・湿潤や塗料・接着剤の施工時期、劣化のメカニズムの解明等に適用が期待される。

6. まとめ

一対のφ0.7mm-ステンレス電極棒を用いて試作した小電極によるコンクリートの含水率測定の実験研究結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) 測定時の印加電圧は交流50Hz、3Vが適当であった。
- (2) コンクリートの比抵抗 ρ とコンクリートの質量含水率との関係は下に凸な曲線を示す。
- (3) コンクリートの比抵抗と測定時の温度の関係は、Arrhenius式によく対応する。
- (4) コンクリートの比抵抗と測定時の温度から、質量含水率を算出することが可能である。
- (5) 電極に金属が接近した場合、電極に対して垂直方向ではほとんど影響を受けないが、平行方向では5mm以内で2次電圧が高く、比抵抗が小さくなる傾向があった。
- (6) 試作した小電極によりコンクリートの局所的な含水率が測定できる。

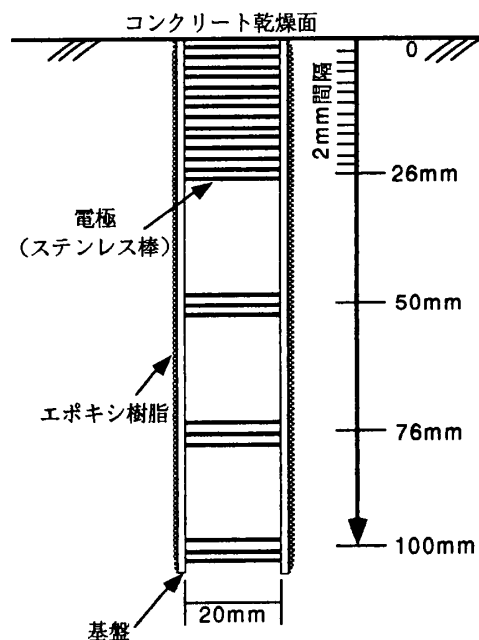


図-9 含水率測定用センサ

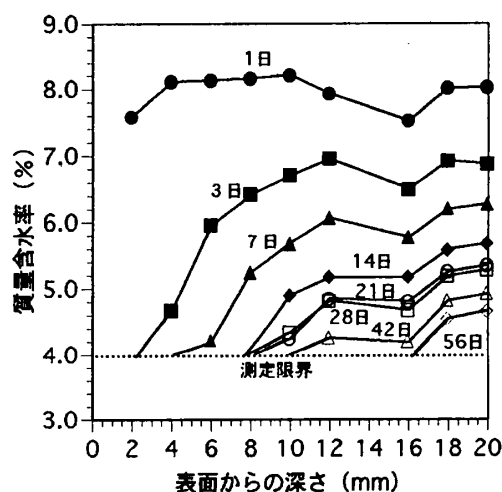


図-10 含水率分布の経時変化

謝辞

本研究の一部は、平成6年度文部省科学研究費（一般研究（C）：代表笠井芳夫）の交付を受けて行ったものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 湯浅昇・笠井芳夫：非破壊による構造体コンクリートの水分測定方法、コンクリート工学、Vol. 32、No. 9、pp. 49-55、1994. 9
- 2) 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、日本建築学会関東支部研究発表会（第1報、昭和30年2月、pp. 139-142、第2報、昭和30年9月、pp. 41-44、第3報、昭和31年2月、pp. 33-36）
- 3) 笠井芳夫・寺内良郎・横山清：モルタルおよびコンクリートの乾燥に関する研究、日本建築学会関東支部報告（第1報～第3報、昭和37年、pp. 9-20、第4報～第6報、昭和38年、pp. 13-20）
- 4) 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XXX、pp. 288-292、昭和51年
- 5) 中根淳・長尾覚博・一瀬賢一・鄭尚鎮：コンクリート構造体の含水率測定、セメント・コンクリート、No. 473, July, pp. 8-14, 1986
- 6) 小野博宣・加藤聡・大岸佐吉：セメント硬化体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. 47、pp. 260-265、1993
- 7) 湯浅昇・笠井芳夫・松井勇・小井戸純司・青木公彦：コンクリートの含水率測定用セラミックセンサ開発、第47回セメント技術大会講演集、pp. 274-279、1993
- 8) 杵掛文夫・千歩修・熊谷敏男：注入補修界面の含水率測定方法の一提案、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp. 313-314、1989年
- 9) 小池迪夫・田中享二・橋田浩・但野浩一：温度勾配のある仕上げ材下地コンクリートの含水状態に関する実験的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp. 93-94、昭和62年
- 10) Millard, S.G. Durability performance of slender reinforced coastal defence units. SP109-15, American Concrete Institute, pp. 339-366, 1988
- 11) 椎名国雄：コンクリートの内部湿度と変形、コンクリートジャーナル、Vol. 7, No. 6, pp. 1-11, 1969年
- 12) 平賀友晃・三浦勇雄・坂巻政義：発色紙によるコンクリートの湿度及び含水測定方法に関する研究、セメント技術年報38、pp. 198-201、1984年
- 13) 笠井芳夫・松川忠文・柴田修身・蒲原博行：水分試験紙によるコンクリートの水分測定方法、日本大学生産工学部学術講演会、1983, 1986
- 14) 笠井芳夫・松井勇・逸見義男・湯浅昇・佐藤弘和：乾燥度試験紙を用いた構造体コンクリートの水分蒸発速度測定方法の提案（その1、その2）日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp. 1291-1294、1994
- 15) J.H. Bungey, Testing of concrete in structures 2nd Edition, Surry University Press, pp. 148 1989
- 16) 村田雄二：マイクロ波吸収式水分計、計測技術、1988年増刊号、pp. 163-165
- 17) 桂修・吉野利幸・田畑雅幸・鎌田英治：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 1、pp. 735-740、1994