

## 論文

## [1073] コンクリートの電気抵抗に及ぼす試験条件および作用応力の影響

正会員○小野博宣(中部大学建築学科)

正会員 大岸佐吉(名古屋工業大学)

正会員 文 堅(名古屋工業大学大学院)

## 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 年に始まり、1973 年以降 F. Wittmann [2], W. J. McCarter [3, 4], Hannson, L. H. [5] らが電気挙動と電気透過の意義や電気抵抗性を検討した。一方我が国では硬化コンクリートの含水率測定に鎌田ら [6] が電気抵抗を用いた研究例、中根ら [7] によるコンクリート構造体の含水率測定、田代 [8] らのセメント硬化体の自由水効果の報告がある。また、水口ら [11] はフレッシュコンクリートの骨材分離の測定を電気抵抗測定により試みている、加藤・矢島ら [10] は液体導電率計を用いて導電率とフレッシュモルタル、コンクリートの配合について報告している。一方、田代ら [12] もハイアルミナセメントについてその硬化前後の導電特性を報告し、筆者ら [13] もすでにセメント硬化体の電気抵抗・容量などの特性について報告した。しかし、セメント硬化体の電気特性に及ぼす影響因子は多岐にわたり、かつ複雑であるためまだ不明な点が多い。

本研究の目的は、セメント硬化体の電気抵抗に及ぼす電極材質、電極面積、電極間距離、供試体断面寸法、供試体温度の各効果を明きらかにし、かつ、フレッシュコンクリート中の  $\text{Cl}^-$  濃度および硬化コンクリート供試体に作用する応力と電気抵抗の関係を検討することにある。

## 2. 電気抵抗測定上の基礎的検討事項

## 2.1 測定系(電極)の容器常数:

セメント硬化体の電気抵抗を計るのに本実験では 2 枚の電極板を図-2 のように配置するが、この間の抵抗は電極自身の形状・寸法、電極周辺の導体の状況によっても影響を受けるので、予め既知の電解溶液(例えば  $\text{KCl} : 7.419\text{g}/(\text{溶液})1000\text{g}$ ) についての容器常数(Cell Const.,  $K$ ) を知る必要がある。また、一般に容器常数  $K$ 、電気の流れやすさを表す尺度としてコンダクタンスを  $C$ 、導電率:  $\sigma$ 、導電体の断面積  $A$ 、長さ  $L$  とすると、抵抗  $R$  とのあいだに次の関係 (1)、(2) が成立する。あり、また比抵抗  $\rho$  は式 (3) で示される。

$$K = \sigma \cdot R \quad \dots\dots (1), \quad \sigma = C \cdot (L/A) = L / (A \cdot R) \quad \dots\dots (2)$$

$$\rho = 1 / \sigma = R / K \quad \dots\dots (3)$$

電極板として SUS-304 を用いたときの  $K$  値については既に筆者 [13] が報告したとおり、電極面積  $A = 10^2 \text{mm}^2$  で電極間距離  $L = 20 \text{mm}$  のもとでは  $K = 1.730 \text{cm}^{-1}$  である。

本研究では、電気伝導性樹脂(以下導電性樹脂と呼ぶ)の抵抗測定への適用性についても検討した。使用した 2 種類の導電性樹脂の特性を次に示す。

A 種: 主成分; アクリル樹脂, フィラー; Ag, 導電性;  $7 \times 10^{-4} (\Omega \cdot \text{cm})$ , 硬化時間  $25^\circ\text{C} \times 3\text{hr}$

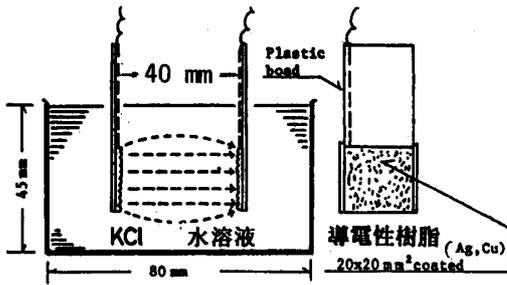


図-1 導伝性樹脂の容器常数試験

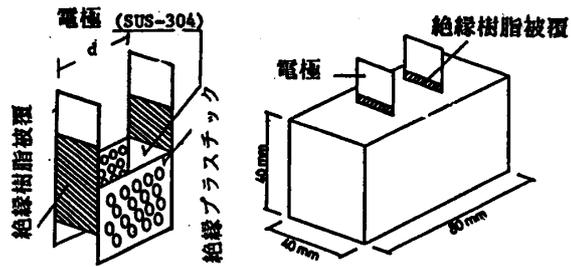


図-2 電極の構成と供試体作製

B種：主成分；アクリル樹脂，フィルター；Ag・Cu，導電性； $4 \times 10^{-4} (\Omega \cdot \text{cm})$ ，硬化時間  $25^\circ\text{C} \times 3\text{hr}$

図-1に示すとおり、アクリル板上に $2 \times 2 \text{ cm}^2$ にA, B 2種の導電性樹脂を塗布したものを電極としKCl溶液中に浸漬して抵抗を求めた結果、A種では $k=0.879 \text{ cm}^{-1}$ ，B種では $k=0.893 \text{ cm}^{-1}$ であった。同一条件下で行った SUS-304の場合は $k=0.547 \text{ cm}^{-1}$ となった。これはコンダクタンスC (1/R) 値は導電性樹脂よりSUS-304の方が高いことを示している。図-3に導電性樹脂を電極としたセメントモルタルの含水率と抵抗の試験結果を示す。この接着型電極は硬化後の供試体にも利用し易く広い活用が期待される。しかし樹脂を塗布するためコンクリート表面の乾燥状態に影響される。

### 2・2 電極支持用プラスチック板の開孔率の影響

図-2に示す如く電極板2枚をコンクリート中に正しく設置するために間隔保持用プラスチック板を用いるがこのプラスチック板に、5段階の開孔比率(0%, 4.7%, 8.4%, 18.8%, 37.7%)を有する小孔径(3mm)の穴を0, 8, 16, 32, 64個設け抵抗への影響をまず検討した。4x4x8 cmの型枠に重量比 C:S:W=1:2:0.6, のモルタルを充填した。測定の結果は図-4に示すとおり、板の開孔比が増加するにつれて抵抗値は減少する傾向を示した。開口比0%と37.7%では材令1hで25%, 12hで17%, それ以降ではその差が徐々に減少し材令24hで約3%となった。これは混練後の初期ではモルタル中の豊富な電解質溶液のため迂回電流が大きいが硬化が始まると電解溶液が減るためと考えられる。

## 3. 試験方法

### 3.1 使用材料と供試体の製作

本実験には普通ポルトランドセメント(以下の図ではOPCと略記した, 比重 $\rho=3.15$ , 28日強度 $440 \text{ kgf/cm}^2$ ), 細骨材:珪砂( $\rho=2.60$ ), 川砂(木曾川 $\rho=2.56$ ), 粗骨材:川砂利( $\rho=2.60, 5\text{mm} \sim 10\text{mm}$ )を用いた。重量調合比はモルタル: C/S/W=1/0.6/2, コンクリート: C/W/S/G=1/0.5/2/2.5とし, 打ち込み

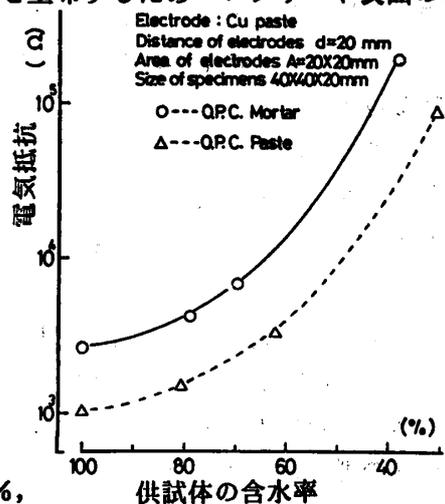


図-3 電気抵抗に及ぼす含水率の影響(導電性樹脂の応用)

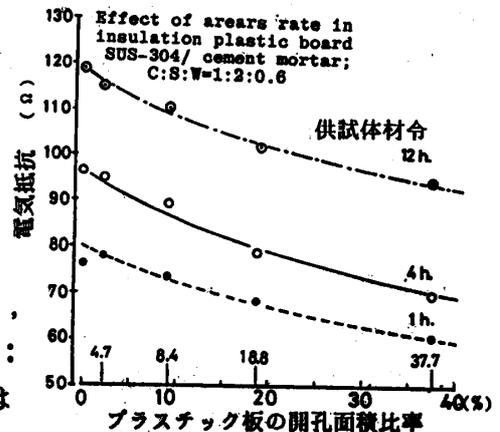


図-4 間隔保持プラ板の開孔比率と電気抵抗

後 20℃ RH=80%の恒温室内湿空養生し 24 時間後脱型し以後水中養生とした。

供試体寸法は 4 x 4 x 8 cm を標準としたが供試体寸法依存性試験については別に示す。電極は SUS-304 H type (t=0.15mm, 0.3mm) を使い、図-2 に示すとおり電極間距離を一定に保持されるようにプラスチック板 (約 30% の開孔比率の細孔群) によって組み立てた。そのように構成した電極を型枠内置き所定のセメントモルタル、コンクリートを充填した。

### 3.2 電気抵抗測定法

本実験では、電気特性の測定は主として ① LCRメータ (AA-211:テックス社製、以下 LCR と略記) を用いた。また、② 接地抵抗器 (L-9CV:横河社製) や ③ コールラウシュブリッジ (Kohlrusch bridge-2757:横河社製) による比較も行った (図省略)。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 電気抵抗に及ぼすモルタル試料の断面積効果

本実験では、固定条件として供試体長さを 160mm, 電極の厚み t=0.15mm, 電極間距離 d=40mm, 電極面積 A=20×20mm<sup>2</sup> を一定とした。セメントモルタル供試体の断面積を次の 7 水準に設定した 20×20, 30×30, 40×40, 50×50, 60×60, 70×70, 80×80mm<sup>2</sup>。

測定結果は図-5 に示すとおり試料の断面が小なるほど抵抗値は大である。この影響は打設直後より認められるが、その差異は初期に於いては小さく、材令と共に拡大する。図-6 によれば電極面積が一定の時、モルタル試料断面が小さい範囲、つまり、この場合材令 1 日で未満 5×5~6×6cm 以下の試料において電気抵抗はモルタルの断面積にほぼ反比例する。供試体の電気抵抗を測定する場合には電極面積の設定は供試体の寸法に影響されるため両者の関係、即ち供試体断面積を D, 電極面積を A とし、供試体断面積に対する電極面積比  $s = D/A$  とすると

- 1)  $D \gg A$  : ( $s > 9.0$ ) の領域では電気抵抗は試料断面に依存しない。
- 2)  $D \geq A$  : ( $s \leq 9.0$ ) の領域では電気抵抗は供試体寸法に依存する

従って、電気抵抗測定に於いては供試体断面積に対する測定電極面積比  $s = D/A$  が重要な指標となる。ただし S の大小に関係なく、モルタルの電気抵抗は材令に依存し高材令ほど抵抗は大となる。

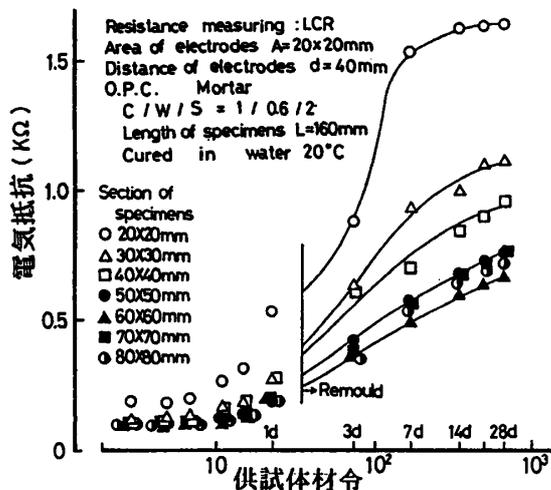


図-5 各種断面 モルタルの電気抵抗の経時変化

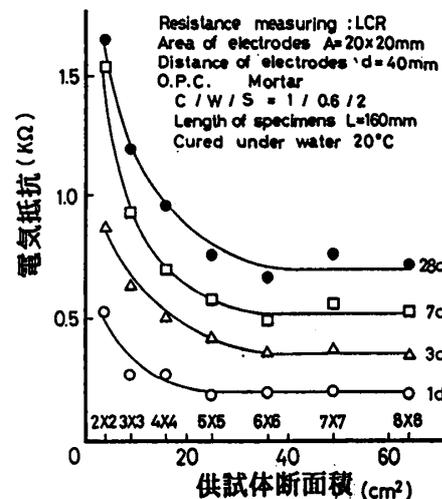


図-6 モルタル断面の寸法と電気抵抗の関係

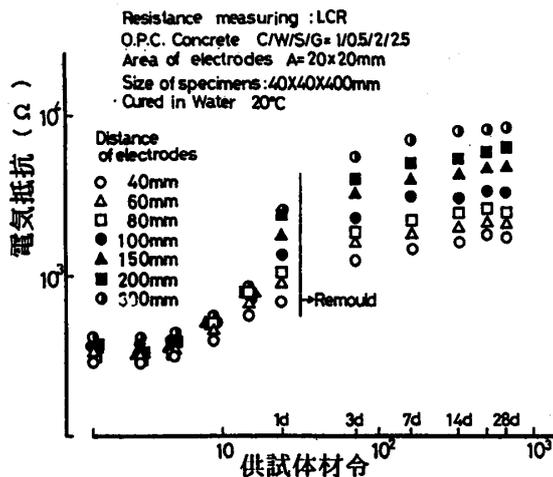


図-7 各種電極間距離のコンクリートの電気抵抗

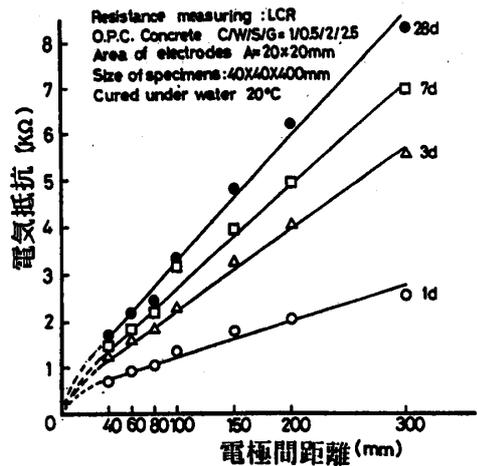


図-8 電極間距離と電気抵抗

4.2 電気抵抗に及ぼすコンクリート中の電極間距離の影響

供試体の断面積を  $40 \times 40$  mm<sup>2</sup>、電極面積  $20 \times 20$  mm<sup>2</sup>、電極厚み  $t = 0.15$  mm、を固定条件として、電極間距離を 40, 60, 80, 100, 120, 150, 300 mm の 7 水準としてコンクリートの電気抵抗の材令変化を測定し図-8を得た。図-7に示すように、電気抵抗は電極間距離にほぼ比例して増大する、しかしその増大する勾配は材令によって変化し材令が進行するにつれて大となる。式(3)に示すとおり、比抵抗は  $\rho = 1/\sigma = (A \cdot R)/L$  で示される。コンクリートの導電性に関する研究[3, 5, 6]では  $\rho$  表示を行っているが、図-6と図-8の結果から考えるとセメント硬化体電気抵抗はLにはほぼ正比例するが断面積Aには必ずしも反比例しない。従って導電性を  $\rho$  によって評価する方法には普遍的妥当性がなく、大きな疑問が残る。

4.3 コンクリートの電気抵抗に及ぼす電極面積の影響

コンクリートの電気抵抗は図-9に示すように材令と共に変化するがコンクリートの凝結が急速に進む材令10時間前後の抵抗変化率が大きい。この図の縦軸は(抵抗×電極面積)の表示にしてある。すなわち  $\Omega \cdot \text{mm}^2$  の値は供試体の電極面積の増大につれ低下している。一般に電気抵抗は導体の断面積に反比例するので電気抵抗に導体の断面積を乗ずればその積は一定となるはずである。しかし、図-10に示すようにコンクリートでは電極面積が大きくなるにつれて、この

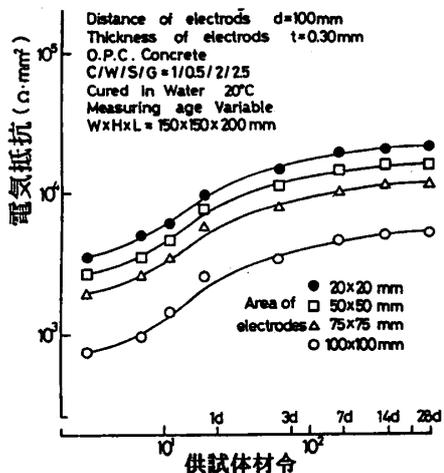


図-9 4種類の電極面積と電気抵抗

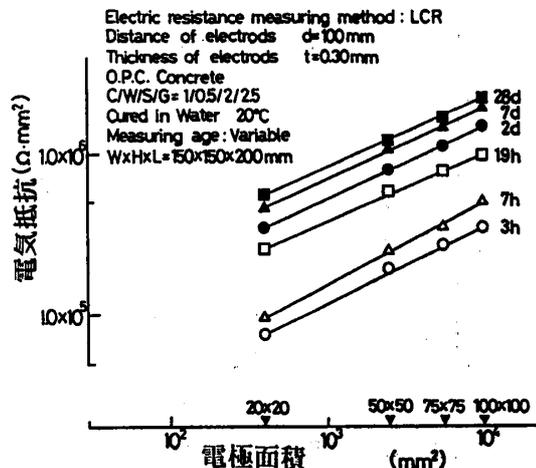


図-10 コンクリートの電気抵抗と電極面積

値は一定ではなく増大する。これは電極面積が大きくなるにつれて、電極面積に対する供試体の面積の比が相対的に小さくなることに関係していると思われる。

以上よりコンク

リートの電気特

性の表示法としての比抵抗 $\rho$ はコンクリートの物理的固有値とみなし難い。

#### 4. 4 フレッシュコンクリートの電気

##### 抵抗に及ぼす混入 $Cl^-$ 量

まだ固まらないフレッシュコンクリートでは電解質の濃度により導電性が異なると思われる。この考えに基づき電気抵抗はフレッシュコンクリート中の塩分含有量の判定法として有効であると思われる。JISA 5308の限界値のコンクリート $1m^3$ 中の $Cl^-$ 含有量 $0.3kg$ を基準にモルタル中に $NaCl$   $10kg \sim 0.9kg$  間の5水準に混入し電気抵抗を測定した。図-11に示す如くコンクリートの電気抵抗は $Cl^-$ 量の増加により徐々に減少する。このことはモルタル中電解質の濃度が増大することに照らして妥当である。しかし、12時間以降では電気抵抗に及ぼす塩分濃度の影響を明確に識別できなくなる。

#### 4. 5 モルタルの電気抵抗に及ぼす温度の影響

図-12に示すように硬化セメントモルタルの電気抵抗は $-10 \sim 50^\circ C$ の温度範囲の間において温度上昇に対しほぼ反比例して低下し、鎌田らの報告[6]と一致する。

#### 4. 6 モルタルの電気抵抗に及ぼす載荷

##### 応力の影響

図-13に示すように、中央引っ張り縁に深さ $5mm$ の切り欠きを有するモルタル供試体( $10 \times 10 \times 40cm$ )に2等分点の荷重を作用させ、切り欠きをはさむ位置に設けた電極により電気抵

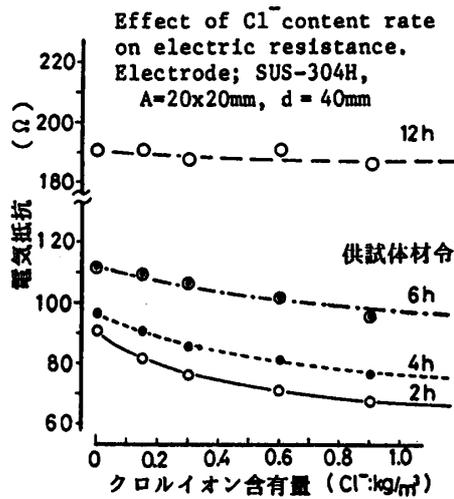


図-11 電気抵抗と $Cl^-$ 混入量

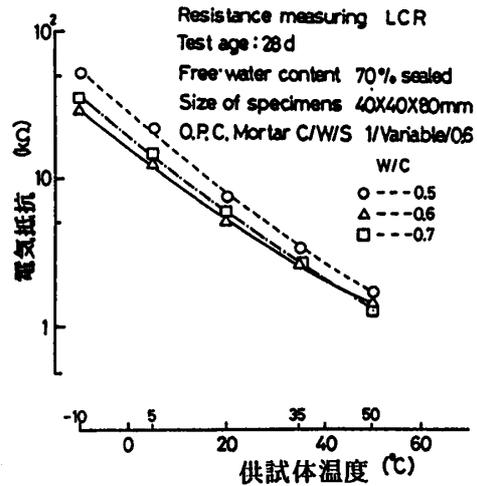


図-12 電気抵抗に及ぼす温度の影響

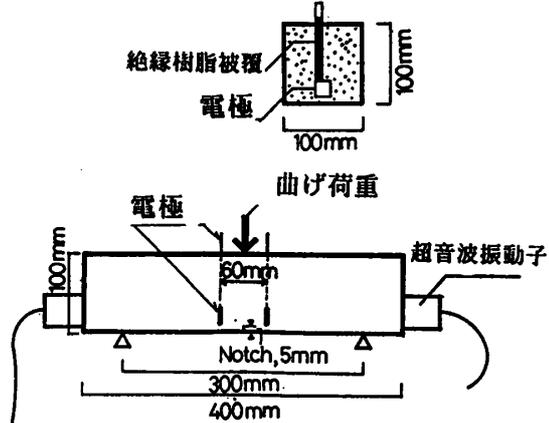


図-13 曲げ応力下の電気抵抗測定法

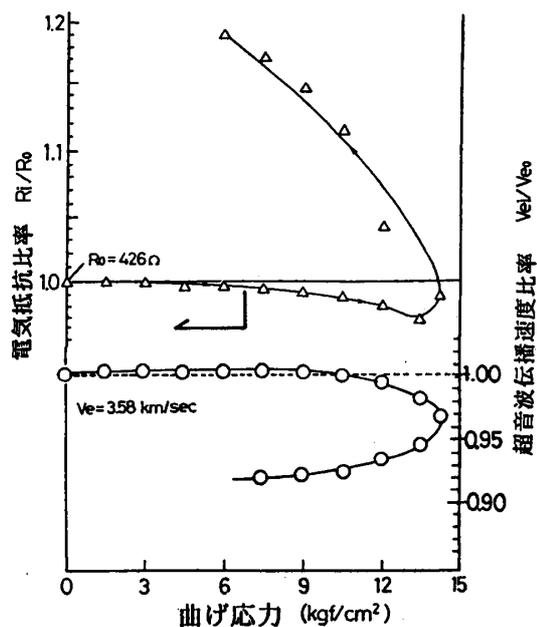


図-14 応力下の超音波速度と電気抵抗比

抗を、また、はりの両端に圧接させ超音波振動子により超音波伝播時間を測定した。図-14に両者の実測関係を示す。左側縦軸に電気抵抗変化比、右側縦軸に伝播速度変化比を示す。電気抵抗は破壊荷重の50%前後より緩やかに減少し、90%を越えると一転して大きく急増する。これは切り欠き先端に於ける亀裂の急成長による電流の迂回を生じたものと判断される。一方超音波速度は破壊荷重の70%前後から次第に小さくなりモルタル中の微細亀裂の発生をうかがわせる。圧縮応力の場合には載荷軸方向と直角方向の電気抵抗変化は破壊荷重の80%程度の載荷時に於いても電気抵抗の変化は5%程度、破壊時に於いても15%程度の変化しか認められなかった(図省略)。以上より電気抵抗によって存在応力を推定できる可能性は甚だ少ない。

## 5. まとめ

セメント硬化体に関する本実験の結果は次のように要約される。

- 1) モルタルの電気抵抗は電極面積 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ においてモルタル試料断面約 $50 \text{ mm}$ 正方形以下では断面積に反比例する。しかし、電極面積に対してモルタル断面積がこれ以上十分大きい場合には電気抵抗は試料の断面積に影響されず一定値を示す。
- 2) 電極間距離が粗骨材の最大径に比べて十分大きい場合には、コンクリートの電気抵抗は電極間距離に比例する。
- 3) コンクリートに用いる電極の面積が大きいほど、電極面積に対する電気抵抗の比は大きくなり、モルタルやコンクリートの電気固有値として比抵抗を用いることには疑問がある。
- 4) セメント系硬化体の電気抵抗は試料温度の影響を受け、温度に逆比例して抵抗は小さくなる。
- 5) セメントモルタルの電気抵抗及び超音波伝播速度は曲げ応力または、圧縮応力の増加に対して、僅かしか変化せず抵抗値から応力度を判定できる可能性は小さい。

## 参考文献

- 1) Hamonnd, E. and T. D. Robson : 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) McCarter, W. J. M. C. Ford and H. W. Whittington : Proceeding Institute Civil Engineers, Part 2 No. 71, pp. 107-117, 1981
- 4) McCarter, W. J. M. C. Ford, H. W. Whittington and T. Simen : Proc. Inst. Civil Engineers, Part 2, No. 75, pp. 123-127, 1983
- 5) Hansson, I. L., Hansson, C. M. : Cement and Concrete Reserches Vol. 13, pp. 675-683, 1983
- 6) 鎌田英治, 田畑雅幸, 中野陽一郎 : セメント技術年報 Vol. 30, pp. 288 - 292, 1976
- 7) 中根淳, 長尾覚博, 一瀬賢一, 他 : セメント・コンクリート No. 473, pp. 8-14, 1986
- 8) Tasiro, C., T. Ishida. and S. Shimamura : Journal of Materials Science Letters, Vol. 6, pp. 1379 - 1381, 1987
- 9) 高橋武彦 : 「電気化学概論」横書店(東京), pp. 33, 1986
- 10) 加藤茂美, 矢島哲司, 三浦雄治 : 土木学会年次学術講演会, Vol. 41-5, p. 507-508, 1986  
Vol. 42-5, pp. 582-583, 1987
- 11) 水口裕之, 木虎久人 : セメント技術年報, Vol. 43, pp. 184-187, 1988
- 12) 田代忠一, 末次健二, 嶋村修二 : 第43回セメント技術大会講演集, pp. 242-245, 1989
- 13) 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, Vol. 12-1, pp. 389-394, 1990