

論文

[1066] セメント硬化体の電気抵抗と電気容量に及ぼす測定条件の影響

正会員○大岸佐吉 (名古屋工業大学)

正会員 小野博宣 (中部大学工学部)

文 堅 (名工大・大学院)

1. まえがき

セメントペーストとコンクリートの電気的性質の研究は、E. Hammond [1] らにより1955年にはじまり、1973年以降F. H. Wittmann [2,3,5] がペーストの電気的挙動と電気透過の意義を検討した。特に1981年からW. J. McCarter [6,7,10,11,12] がペーストとコンクリートの電気抵抗性を精力的に検討した。他にF. D. Tomas [8], I. H. Hansson [9], 田代 [13] の導電性などの研究がある。しかしセメント硬化体の電気的特性に及ぼす影響は複雑多岐に亘り未だ不明の点が多い。

本研究は、セメント硬化体の電気抵抗と電気容量 (Capcitanace) を極く早期材令から高材令までを通じて測定する適切な方法を検討し、これら両電気特性値に及ぼす影響を、電極材質、電極の寸法、電極間距離等について検討し適正な測定条件を明かし、次いで電気特性値に及ぼすセメント種別、調合、材令、含水の各効果を明確にする。この種の研究は未だ基礎的研究段階にあり、応用と実用化の域に達していないが、将来その展開の可能性を秘めている。

2. 電気抵抗測定のための基礎的検討

物質の電気抵抗は、導体のほか電極自身および電極周辺の導体の状況にも支配されるので、電気抵抗値が正確に既知の電解溶液について容器定数 (Cell const., K) を知る必要がある。本研究では図1に示す如く、不銹鋼の電極を距離20mmのもとでKCl-7.419g/1000g sol中に対置し、同図に示す三方法についてKBR法で測定した電気抵抗の電極面積依存の結果を示す。容器定数 Kは、式(1)で与えられる。但しσはKCl溶液の導電率 (今の場合σ=0.011167S/cm) [14], Rは測定抵抗値。また比抵抗ρは式(2)で示される。

$$K = \sigma \cdot R \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho = 1/\sigma = R/K \dots\dots\dots (2)$$

図1より抵抗値は周辺条件に大きく支配され、また電極面積にも依存する。一般にKは方法IIIで求められる。しかし本研究では方法IまたはIIで抵抗を測定する。電極面積A=10²mm²でのKの値は、方法IでK=0.670cm⁻¹,方法IIでK=1.730cm⁻¹である。この値から比抵抗ρを求めることができる。図1の結果より電極面積が一辺の長さ15mm正方形以上で抵抗値は安定することを知る。

3. 実験方法

3・1 使用材料と供試体の製作

本実験に用いたセメントの種別は、普通ポルトランドセメント (OPC), 早強性セメント (ESC),

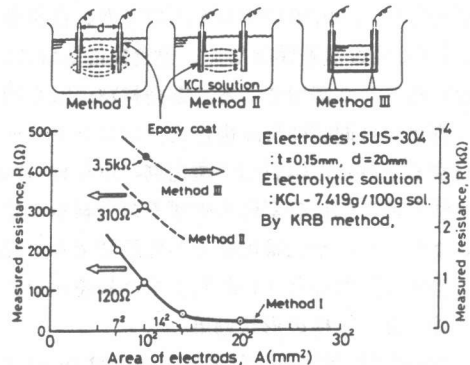


図1 容器定数の測定方法と電気抵抗値

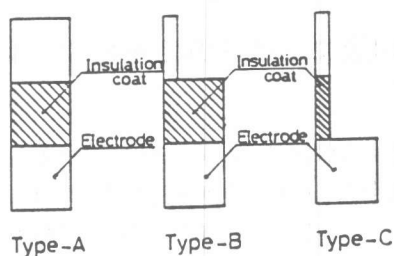


図2 電極形状の三形式

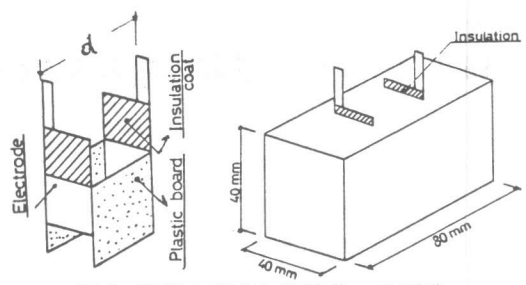


図3 電極の構成と供試体への埋込

高炉セメントB種（BFC）およびジェットメント（Jet C）の4種類である。細骨材は豊浦標準砂を用いた。特記ない限りペーストの重量調合比は、C/W=1/0.31, モルタルではC/S/W=1/2/0.6を基本とした。供試体寸法は4 x 4 x 8cmである。但し4・5節の実験では4x4x16cmとした。

電極は耐食性ある材質として不銹鋼（SUS304）を基本とし、他にチタン（Ti）およびアモルファス金属箔（Amor. m）について検討した。調合と電気測定は20°C-RH80%の恒温恒湿内で行った。

3・2 電気抵抗と電気容量の測定方法

本実験では電気分極または電気分解を生じさせないため、1kHzの交流を用いた。電極板の形状は図2の三形式について試み、図3の如く構成し形枠内に置き、セメント混合物を充填した。電気的特性の測定方法には下記の三種類の方法を適用し、相互に比較検討した。

- 電気抵抗の測定
- ① LCRメータ（以下LCRと略記）
 - ② 接地抵抗（以下ERと略記）
 - ③ コールラウシュブリッジ；Kohlrash bridge（KBRと略記）

電気容量の測定；④ LCRメータを使用

上記三測定方法のうち、ER法の測定上限が1.1kΩであり、LCR法は材令12時間以内の測定で分極を生ずるおそれがある。但し測定上限は2MΩ。よって若材令から高材令まで一貫して抵抗を測定するのに測定上限が10kΩのKBR法が適切であろう。

なお上記以外の測定条件の詳細は、各試験項目の処で明記する。

4. 実験結果と考察

4・1 電気抵抗に及ぼす電極材質の影響

図4は同図中記載の電極条件下で測定したモルタルの電気抵抗Rの電極材質依存性を材令別に示したものである。材質がSUS, Ti, Amor. のいずれを用いても、各材令を通じてモルタルのRに大きな差異はなく、耐食性に富むこれら3種類の材料は電極として適切である。電極材料にHgを用いた例もある。

測定が長期間に及ぶ場合またはコンクリートが酸や塩に遭遇する場合は電極表面に酸化物、塩化物、水酸化物を生じ、電極自体に抵抗の変化を生ずるので材質の選定が重要である。したがってFeやCuは電極として適切でない場合がある。

過去に真ちゅう [1, 6, 7,] や鉄板を用いた研究がある。

4・2 電極の形状効果

SUS製埋込電極の形状を図2に示すTypeA, B, Cの三種類とした場合のKBRによるモルタルのRの材令変化を図5に示す。

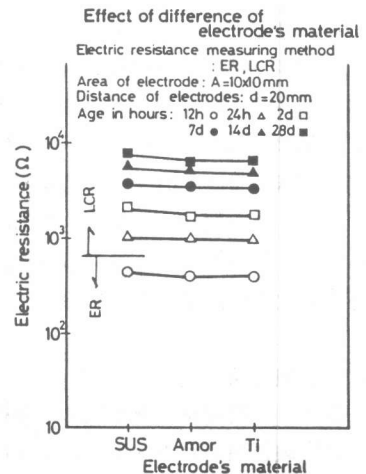


図4 電気抵抗に及ぼす電極材質

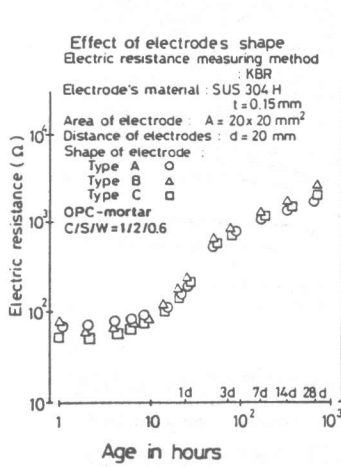


図5 電極形状と抵抗値, KBR

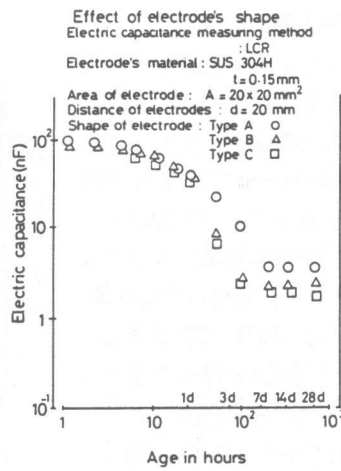


図6 電極形状と電気容量

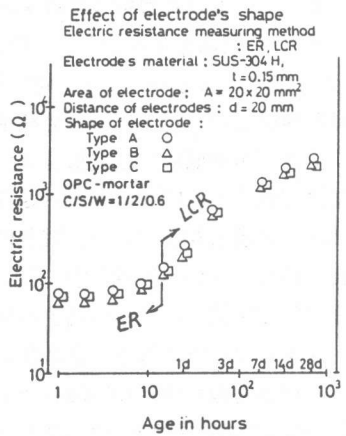


図7 電極形状と抵抗値, LCR

図5 電極形状別に、このモルタルの電気容量Cの材令変化を図6に示す。この結果によれば、電極がモルタルと接触する通電面積が同一で、その余の面の絶縁が十分であれば、Rは図2の電極の形状に無関係であると見なされる。材令28日モルタルのRは打設直後の約500~600倍に増大する。一方図6において材令2日以降でType Aのみが若干離れているが、大局的に容量もまた電極の形状に依存しないと判断される。この3つのタイプは図2のMethod Iに相当している。過去の多くの実験はMethod Iに依っているが、Method IIIの方法による研究例 [6] もある。

図7は、図5に示すモルタルの材令12時間までをER法で、それ以後の材令にLCRで測定したRの変化を示す。これによれば硬化過程でのRはKBRとLCRの二方法で同一値を得る事を確認した。

4・3 電気抵抗に及ぼす電極厚みの影響

図8は電極の面積 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 、電極間距離 $d=20 \text{ mm}$ 一定で、SUS電極の厚みを $t=0.15, 0.3, 0.45 \text{ mm}$ の3種類に変えた場合のモルタルの電気抵抗の材令変化を示す。

この結果によれば、本実験の範囲ではモルタルのRは電極の厚みに無関係であるといえる。図の掲載を省略するが、電気容量Cも電極の厚みに依存しないことを確かめた。tは重要な因子ではない。

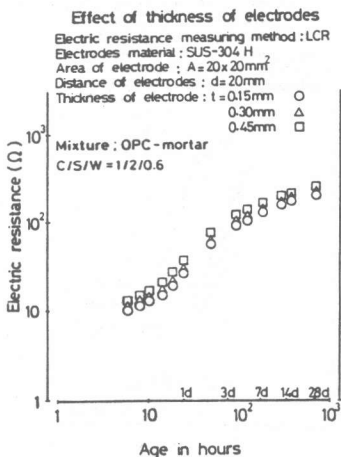


図8 電極厚みと抵抗値

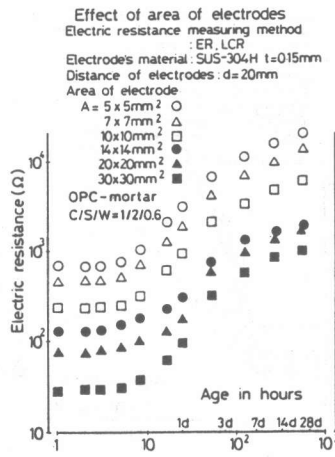


図9 電極面積と抵抗値

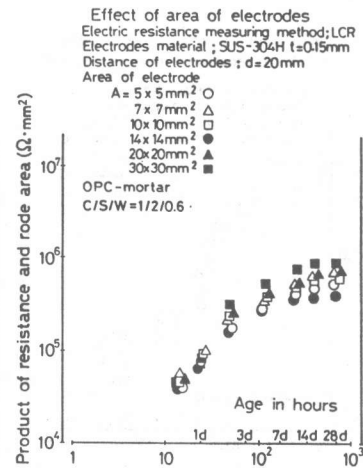


図10 (電極面積 x 抵抗値) の変化

4・4 抵抗と容量に及ぼす電極面積の効果

図9はSUS電極の面積が、 $A=5 \times 5, 7 \times 7, 10 \times 10, 30 \times 30 \text{mm}^2$ でのERとLCR法によるモルタルの電気抵抗の変化を示す。電極間距離 $d=20\text{mm}$ 一定下において抵抗は小面積ほど大である。

いま(電極面積 \times 電気抵抗 $=A \cdot R, \Omega \cdot \text{mm}^2$)の積を求めて描き直すと、図10の如く示され、面積の大小に関わらずほぼ一定値となる。即ち、電気抵抗は電極面積に大きく支配されるが、 $(A \cdot R)$ の形式で表示すれば、面積の異なる電極での測定値を互いに対比する事が合理的に可能である。

4・5 電気抵抗と容量に及ぼす電極間距離の影響

図11は電極面積 $A=10 \times 10 \text{mm}^2$ 一定下での電極間距離 $d=10 \sim 100\text{mm}$ 間で10段階に変えて実測したモルタルの電気抵抗の材令別距離依存性を示す。これによれば材令の大小を問わず、電極間距離 $d > 40\text{mm}$ で抵抗が一定値を示す。

電気化学的には、①電極面上の薄層域ではヘルムホルツの電気2重層の抵抗、②電極に近い領域ではアルカリやCaイオンの拡散層、③分極のない遠距離部の3域に区分される。図11によれば、まず4・1項の実験より、①の2重層の界面抵抗は電極材質によって変わらず、 $d < 40\text{mm}$ の処では②の分極による拡散層がモルタルの電気抵抗に大きく関与するものと理解される。従って、定量的に信頼できる抵抗を得るには $d > 40\text{mm}$ とするのが適切である。図12はモルタルの電気容量の材令変化を電極間距離に対して示したものであり、 d の依存性が認められる。比抵抗 ρ は、 $\rho = AR/d(\Omega \cdot \text{mm})$ と定義されるが、 $d > 40\text{mm}$ で R が一定値を示すので多くの論文がセメント硬化体に比抵抗の表示を用いることの普遍性に疑問がある。

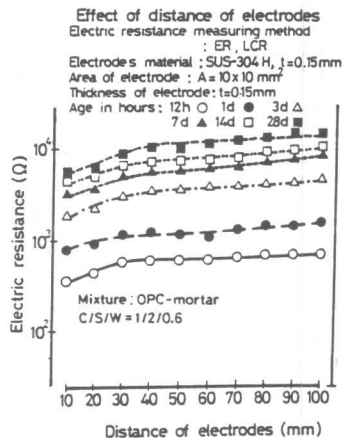


図11 電極間距離と抵抗値

5. セメント硬化物の調合と電気的特性

5・1 セメント種別の影響

図13は4種類のセメント、普通ポルトランド (OPC)、早強ポルトランド (ESC)、高炉スラグB種 (BFC) およびジェットセメント (Jet C) を用いたフロー値190一定のペースト (W/Cは上記順序に従い、0.312, 0.325, 0.350, 0.425) の抵抗値の材令変化を示す。抵抗値は僅少の差でBFC>

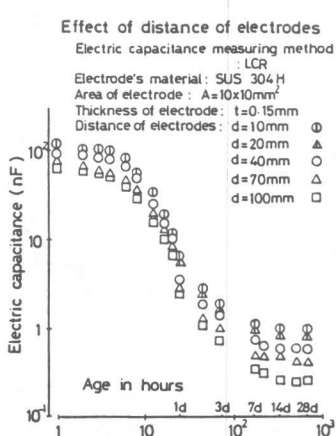


図12 電極間距離と電気容量

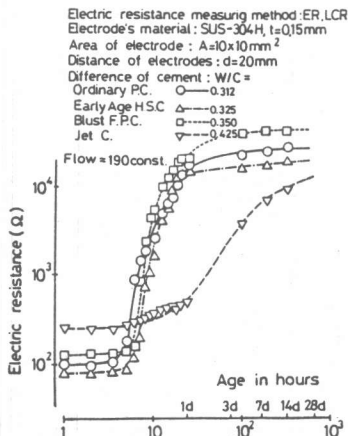


図13 セメント種別と抵抗

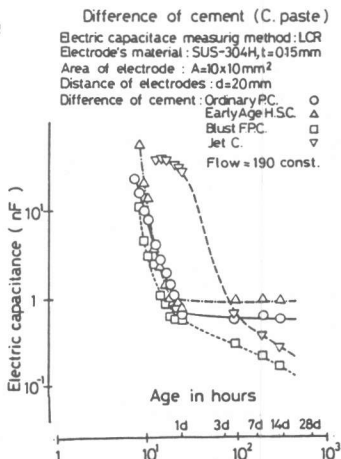


図14 セメント種別と容量

OPC>ESCの順である。Jet Cのみこれらと異なり、8時間未満で3種類の他のセメントより大であり、約10時間以後で小となる。図14は4種類のペーストの電気容量を示す。

5・2 抵抗値に及ぼす水セメント比効果

図15はモルタル (C/S/W=1/2/variable) の抵抗値の材令変化をW/C=0.5, 0.6, 0.7の場合について示したものである。本実験の範囲では、抵抗は水セメント比が大きいほど僅かに大きいことが認められる。McCarter [6,7] によれば、ペーストの比電気抵抗はW/Cが小さいほど大であると報告している。

5・3 セメントペーストとモルタルの電気特性比較

図16はセメントペーストとモルタルの電気抵抗を対比したものである。両硬化体の重量調合比は異なるが、5・2

節の所見によればモルタルの抵抗はW/C効果が僅小であると考えればこの両抵抗値を直接比較することは不合理ではない。図16の結果によれば、材令約7時間以内ではペーストの抵抗値はモルタルより小であるが、これ以降の材令で逆に大となる。骨材はセメントゾルやゲルより電気的不良導体であるため、モルタルの抵抗値は骨材の容積濃度に支配されるであろう。図17によれば硬化ペーストの容量は0.8nF, モルタルは2nFを示した。

5・4 モルタル試料のパラフィンコートの影響

セメント系硬化体の電導性はセメント鉱物の電解性に因るものであるから、電気特性は硬化体試料の含水率 (自由水) に依存すると考えられる。文献 [5, 13] は抵抗の含水率依存性を報告している。本実験では含水率依存を直接調べていないが、モルタル試料の全表面をパラフィンで塗布密封した場合と、密封しない場合の抵抗と容量を測定した。図18はモルタルの電気抵抗を密封と非密封について対比したものである (容量の図省略)。密封試料の抵抗は非密封より小であり、容量はこの逆である。従って抵抗値からセメント硬化物の含水率を知り得る可能性を図18が示唆している。

5・5 セメントペーストの凝結性と電気抵抗の関係

図19は自動記録型ビカー (Vicac) 針試験装置によって測定した4種類のセメントペーストの

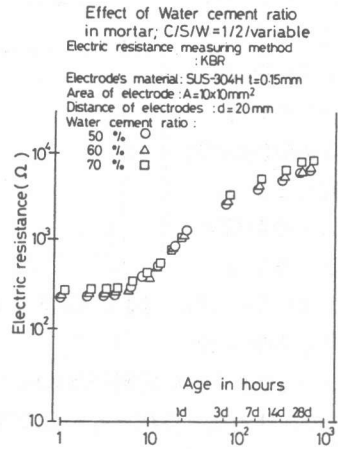


図15 抵抗値に及ぼすW/C効果

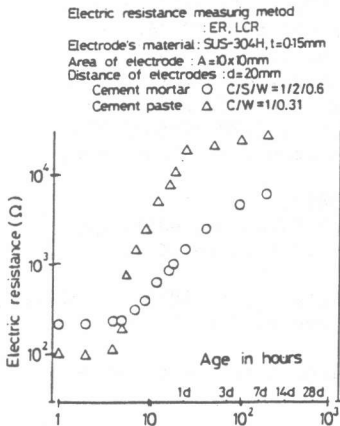


図16 ペーストとモルタルの抵抗

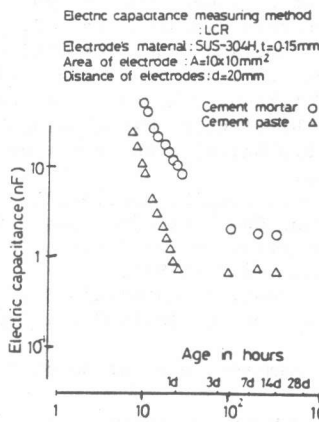


図17 ペーストとモルタルの容量

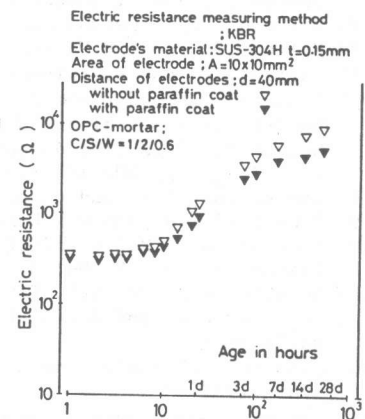


図18 表面密封と非密封の比較

針の貫入深さの時間変化を示す。ペーストは $f_1 \cong 190$ に統一している。これらの W/C は同図に記載している。ペーストの凝結始発時間の早いものはESC, OPC, BFCの順であり、約 $3h \cdot 30m$

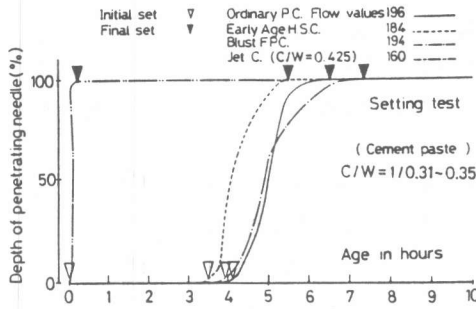


図19 4種類セメントペーストの凝結試験

~ $4h \cdot 10m$ である。終結時間は約 $5h \cdot 0m \sim 7h \cdot 30m$ である。

Jet Cのみは始発と終結とも30分以内で極端に短い。図19に対応する電気抵抗は図13である。図13で抵抗値が急増する時間は、凝結終結時間にほぼ一致している。図20はモルタルの動弾性係数 E_d の材令変化を示す。 E_d の変化は図13の変化によく一致している。

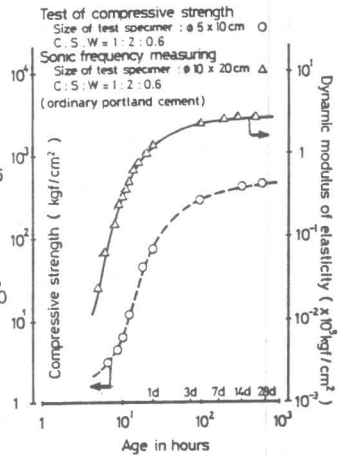


図20 モルタルの動弾性係数の変化

6. 結論

- 1) 材令12時間以内の抵抗測定にER法、以後に対してLCR、全材令を通じてKBRが適切である。
- 2) 長期の測定には不食性の電極が必要であり、抵抗値は本試験3種類の電極材質に依存しない。
- 3) セメント硬化物の電気抵抗と容量は、本試験の電極形状と電極の厚みに影響されない。
- 4) 電極面積が大きいほどモルタルの電気抵抗は小さく、電気容量は大きく計測される。しかし電気抵抗と電極面積との積で表示すれば、電極面積の大小に関わらずほぼ一定値を示す。
- 5) 分極による抵抗の影響を除くには、電極間距離を40mm以上にするのがよい。
- 6) 3種類のセメントペーストの抵抗値は僅差で $BFC > OPC > ESC$ であり、容量はこの逆である。
- 7) セメントモルタルの抵抗は W/C に僅かに依存し、 W/C が大きいほど抵抗は若干大である。
- 8) 非密封試料の抵抗値は密封試料より大であり、抵抗値から含水率を推定し得る可能性がある。

謝辞 本研究には名工大山田寛己技官、学生桜井英樹君らの助力を得た。付記し謝意を表わす。

文献

- 1) Hammond, E. and T.D. Robson; The Engineer, No.199, pp.78-80, pp.114-115 (1955).
- 2) Wittmann, F.H.; Cement and Concrete Research, Vol. 3, pp.601-605 (1973).
- 3) Hollenz, C. and F.H. Wittmann; Cem. and Conc. Res., Vol.4, pp.389-397 (1974).
- 4) Taylor, M.A. and K. Arulanandan; Cem. and Conc. Res., Vol.4 pp.881-897 (1974).
- 5) Schulte, C., H. Mader and F.H. Wittmann; Cem. and Conc. Res., 8, pp.359-368 (1978).
- 6) McCarter, W.J., et al and H.W. Whittington; Mag. of Conc. Res., 33, pp.48-60 (1981).
- 7) McCarter, W.J., M.C. Forde and H.W. Whittington; Proc. of Instn Civil Engineers, Part 2, 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) McCarter, W.J., M.C. Ford, H.W. Whittington and T. Simon; Proc. of Instn Civil Engineers, Part 2, No.75, pp.123-127 (1983).
- 11) McCarter, W.J. and A.B. Afshar; Jour. of Materials Sci. Lett., 3, pp.1083-86 (1984).
- 12) McCarter, W.J. and A.B. Afshar; Proc. of Instn Civil Engineers, Part 2, Vol.79, pp.585-604 (1985).
- 13) Tashiro, C., H. Ishida and S. Shimamura; Jour. of Mate. Scien. Letter, 6, pp.1379-1381 (1987).
- 14) 高橋武彦; 『電気化学概論』 横書店 (東京) p.33, 1986年11月刊。