

論文

[1072] コンクリートの電気抵抗に及ぼすセメント種別、調合及び空気量の影響

正会員 大岸 佐吉 (名古屋工業大学)
 正会員 小野 博宣 (中部大学建築学科)
 正会員 ○文 堅 (名古屋工業大学大学院)

1. まえがき

コンクリートの凝結特性や水和の進行状況および硬化後の含水状態などを電気的特性、つまり電気抵抗や電気容量により調べるのが試みられている [1~13]。しかし、電気的特性に及ぼす要因は複雑多岐にわたり、各要因の寄与が個別に明かにされおらず基本的資料が未整備のためはまだ実用の段階にはない。筆者は既にセメントペーストとモルタルの電気的測定法の基本について一部を報告した [14]。

本研究の目的は、セメントモルタルまたはコンクリート中に電極を埋め込み、これらの電気抵抗に及ぼすセメント種別、モルタルの砂率、コンクリートの粗骨材率及びモルタルの空気量の影響などを実験的に明かにすることにある。また、モルタルの硬化過程における動弾性係数 (E_d) と電気抵抗との関係を検討した。

2. 実験方法

2.1 使用材料

本実験に使用したセメントは普通ポルトランドセメント (OPC)、アルミナセメント (AC)、超即硬性セメント (Jet) および高炉セメント B 種 (BFC) の 4 種類である。細骨材には珪砂 (最大寸法 0.3mm)、最大寸法 5mm 以下の川砂及び高炉スラグ砂の 3 種類を用いた。粗骨材には川砂利 (寸法 5mm 以上 10mm 以下)、磁器製ボール (径 16mm) を用いた。

2.2 供試体の作製と測定方法

電極は図-1に示すようにステンレス鋼板 (SUS 304H、 $t=0.15\text{mm}$) を所定寸法に切断し、プラスチック板により所定の間隔に保持するように組み立てたものである。電極の有効面積は $20 \times 20\text{mm}$ である。電極の対向面以外からの電流が遮えぎらないように、電極間隔保持用のプラスチック板の全面に径 3.5mm の穴を多数に設けた。モルタルとコンクリートの重量調合比は、特記しない限りそれぞれ $C/S/W=1/2/0.6$ 及び $C/S/G/W=1/2/2.5/0.5$ である。また、粗骨材自身の電気抵抗を実測するために、砂岩を断面 $18 \times 20\text{mm}$ の角柱 (長さ可変) に切断した。また、磁器製ボールを相対面が平行となるようにボールを若干切り落とし、両端面に銀ペーストを用い、リード線を固着した。比重の異なる骨材を使用する場合は、体積比 $V_c/V_s/V_w=1/2.1/0.8$ を一定に保つようにした。供試体寸法は 40×40

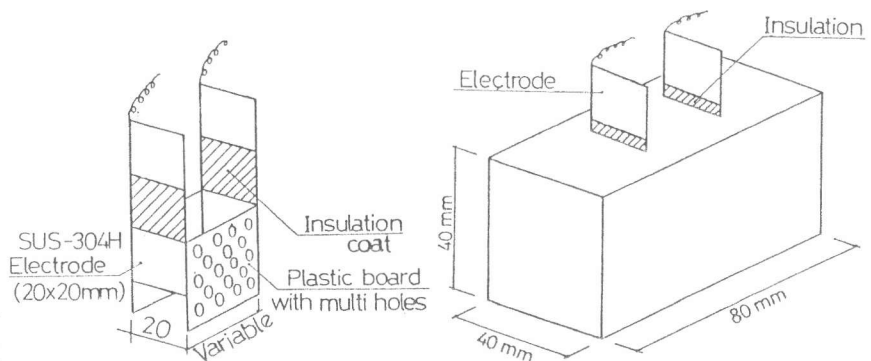


図-1 (a)電極の構成 (b)試料中へ電極埋込

x80mmを基本とする。但し、実験目的に応じて異なる寸法のものも作製した。鋼製型枠中の所定の位置に電極を設置し、コンクリートを打ち込み後、20°C、RH=80%の湿空中で養生し、打設の直後から所定の時間間隔ごとに電気抵抗を材令28日まで連続的に測定した。電気抵抗の測定は、直流使用のLCRメータによった。このLCRメータの測定できる上限は2MΩである。

2.3 実験事項と実験条件

(1) セメント種別がモルタルの凝結性と導電性に及ぼす影響

セメントモルタルとコンクリートの両者の電気抵抗に及ぼすセメント種別の影響を、打設直後から28日材令までを通じて明かにする。

(2) セメントモルタルの動弾性係数

セメントモルタルの硬化過程における動弾性係数 (E_d) を、打ち込み直後から28日材令まで共振周波数測定により求め、 E_d と電気抵抗の関係を調べた。試片体の寸法はφ10x20cmである。

(3) 骨材種別の影響

(a) 細骨材種別：珪砂、川砂、高炉スラグ砕砂の3種類を用いた。(b) 粗骨材種別：川砂利、高炉スラグの2種類を用いたセメント硬化体の電気抵抗に及ぼす骨材種別の影響を調べた。また、(c) 絶縁性の高い磁器製ボールをモルタル中に混合し、その電気抵抗への影響度を調べるために2電極板距離60mm内にボールを1個、2個、8個、12個の4種類の配列形式について実験した。(d) 含水率の異なる砂岩自体の電気抵抗を、試料の長さ14~50mmについて測定した。

(4) 水セメント比の電気抵抗への影響

普通セメントを用いたセメントモルタルの水セメント比が電気抵抗に及ぼす影響を調べるためにW/C=0.4, 0.5, 0.6, 0.7の4種類について電気抵抗を測定した。

(5) セメントモルタルおよびコンクリートの骨材量の電気抵抗への影響

砂率(S/C)が1.2, 1.6, 2.0, 2.4の4種類のモルタルの電気抵抗を調べた。またコンクリートの場合は、全骨材容積に対する粗骨材の容積比 $[V_G / (V_S + V_G)]$ が0.75, 0.5, 0.25の3種類について電気抵抗への影響を調べた。

(6) セメントモルタルの空気量の影響

モルタル中の空隙量が電気抵抗に及ぼす影響を調べるために、AE剤を適量モルタルに混合することにより連行させた各種の空気量の供試体について、水中と気中の両養生下で電気抵抗の材令に伴う変化を測定した。

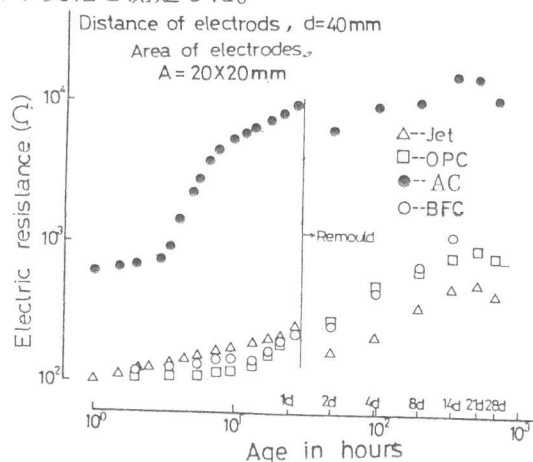


図-2 四種類のセメントモルタルの電気抵抗の経時変化

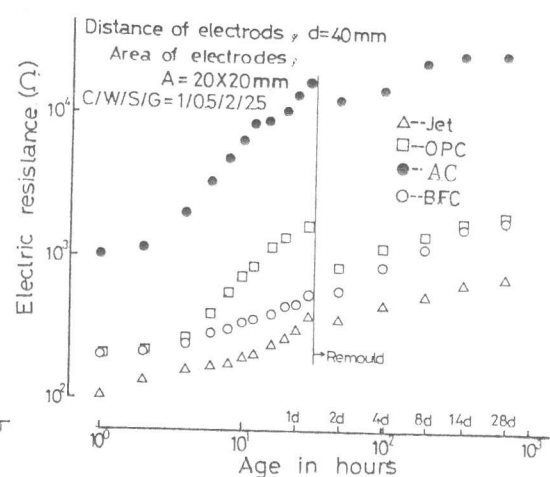


図-3 四種類のセメントを用いたコンクリートの電気抵抗の経時変化

3. 実験結果及び考察

3.1 セメント種別の影響

図-2は普通ポルトランド、超即硬性、高炉スラグB種およびアルミナの各セメントを用いた4種類の水養生モルタルの材令に対する電気抵抗の変化を示す。セメント種別がモルタルの電気抵抗に影響を及ぼし、普通ポルトランド、超即硬性、高炉スラグB種の三種類のモルタルの電気抵抗の経時変化は互いに類似した傾向をもつ。抵抗値は僅少の差ではあるが材令1日まではOPC>BFC>Jetの順に大きくなっている。これに対して、アルミナセメントモルタルの電気抵抗は凝結開始と同時に急激に増大し、大きな抵抗値をもつ特異な性状を示す。このことは文献[2]と[11]でも指摘している。また脱型直後に抵抗値が不連続に僅かに減少している。これは鋼製型枠の通電性に関係があると思われる。

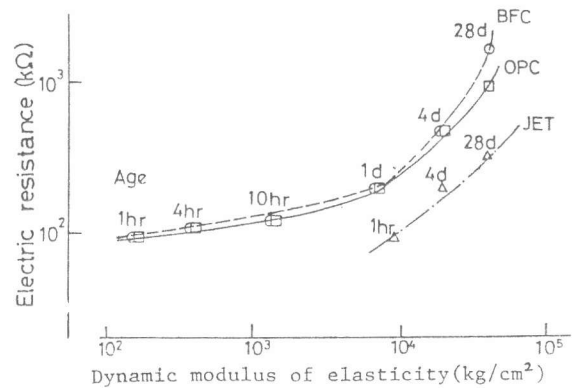


図-4 E_d と電気抵抗の関係

図-3は4種類のセメントを用いたコンクリートの電気抵抗の経時変化を示す。この図にみる如く、コンクリートの電気抵抗はモルタルよりも大である。これは電氣的不良導体である骨材の占める容積の多さによるものであり、この結果は妥当と考えられる。

3.2 モルタルの動弾性係数 E_d と電気抵抗の関係

図-4は共振法で求めた3種類のセメントモルタルの動弾性係数 E_d と、 E_d 測定時と同一材令におけるモルタルの電気抵抗の関係を示す。動弾性係数(E_d)が $(1\sim5) \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 以下では、抵抗値はほとんど変化しないが、 E_d がこれより大きくなると抵抗値は急激に増大する。 E_d は水和物結晶の成長に依存し、一方抵抗値は電離物質とその濃度に支配されると考えられるので、時間に対して互いに異なる依存特性を有すると理解される。

3.3 コンクリート粗骨材の個数と配置の影響

図-5は、2電極間に配置した磁器製ボール入りモルタルの電気抵抗の時間変化である。この図に示す如く、電極間に配置した磁器製ボールの数が多きほど電気抵抗が大きくなることが認められる。これは磁器製ボールの電氣的不良導性によるものであり、妥当な結果である。ちなみに、磁器球14mm間の抵抗値は $2 \text{ M}\Omega$ 以上であり、抵抗値は非常に大きい。図-6は図-5の結果から描き直した電気抵抗と配置したボール数との関係を示しており、明確な結果をえた。

図-6は図-5の結果から描き直した電気抵抗と配置したボール数との関係を示しており、明確な結果をえた。

図-7はコンクリート粗骨

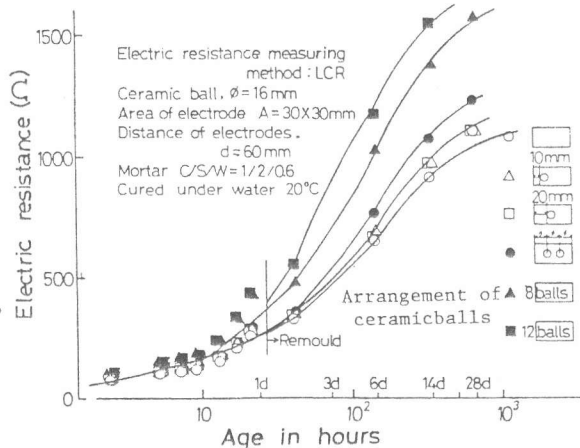


図-5 磁器製ボール入りモルタルの抵抗

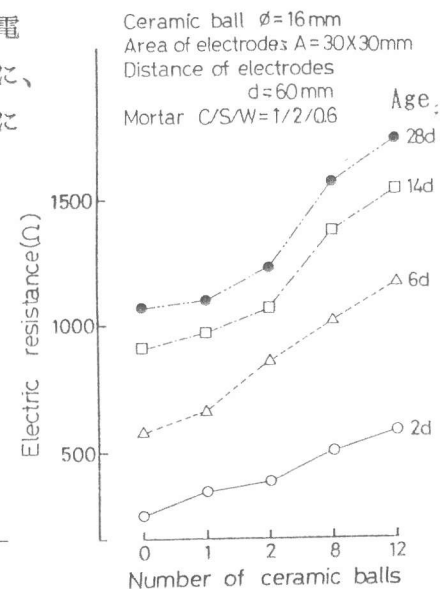


図-6 ボール数と電気抵抗の関係

材として用いた砂岩自体の電気抵抗を、含水率別に、試片の長さとの関係で示したものである。この図に示すように、砂岩の試料が長いほど電気抵抗は直線的に増大する。次に

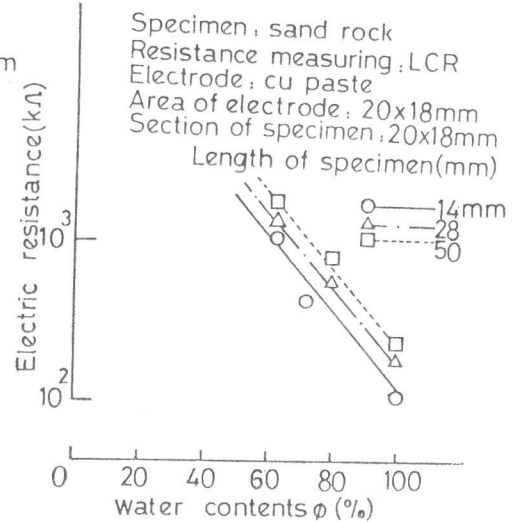
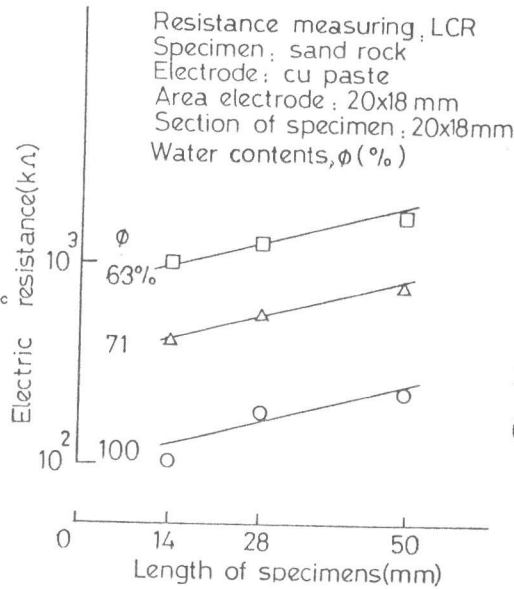


図-8は図-7の

図-7 砂岩骨材の長さ

と電気抵抗の関係

結果から描いた砂岩骨材の含水率 ϕ と電気抵抗の関係を示す。この図によれば、砂岩骨材の含水率が大きいほど電気抵抗は小さくなる。つまり、砂岩自体の電気抵抗値は、普通セメントモルタルの抵抗値に比べ、約700~2000倍である。この結果より、粗骨材は電気的不良導体であることが確認される。すなわち、コンクリートの電気抵抗値は、ほぼ硬化体中のセメントペーストの抵抗によって定まるといえる。

3.4 水セメント比の影響

異なる4種類の水セメント比のモルタルの電気抵抗を図-9に示す。打ち込みから脱型までの電気抵抗値は、水セメント比に関係なく、ほぼ一定値を示しているが、これは鋼製型枠の通電性に影響されているのではないかと推定される。しかし、脱型後の電気抵抗は W/C 値に明確に依存することが認められる。この図によれば材令の進行とともに電気抵抗値は大きくなっている。

図-10はモルタルの水セメント比と電気抵抗の関係を図-9から書き直しものである。 W/C が大なるほど電気抵抗は小さい。このことは文献 [6] と [7] でも報告している。このことから本実験の範囲内では硬化したセメントモルタルとコンクリートの W/C を電気抵抗により推定しうる可能性がある。

3.5 モルタルとコンクリートの重量調合比の影響

電気抵抗に及ぼすモルタルの S/C の影響を図-11に示す。この図によると、4種類

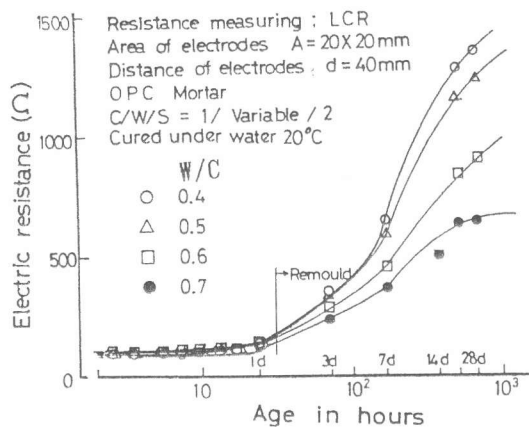


図-9 モルタルの電気抵抗の経時変化

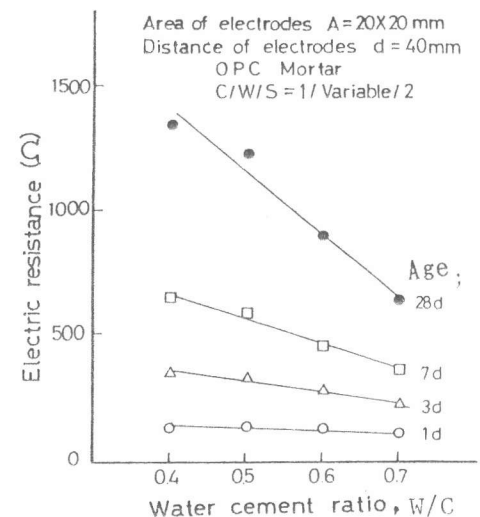


図-10 W/C とモルタルの電気抵抗の関係

電気抵抗の経時変化は類似した傾向を示している。本実験の範囲ではモルタルのS/Cが電気抵抗値に及ぼす影響

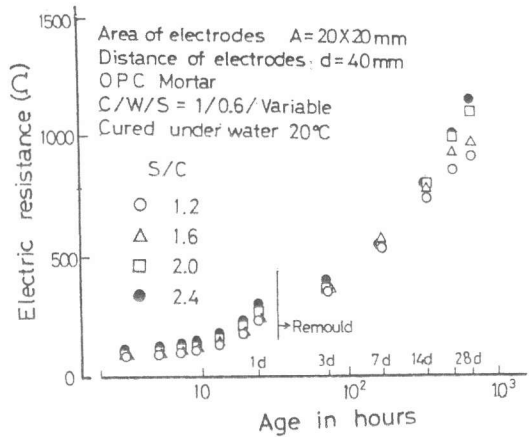


図-11 異なるS/Cの電気抵抗と材令の関係

は、材令の初期で判然としないが、高材令において次第に明瞭になる。図-12は図-11を描き直し、モルタルの電気抵抗のS/C依存性を材令別に示したものである。高材令ほど、S/Cの寄与が顕著となる。次に、異なる粗骨材容積比のコンクリートの電気抵抗の材令変化を図-13に示す。異なる粗骨材容積比をもつコンクリートの電気抵抗値は高材令ほど明確に粗骨材量に影響されることが認められる。図-14は、図-13から材令別に粗骨材量と抵抗値の関係に表し直したものであるが、粗骨材量が増すほど電気抵抗が増大する。この傾向は、モルタルのS/Cの影響に類似している。ただ、図-14のコンクリートの電気抵抗値は、図-12のモルタルの抵抗よりも大である。これは単位の硬化コンクリート中に占める骨材量の多さの故であり、合理的と考えられる。文献 [6] も粗骨材量が電気抵抗に影響することを報告している。

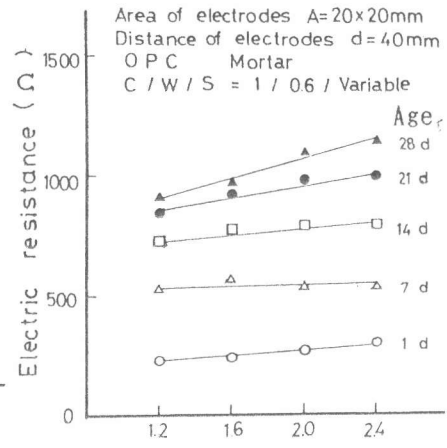


図-12 電気抵抗とS/Cの関係

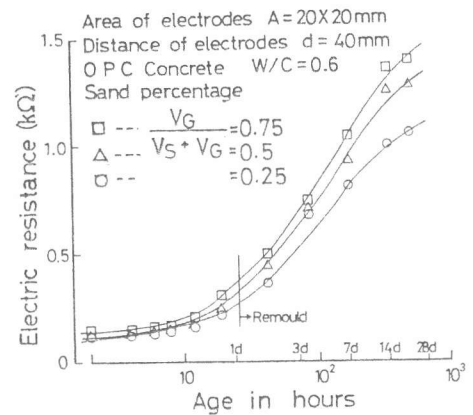


図-13 三種類の粗骨材量と電気抵抗

3.6 電気抵抗に及ぼすモルタルの空気量の影響

本実験では、モルタルの練り混ぜ時に、異なる量のAE剤を添加して、4段階の空気量をもつ供試体を作製した。AE剤無添加の場合を空気量0%（容積百分率）とし、各供試体の空気量を算定した。空隙率は次式によって求めた。AE剤を添加しない硬化試料の飽水容積を V_0 、その

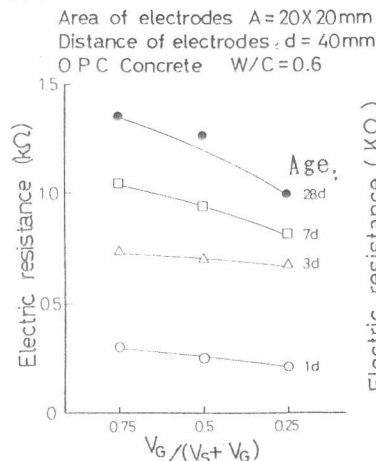


図-14 粗骨材量と電気抵抗

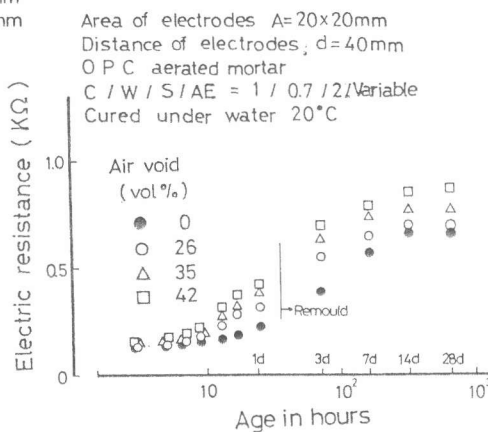


図-15 気泡モルタルの電気抵抗の変化

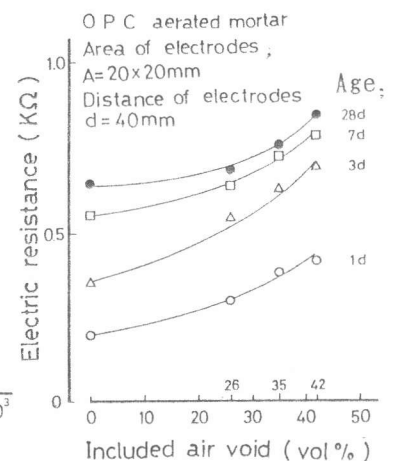


図-16 空気量と電気抵抗

絶乾重量を W_g とすると、このモルタルの見かけ乾燥比重は $\rho_g = W_g / V_g$ となる。次にA E 剤を添加した硬化モルタルのこの両値を v と w とし、 $\rho = w / v$ である。よってA E 剤添加モルタルの空隙率 $\nu = [(\rho_g - \rho) / \rho_g] \times 100 (\%)$ として算定した。図-15は気泡モルタルの水中保存下における電気抵抗の材令変化を示す。この結果によれば電気抵抗は空隙率に影響される。この実験モルタルの空隙率は $\nu = 0, 26, 35, 42 (\text{Vol}\%)$ の4段階である。図-16はモルタルの空隙率と電気抵抗の関係を材令進行別に示したものである。電気抵抗は空隙率が高いほど大である。この理由として、空隙はセメントの可溶性成分液で充分満たされていると考え、モルタルの通電性は、空隙内の液よりもセメント水和組織の方が電気的良導体であると推定する立場と、もう一つは空隙率の大きいモルタルほど空隙内により多くの空気が残っているためと考える二つの立場がある。本実験では真の原因は明かでないが、28日間水中浸漬で試料中に空気を残すとは考え難いので、筆者は前者の立場で理解している。調合と材令が明かな場合、電気抵抗からセメントモルタルの空気量を推定し得る可能性がある。

4. 結論

1) セメント硬化体の電気抵抗はセメント種別によって異なり、抵抗値の大きさの順はアルミナセメント>普通セメント>超即硬性セメントである。また、コンクリートの電気抵抗はモルタルよりも大である。

2) 磁器製ボール入りモルタルの電気抵抗は、2電極間に配置する磁器製ボールの数が多いほど、大きくなる。

3) 砂岩の電気抵抗はセメントモルタルの700~2000倍である。このことからモルタルとコンクリートの電気抵抗は大局的にはセメントペーストの電気抵抗によるものと考えられる。

4) モルタルとコンクリートの水セメント比は電気抵抗に影響を及ぼし、 W/C が小さいほど電気抵抗は大である。抵抗に及ぼす W/C の効果は、高材令ほど顕著である。

5) モルタルとコンクリートの重量調合比は電気抵抗に影響し、モルタルでは砂率が大きいほど、またコンクリートでは粗骨材量が多いほど電気抵抗は大である。

6) 硬化した湿潤セメントモルタルにおいて空隙量が多いほど電気抵抗が大である。このことから、空隙内の電離液よりも、セメント水和物の通電性が大きいものと推定される。

参考文献

- 1) Hammond, E. and T.D. Robson: The Engineer, No. 199, pp. 78-80, pp. 114-115. 1955
- 2) Orchard, D.F.: Concrete Technology, Vol. 1, Pub. Applied Science., pp. 318-325. 1973
- 3) Wittmann, F.H.: Cement and Concrete Research, Vol. 3, pp. 601-605. 1973
- 4) Hollenz, C. and F.H. Wittmann: Cem. and Conc. Res., Vol. 4, pp. 389-397. 1974
- 5) Taylor, M.A. and K. Arulanandan: Cem. and Conc. Res., Vol. 4 pp. 881-897. 1974
- 6) Whittington, H.W., et al.: Mag. of Conc. Res., Vol. 33, pp. 48-60. 1981
- 7) M.C. Carter, W.J., et al.: Proc. of Instn Civil Engineers, Part 2, Vol. 71, pp. 107-117. 1981
- 8) Tomas, F.D.: Cem. and Conc. Res., Vol. 12, pp. 115-120. 1982
- 9) Hansson, I.L.H. and C.M. Hansson: Cem. and Conc. Res., Vol. 13, pp. 675-683. 1983
- 10) M.C. Carter, W.J., et al.: Jour. of Materials Sci. Lett., Vol. 3, pp. 1083-1086. 1984
- 11) Singh, N.B., et al.: Cem. and Conc. Res., Vol. 16, pp. 991-920. 1986
- 12) Tashiro, C., et al.: Jour. of Mate. Scien. Letter, Vol. 6, pp. 1379-1387. 1987
- 13) Schulte, C., H. Mader and F.H. Wittmann: Cem. and Conc. Res., Vol. 8, pp. 359-369. 1987
- 14) 大岸佐吉・小野 博宣・文 堅: コンクリート工学年次論文報告集, 12-1 pp. 389-394. 1990