

論文

[1065] 埋込みセラミック素子によるコンクリートの含水率測定方法に関する基礎的研究

正会員○笠井 芳夫（日本大学建築工学科）

正会員 松井 勇（日本大学建築工学科）

正会員 湯浅 昇（日本大学建築工学科）

小井戸純司（日本大学電気工学科）

1. はじめに

コンクリートの含水率を打設初期から長期間にわたり測定することにより、コンクリートの中性化、鉄筋の発錆、アルカリ骨材反応の進行、収縮とクリープの進行などコンクリートの耐久性及びコンクリートの強度発現に関する情報、仕上げ材の剥離、ふくれなどの劣化に関する情報を得ることができる。ところが、コンクリートに埋め込んで長期にわたり、含水率を測定できる信頼性の高い方法は未だ開発されていない[1]、[2]、[3]。

本研究は、コンクリートの含水率を測定する方法として、埋め込みセラミック素子による方法を開発することを目的とし、セラミック素子の電気的特性、含水率測定用セラミック素子の試作、素子の選定に関して実験検討した。

2. セラミック素子の電気的特性

2. 1 測定原理

図-1に示すとおり、セラミック素子の電気的等価回路は抵抗 R と並列静電容量 C で表される。本実験では、電極を取り付けたセラミック素子の抵抗と静電容量を測定する。これらの測定はインピーダンス測定器を用いる。測定原理は、素子の端子電圧と電流を位相情報も含めて複素量として測定し、抵抗 R と静電容量 C を求める。図-2に測定回路のブロック図を示す。

2. 2 電気抵抗と静電容量

セラミック素子の抵抗値および静電容量は、両者とも素子の含水率と相関があると考えられる。含水率を測定する際、どちらの量をモニターしたらよいかを選択するには次のような項目を考慮する必要がある。

(1) 測定の容易さ（装置化の容易さ） 観測したい含水率の範囲における抵抗及び静電容量の変化の範囲にもよるが、抵抗のみを観測するのであれば、測定周波数を下げることにより、測定装置（将来、開発予定）は単純なものですむと考えられる。しかし、この場合は、測定電流の

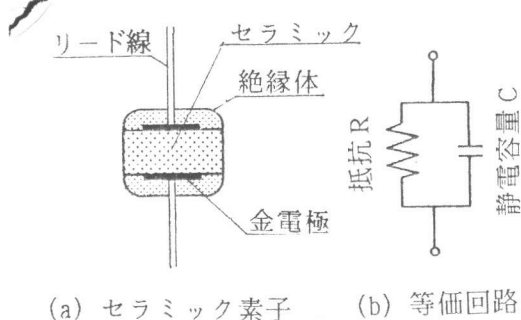


図-1 セラミック素子と等価回路

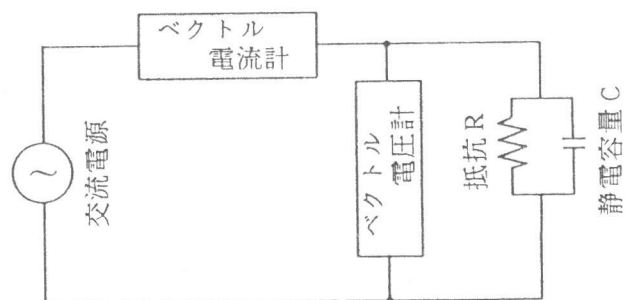


図-2 複素インピーダンス測定

大きさにもよるが、セラミック素子及びその周辺の化学的变化による測定誤差が大きくなる可能性がある。

(2) 含水率測定精度の安定性 素子の化学変化を想定すると、測定周波数を高くし、伝導電流を減少させ、セラミック素子内部の電極間及びその周辺の化学的変質を防ぎ、長期間にわたる測定の安定性を高めるためには、静電容量を観測する方がよい。

(3) セラミック素子の抵抗と静電容量測定の意義 セラミック素子の個々の電気的特性のばらつきが少なからず存在すると考えられる。そこで、抵抗あるいは静電容量の絶対値によって含水率を推定すると、素子のばらつきによる誤差が生じる。そこで、含水率の変化量に対する抵抗値と静電容量の変化量との相関を見いだすことにより、推定精度を向上させる可能性がある。この場合は、適当な周波数において、抵抗と静電容量の双方を観測することになる。

2. 3 測定周波数

測定周波数の選定に際しては、以下のことを考慮する必要がある。

(1) 抵抗のみを測定する場合 この場合は、セラミック素子の静電容量の効果を減少させるために、周波数は低くする方がよい。

(2) 静電容量も測定する場合 セラミック素子の抵抗と静電容量の相互関係を解析するためには、比較的高い周波数の方が有益な関係が得られる可能性がある。一方、静電容量のみを測定するには、低い周波数の方が静電容量が大きいので測定し易い。図-3に、素子の電気抵抗、静電容量変化に及ぼす周波数の影響を示す。

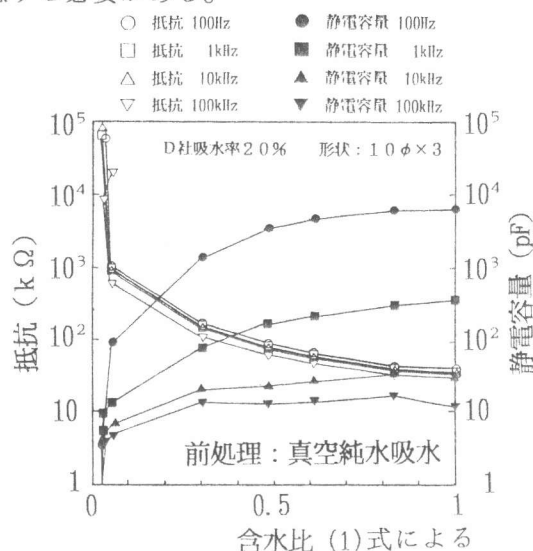


図-3 測定周波数の影響

3. 含水率測定用セラミック素子の試作

3. 1 材料の検討

電極取り付け材料には、電極金属、リード線、はんだ、絶縁体がある。測定上重要である電極金属と絶縁体について検討選択した。

(1) 電極金属 電極金属は、長期間における耐食性が必要である。文献[4]により金ペーストを選定した。

(2) 絶縁体 焼付け電極の絶縁体は、吸水性が少なく、素子への接着が長期にわたり良好で、変質せず、安定なことが望ましい。また、被覆作業が容易なものがよい。ここでは5種類の接着剤について検討した。その方法を以下に示す。

(i) 絶縁体の吸水性 約5gの球形硬化体を作製し、これを真空吸水(48時間真空状態に保持した後、48時間吸水)させ、吸水率(真空飽和吸水率)を求めた。

(ii) 絶縁体の接着の安定性

実験① 素子の乾燥、飽水の繰り返しに対する絶縁体の接着の安定性の検討: 絶縁体で金電極を被覆したセラミック素子を12時間真空乾燥した後、浸水30分を行う作業を10回繰り返し、接着性を確認した。

実験② アルカリに対する接着の安定性の検討: セラミック素子はセメント硬化体に埋め込むため、長期間高アルカリ状態に曝されることになる。そこで、実験①同様、金電極を絶縁体で

表-1 絶縁体の特性

絶縁体の種類	色	真空飽和吸水率%	接着の安定性		耐アルカリ性	作業性	
			乾湿繰り返し	耐アルカリ		塗りやすさ	硬化時間
K 社 速硬化接着剤 (エポキシ系)	黄色 透明	2.485	・剥がれない	・剥がれない	変色しない 表面がザラついている	・非常に塗りやすい ・流動性がある ・2剤の調合が必要 ・混ぜる時に気泡ができる	速硬化 (5分)
A 社 接着剤 K (エポキシ系)	黒	0.020	・剥がれない	・剥がれない	変色しない 表面がザラついている	・流動性はないが使いやすい ・2剤の調合が必要 ・塗りやすい ・混ぜる時に気泡ができる	1日 ～ 2日
A 社 接着剤 E (エポキシ系)	白	0.127	・剥がれない	・剥がれない	白く変色 表面がザラついている	・粘性があり塗りづらい ・2剤の調合が必要 ・混ぜる時に気泡ができる	1日 ～ 2日
S 社シリコーン シーラント (シリコン系)	白色 透明	-0.042	・剥がれない	・力をいれ ると剥がれる	変色しない 少し溶けている	・粘性があり塗りづらい ・2剤を調合する必要がない	2日 ～ 3日
C 社 バスコーク (シリコン系)	白	-0.210	・剥がれない	・剥がれる	変色しない 少し溶けている	・粘性があり塗りづらい ・2剤を調合する必要がない	2日 ～ 3日

被覆したセラミック素子をモルタルの細孔内溶液の化学組成[5] をもとに調製したアルカリ溶液（1リットル中に、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0.005 当量、 NaOH 0.25 当量、 KOH 0.45当量）中に6ヶ月間浸し（20℃）、接着の安定性を観察した。

(iii) 絶縁体の耐アルカリ性 前項アルカリ溶液中における絶縁体の変質状態を目視と感触により観察し、変色、軟化の有無を観察した。

(iv) 絶縁体被覆に関する作業性 実験①：絶縁体はリード線の先端と金属極を被覆するもので、接着剤は作業上適度の流動性と粘性を必要とする。ここでは、作業従事者5人に作業性を評価してもらい、検討した。実験②：両面を被覆するため、硬化時間を検討した。

(v) 絶縁体の選定

以上の結果を表-1に示す。接着剤の安定性、耐アルカリ性、塗りやすさについてはK社製及びA社製が優れている。また硬化時間はK社製は非常に速いが吸水率が大きいいため、絶縁体として適さない。そこでA社製接着剤Kを選定した。

3. 2 セラミック素子への電極取り付け手順

(1) デュボン製金ペーストを素子の両平面の所定の箇所（所定の面積）に塗布する。

(2) 電気炉に入れ、金ペーストを1000℃の温度で1時間焼き付ける。

(3) リード線を電極にはんだ付けする。

(4) 電極を絶縁体で被覆する（写真-1）。



写真-1 セラミック素子

4. セラミック素子の選定に関する検討

素子の形状・寸法及び吸水率を変えて製造した2銘柄のセラミック素子を用いて、素子の吸水特性、乾燥量と電気抵抗・静電容量との関係などについて実験し、素子の選定のための資料を得るための実験研究を行った。

4. 1 実験方法

(1) 使用した素子 使用した素子を表-2

表-2 セラミックの種類と吸水率

製作会社	呼び吸水率	直径mm	厚さmm	真空吸水率%		アルカリ
				純	水	
D 社	10%	10	3	12.55	0.714	10.96
			5	10.82	0.871	8.79
		20	3	9.04	0.632	9.98
			5	11.40	0.447	12.18
			10	11.74	0.547	12.74
			5	21.05	0.360	16.12
	20%	10	5	19.11	0.469	22.33
			3	20.26	1.280	20.00
		20	5	18.48	1.466	19.09
			10	18.30	0.754	20.05
			3	16.94	0.500	15.81
			5	13.35	1.646	14.03
S 社	10%	10	3	10.18	0.500	11.97
			5	12.55	0.685	10.60
		20	10	6.16	0.624	7.37
			3	10.18	0.500	11.97
			5	12.55	0.685	10.60
			10	6.16	0.624	7.37

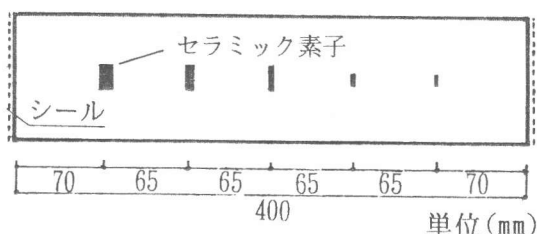


図-4 セラミック素子の配置

に示す。D社製の素子はD社研究所で試製したものである。また、S社製の素子はカオリンに少量の水を加えてかき混ぜ、成型したのち1200℃で焼成して作った。

(2) 素子の吸水、乾燥特性試験 電極を取りつけていない素子を48時間真空処理した後、48時間純水及びCa(OH)₂飽和溶液を吸水させて飽水状態とし、真空飽和吸水率を求めた。次に、飽水させた素子をシリカゲルの入ったデシケーター内で乾燥させ、質量減少率を測定した。

(3) 空気中での乾燥に伴う素子の電気抵抗、静電容量の測定 電極を取り付けたセラミック素子を真空飽水後、シリカゲルの入ったデシケーター内で乾燥させ、乾燥に伴う素子の電気抵抗及び静電容量を測定した。

(4) 電極面積の検討 S社製20φ×4mm（呼び吸水率10%）の素子を用い、電極面積を素子の平行2面の面積に対して25, 50, 75, 100%とし、前項(3)の方法により、電気抵抗及び静電容量を測定した。

(5) モルタル中での乾燥に伴う素子の電気抵抗、静電容量の測定 電極を取り付けたセラミック素子を10×10×40cmの鋼製型枠の中に図-4に示すように供試体中央部に固定し、セメント：砂を1:3、水セメント比60%、フロー値180のモルタルを打設した。材令1日で脱型し、モルタルの乾燥（温度20℃、湿度60%）に伴う素子の電気抵抗及び静電容量を測定した。

4.2 結果及び考察

(1) 素子の吸水・乾燥特性 素子の真空飽和吸水率を表-2に示す。今回使用した素子の吸水率は、D社製呼び吸水率10%の素子が9～12%、20%の素子は18～22%、S社製呼び吸水率10%の素子は6～16%であり、S社製の素子は製造方法が異なるため呼び吸水率に対するばらつきが大きかった。また、素子の大きさが小さいほど、厚さが薄いほど飽和吸水率は大きい傾向にあった。次に、素子の乾燥特性を図-5に例示する。寸法の小さい素子は大きい素子に比べて速やかに乾燥し、周囲の環境に対し敏感である。一般にコンクリート中に埋め込んで使用するこの種の試験では素子の寸法は小さい方がよいと思われる。

(2) 素子の形状と電気抵抗、静電容量 形状・寸法を変えた素子の空気中での乾燥に伴う電気抵抗、静電容量を図-6に例示する。素子の含水率の影響を明確にするため、図-6の横軸は素子の真空飽和吸水率を1.0とした含水比を(1)式によって求めたものである。この種の実験により求められる素子の電気抵抗、静電容量は測定範囲が広いことが望ましい。このように考えると、寸法が小さく(10φmm)、厚さが薄い(3mm)素子は、全体的にみて電気抵抗、静電容量いずれも飽水状態と絶乾状態との差が大きく、優れている。

$$\text{含水比} = \text{含水率} / \text{真空飽和吸水率} \cdots (1)$$

(3) 素子の吸水率と電気抵抗・静電容量 素子の空気中での乾燥による電気抵抗、静電容量

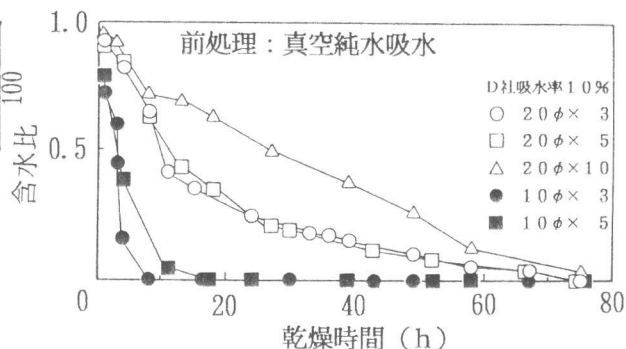


図-5 乾燥特性（素子の全面より乾燥）

(3) 素子の吸水率と電気抵抗・静電容量 素子の空気中での乾燥による電気抵抗、静電容量の変化を図-7に例示する。真空飽和吸水率の大きい素子ほど電気抵抗、静電容量とも測定範囲が広いことがわかる。

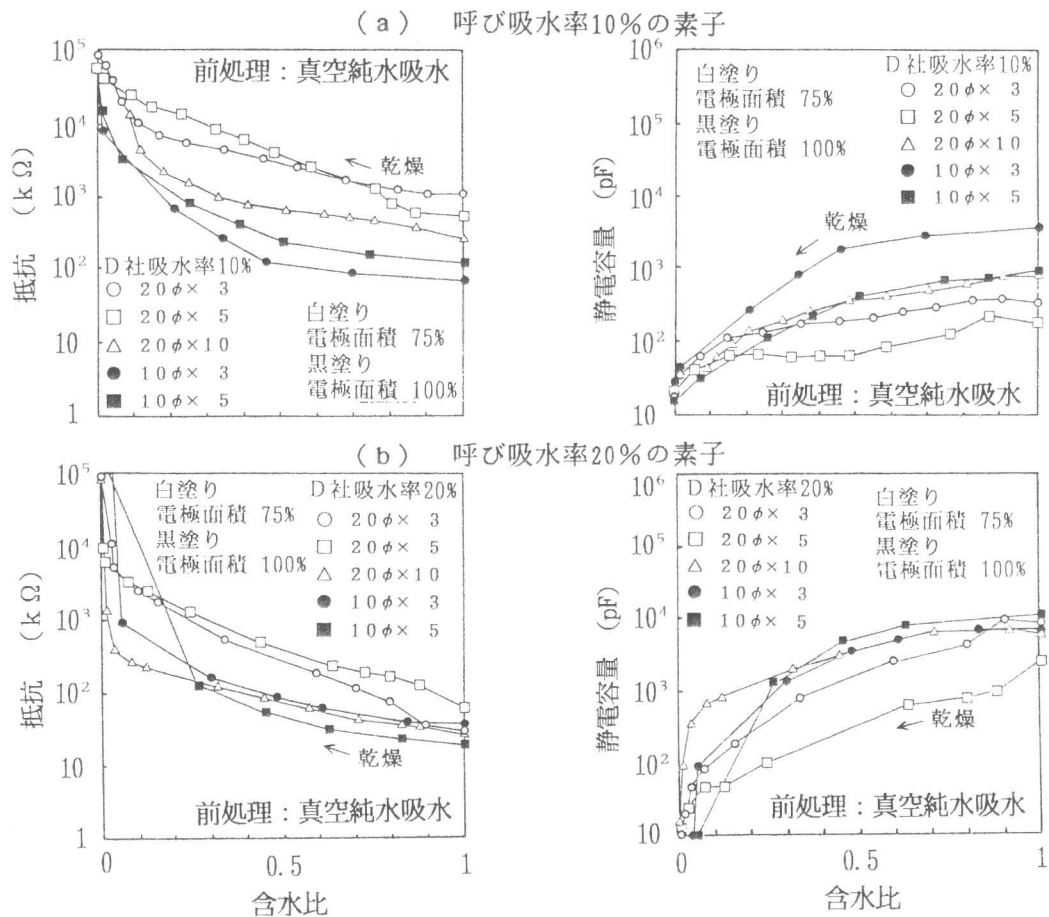


図-6 素子の空気中での乾燥と電気抵抗、静電容量の関係（形状の影響）

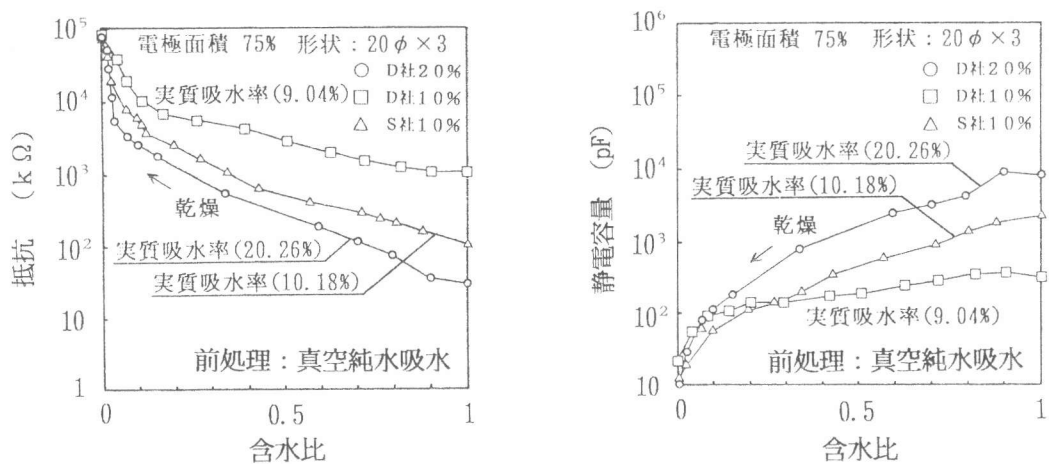


図-7 素子の空気中での乾燥と電気抵抗、静電容量の関係（吸水率の影響）

(4) 素子の電極面積と電気抵抗 電極面積を変えた20φmm素子の空気中での乾燥に伴う電気抵抗変化を図-8に示す。素子の電気抵抗は電極の面積によって影響を受けにくかった。これは主として、素子固有のばらつきのためであろう。飽水状態では、電極面積の大きいものは抵抗が小

った。ただし、電極面積 100%の素子は周縁部のシールが不十分であると、電極周縁部から電気がリークする恐れがある。

(5) モルタル中での乾燥に伴う素子の電気抵抗、静電容量 モルタルの質量減化率と素子の電気抵抗、静電容量との関係を図-9に例示する。横軸は (2)式から求めたモルタルの質量減化率を示した。抵抗は質量減少率の増加(乾燥)に伴って大きくなり、静電容量は質量減少率の増加に伴って小さくなっている。

$$\text{質量減少率 (\%)} = \left(1 - \frac{\text{モルタル測定時質量}}{\text{モルタル脱型時質量}} \right) \times 100 \cdots (2)$$

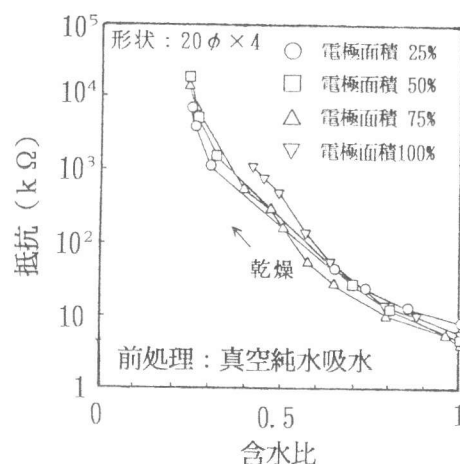


図-8 電極面積の影響

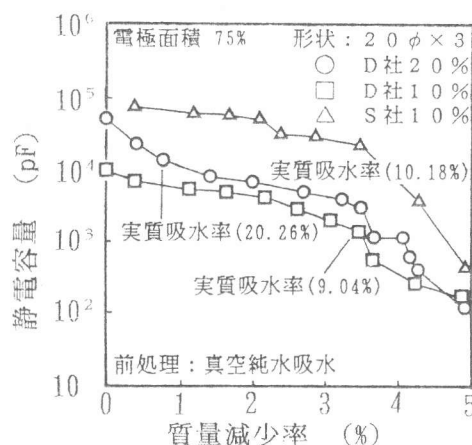
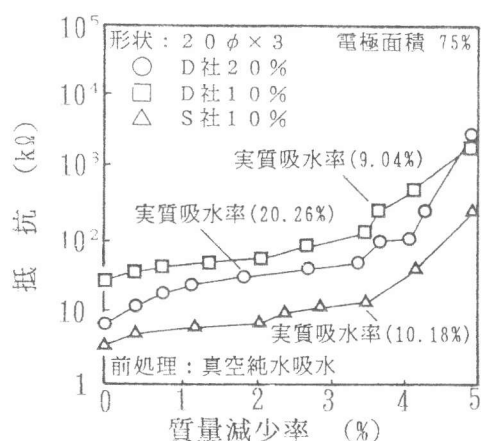


図-9 モルタルの質量減少率と素子の電気抵抗、静電容量との関係(吸水率の影響)

5. まとめ

本研究は、セラミック素子を用いたコンクリートの含水率測定方法を開発することを目的とし、以下の基礎的な検討を行った。その結果、次のことが明らかになった。(1) 素子の電気抵抗、静電容量の測定は低周波数で測定する方が良い。(2) 絶縁体は接着性、安定性、耐アルカリ性、作業性、吸水性等を検討した結果A社製接着剤Kが優れている。(3) 素子の寸法は小さい方が周囲の環境に敏感となり、適している。(4) 素子の吸水率が大きい方が電気抵抗、静電容量の測定範囲が広がるので、適している。

謝辞 本研究は、平成2年度文部省科学研究費の補助を受けた。鹿島建設株式会社の協力を得た。また、セラミック素子の製作にはダントー(株)営業部企画課森大氏、住友セメント技術研究所佐藤雅男氏、川崎久己氏、山宗化学(株)水谷善文氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 笠井芳夫ほか：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 PP.9～20 1962年、第4報～第5報 PP.13～20 1963年)
- 2) 鎌田英治ほか：コンクリート内部の含水量の測定、セメント技術年報、pp.288-292、1976年
- 3) 大岸佐吉ほか：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、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、PP.389-394 1990年
- 4) 電気学会編：電食・土壌腐食ハンドブック、コロナ社、pp.5～9 1982年
- 5) 川村満紀：アルカリ骨材反応(岸谷孝一ほか編)、技報堂、pp.41 1986年