

論文 交流作用時の硬化コンクリートの電氣的性質に関する基礎的研究

野田 一弘^{*1}・河野 広隆^{*2}・久田 真^{*3}・森濱 和正^{*4}

要旨：交流作用時の物質の誘電現象を利用してコンクリートの品質評価方法の可能性を検討するため、硬化コンクリートの電氣的性質として比誘電率の測定を行った。コンクリートの含水状態、W/Cの相違、材齢の相違および混和材の使用などが比誘電率に及ぼす影響について検討を行った結果、コンクリートの含水状態やW/Cの影響が大きいことがわかった。また、低周波域で測定した比誘電率によって、コンクリートの品質を評価できる可能性があることを示した。

キーワード：硬化コンクリート、比導電率、比誘電率、含水率

1. はじめに

コンクリート構造物の鉄筋位置やかぶりを非破壊で測定する方法として、電磁波反射法がある。この測定では、かぶり算出の際にコンクリートの比誘電率が必要であり、適切な比誘電率を把握することが、かぶりの測定の精度向上につながる。一般的に比誘電率は、コンクリートの品質や状態によって変化すると考えられているものの、その詳細については必ずしも明確であるとはいえないのが現状である。

一方、比誘電率は他の分野においては、物質の品質を非破壊で評価する指標として用いられる場合がある¹⁾。コンクリートにおける比誘電率の性状が明確となれば、比誘電率によって非破壊でコンクリートの品質を評価できる可能性も考えられる。

そこで、本文ではまずコンクリートの基本的な電氣的性質を把握するため、交流電流を流したときの比誘電率の測定を行った。この際、比較として比導電率の検討も加えた。次いで、比誘電率による品質評価方法の可能性について検証するため、水セメント比（以下W/C）や空気量、混和材の使用などが比誘電率に及ぼす影響

についての検討を行った。

2. 試験方法

2.1 比導電率ならびに比誘電率の測定

表-1にコンクリートの配合を示す。いずれの配合においても、単位水量は160kg/m³、細骨材率は45%一定とした。コンクリートの練混ぜは、水平2軸型の強制練りミキサで行った。打設後2日目に脱型し、試験材齢まで20℃の水中で養生した。比導電率ならびに比誘電率の測定は、φ100mm×200mmの円柱体から上下25mmを除いて3等分した厚さ約50mmの円柱体を使用して行った。

比導電率ならびに比誘電率の測定方法を図-1に示す。測定においては、銅板を電極としてコンクリートを挟み込む形で測定を行った。また、コンクリート表面に均一に電流を流すために、既往の研究²⁾で用いられているカルボキシ・メチル・セルロースを塩化ナトリウム5%溶液で練混ぜてゲル状にした物質（以下CMC）をコンクリートと電極間の媒体として用いた。測定には市販のLCRメータを用い、電圧は1.0V、周波数は1mHz～5MHzに変化させた。比導電率は(1)式、比誘電率は(2)式により算出した。

*1 独立行政法人土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 修（工）（正会員）

*2 独立行政法人土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 主席研究員 工修（正会員）

*3 独立行政法人土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 博（工）（正会員）

*4 独立行政法人土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 （正会員）

表-1 配合条件

記号	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	B (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	SP (%)	No.70 (%)	AE (%)
WC30	30	45.0	4.5	160	533	---	735	920	1.0	---	0.002
WC40	40	45.0	4.5	160	400	---	785	982	---	0.250	0.001
WC55	55	45.0	4.5	160	291	---	826	1,032	---	0.250	0.001
WC70	70	45.0	4.5	160	229	---	849	1,062	---	0.300	0.001
AR1.5	55	45.0	1.5	160	291	---	861	1,076	---	0.200	---
AR7.5	55	45.0	7.5	160	291	---	790	988	---	0.200	0.004
BF45	55	45.0	4.5	160	160	131	821	1,026	---	0.250	0.002
BF65	55	45.0	4.5	160	102	189	819	1,024	---	0.250	0.003

セメント：普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm³ 細骨材：大井川産川砂，密度 2.61g/cm³
 高炉スラグ微粉末（4000）：密度 2.88g/cm³ 粗骨材：笠間産碎石，密度 2.66g/cm³
 混和剤：SP（ポリカルボン酸系），No.70（リグニンスルホン酸系）

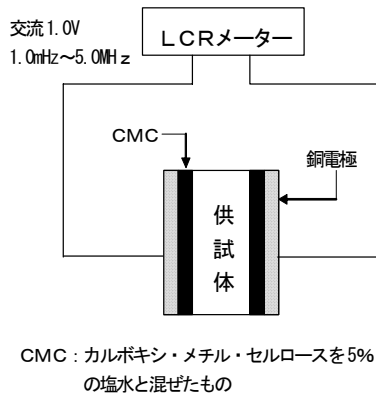


図-1 比導電率および比誘電率の測定方法

$$\kappa = L / RA \quad (1)$$

ここに、 κ ：比導電率（1/（ $\Omega \cdot \text{mm}$ ））

R：抵抗値（ Ω ）

L：供試体の長さ（mm）

A：供試体の断面積（mm²）

$$\varepsilon = (C_p \cdot L) / (A \cdot \varepsilon_0) \quad (2)$$

ここに、 ε ：比誘電率（単位なし）

C_p ：静電容量（F）

L：供試体の長さ（m）

A：供試体の断面積（m²）

ε_0 ：真空での空気の誘電率（F/m）
 （0.008854 × 10⁻⁹（F/m））

2.2 塩分浸透供試体の準備

コンクリート中に塩分が浸透した場合の比誘電率への影響を検討するため、予めコンクリート内に塩分を浸透させた供試体を準備した。コ

ンクリート中への塩分の浸透方法は、コンクリート表面から塩分が浸透するよう AASHTO T277-96 に準拠して行った。塩分の浸透深さは、通電時間を調整することで、厚さ 50mm の供試体の半分程度の深さおよび全面浸透の 2 水準とした。前者は電圧 60V で 6 時間、後者は 30 時間通電した。塩分浸透後は直ちに比誘電率の測定を行い、その後供試体を深さ方向に割裂し、割裂面に 0.1N の硝酸銀溶液を噴霧して塩分の浸透深さを求めた。

2.3 相対含水率ならびに空隙率の算出方法

相対含水率と比誘電率の関係の検討は、供試体を乾燥程度を変化させながら、比誘電率の測定を繰り返し行った。比誘電率測定時の供試体の相対含水率は(3)式により算出した。絶乾状態とは、質量が一定となるまで 105℃で炉乾燥を行った状態である。

空隙率は、飽水状態（相対含水率 100%）のコンクリートでは、すべての空隙中が水で満たされていると考え、その水の量を測定することで、(4)式により算出した。

$$\text{相対含水率}(\%) = \left(\frac{W_i - W_d}{W_0 - W_d} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{空隙率}(\%) = \left(\frac{W_0 - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad (4)$$

ここに、 W_i ：測定時の供試体質量

W_0 ：飽水状態の供試体の質量

W_d ：絶乾状態の供試体質量

3. コンクリートの電氣的性質に関する基礎的検討

3.1 コンクリートの比導電率および比誘電率の周波数依存性

飽水状態としたコンクリートについて、周波数を 1mHz～5MHz まで変化させた場合の比導電率と比誘電率の測定結果を図-2および図-3に示す。周波数が大きくなると比導電率は大きくなり、比誘電率は小さくなる傾向が認められた。この結果は、一般の物質に交流電流が作用した場合の比導電率および比誘電率の周波数依存性と同様の傾向であることから¹⁾、図-1の方法で測定した結果は、おおむね妥当であるといえる。また、本研究の範囲での高周波域での測定結果は、一般的に言われているコンクリートの比誘電率に近い値であった³⁾⁴⁾⁵⁾。

3.2 コンクリートの含水状態と比誘電率の関係

コンクリートの含水状態が比誘電率に及ぼす影響について検討するため、W/Cを55%としたコンクリートで、その相対含水率を変化させながら、比誘電率の測定を繰り返し行った。測定は、測定中の材齢経過によるコンクリートの品質変化の影響を少なくするため、打設から材齢4ヶ月程度経過した供試体で行った。

測定時の周波数を1mHzとした場合の比誘電率の測定結果を図-4に示す。これによれば、コンクリートの相対含水率が90%程度までは、飽水状態（相対含水率100%）の測定結果とほぼ同等の値であった。相対含水率が90%以下の場合には、相対含水率の低下に伴い、比誘電率も低下する傾向が認められ、相対含水率が50%程度まで低下すると、比誘電率は1桁程度小さくなるが示された。

以上の結果から、コンクリートの含水状態は、比誘電率に非常に大きく影響を及ぼす因子であることが認められた。このため、比誘電率を用いてコンクリートの品質を評価する場合には、含水状態を同等にしておくことが非常に重要であるといえる。よって、以降の検討における比

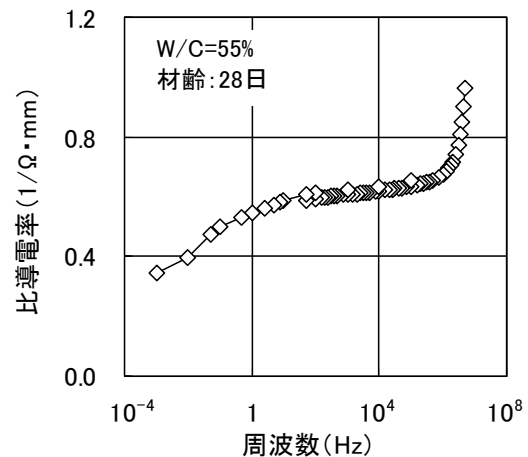


図-2 比導電率の周波数依存性

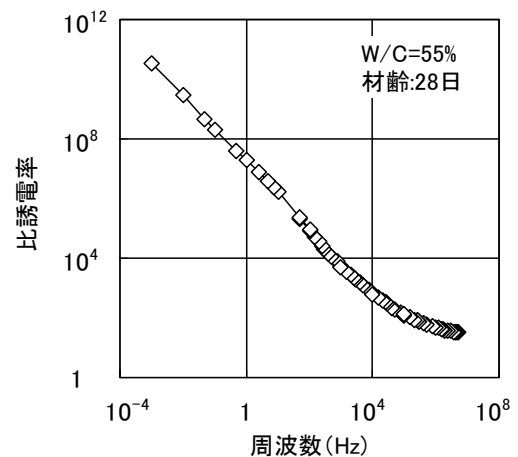


図-3 比誘電率の周波数依存性

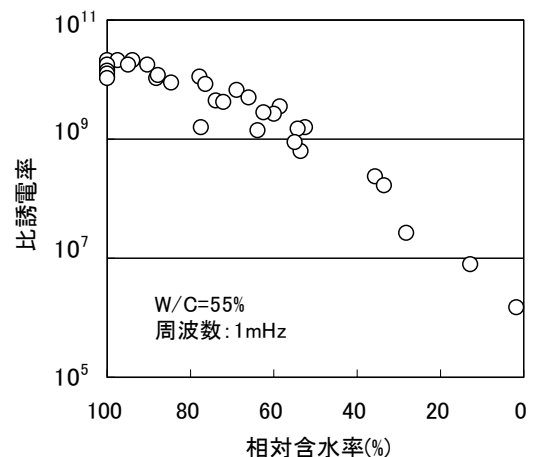


図-4 相対含水率と比誘電率の関係

誘電率の測定は、飽水状態のコンクリートで行うものとする。

3.3 コンクリート、モルタルおよび粗骨材の比誘電率の関係

コンクリートはモルタルと粗骨材の2相から

なる複合材料と考えることができる。そこで、コンクリートをモルタル部分と粗骨材とに大別して各々の比誘電率を測定し、コンクリートの比誘電率と比較した。測定したモルタルは、コンクリートからウェットスクリーニングして採取したものである。粗骨材はコンクリート供試体と同一寸法の原石を切り出した。供試体の寸法は、何れも $\phi 100\text{mm} \times 50\text{mm}$ の円柱体である。測定結果を図-5に示す。モルタルの比誘電率はコンクリートよりも大きく、粗骨材の比誘電率はコンクリートよりも相当小さい値であった。これより、コンクリートの比誘電率は、モルタルの性状が支配的であると考えられる。このことは、塩分の浸透や中性化などモルタル部分の品質が変化するような劣化においては、比誘電率によって劣化の程度を評価できる可能性を示唆していると考えられる。

次にコンクリート中のモルタルと粗骨材の体積比に応じて、モルタルと粗骨材の比誘電率を合計した結果とコンクリートの比誘電率との比較を図-6に示す。コンクリートの比誘電率とモルタルと粗骨材の比誘電率の合計は、ほぼ一致した。以上より、複合材料であるコンクリートの比誘電率は、モルタルの性状が支配的ではあるが、モルタルの比誘電率と粗骨材の比誘電率の複合であると考えてよいと思われる。

4. 比誘電率に及ぼす各種要因の影響

4.1 比誘電率とC/Wの関係

図-7は、比誘電率とセメント水比（以下C/W）の関係を周波数ごとに示したものである。C/Wが大きいもの程、比誘電率は小さく測定された。これは、C/Wの大きいものほど組織が緻密化するため、コンクリート中の含水量が低下し、抵抗が大きくなる。そのため、誘電現象が起こりにくくなり電荷が発生しにくくなるため、比誘電率は小さくなると考えられる。

また、周波数が小さいもの程、絶対値としては、C/Wの相違がより明確に示されていた。以上のことから比誘電率でコンクリートのW/Cを推定できる可能性があるということができ、

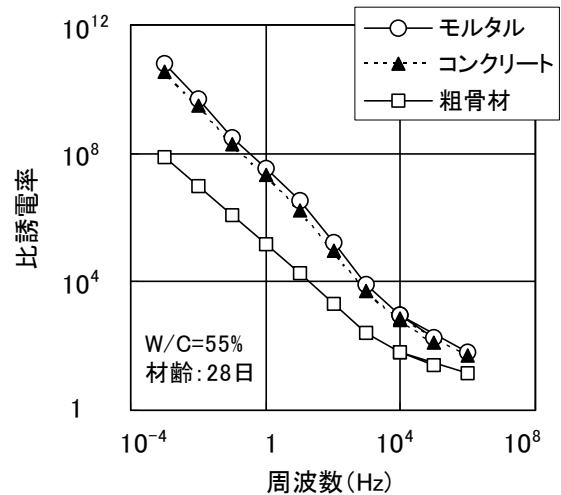


図-5 コンクリート・モルタル・粗骨材の比誘電率の比較

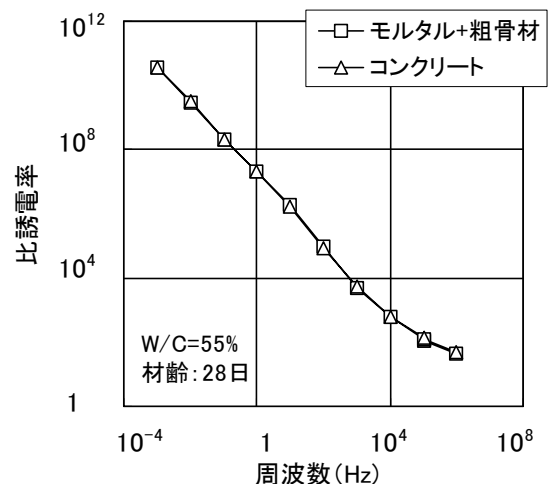


図-6 モルタルと粗骨材の比誘電率の合計とコンクリートの比誘電率の比較

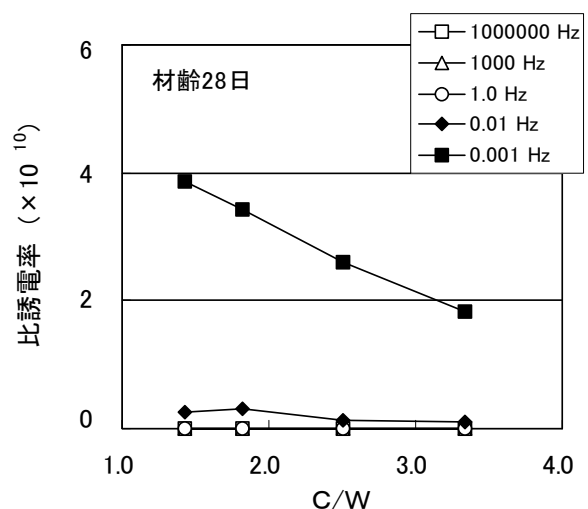


図-7 比誘電率とC/Wの関係

より低い周波数で測定することで、W/Cの差をより明確に捉えることができると考えられる。

4.2 比誘電率に及ぼす材齢の影響

図-8は、W/Cを55%としたコンクリートの材齢に伴う比誘電率の変化を1mHzで測定した結果である。これによれば、材齢に伴い比誘電率は小さくなっており、材齢に伴い組織が緻密化したためと考えられる。

4.3 比誘電率に及ぼす空気量の影響

W/Cを55%、空気量を1.5~7.5%に変化させた場合の比誘電率を図-9に示す。図-8の結果と同様に、いずれの空気量の場合にも材齢に伴い比誘電率は小さくなっていった。しかしながら、空気量の変化による比誘電率の違いは確認できなかった。これらの結果から、空気量の相違程度のコンクリートの品質の違いでは、比誘電率に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4.4 比誘電率に及ぼす混和材の影響

図-10は、W/Cを55%、混和材として高炉スラグ微粉末を45%および65%置換えたコンクリートについて、測定した比誘電率と置換率の関係を示したものである。高炉スラグ微粉末を混和したコンクリート（以下BF）では、BFを混和しないコンクリート（以下、無混和）に比べ比誘電率は小さくなっており、置換率が高いほど比誘電率は小さくなる傾向であった。材齢が進行すると置換率の違いによる比誘電率への影響は小さくなるが、無混和に比べ比誘電率が小さくなる傾向は同様であった。

4.5 コンクリート中の塩分の影響

コンクリート中に塩分を含んだ場合の比誘電率を図-11に示す。供試体への塩分浸透量が浸透面から20mm程度の場合の比誘電率は、塩分を含まない場合の比誘電率と大きな差は確認できなかった。供試体全体に塩分が浸透した場合（図上では塩分浸透深さ50mmと表記）には、塩分浸透深さが20mm程度の場合や塩分を含まない場合に比べて、比誘電率は大きく測定された。本実験では、電氣的に塩化物イオンを浸透させたため、コンクリート中の塩分濃度は、深

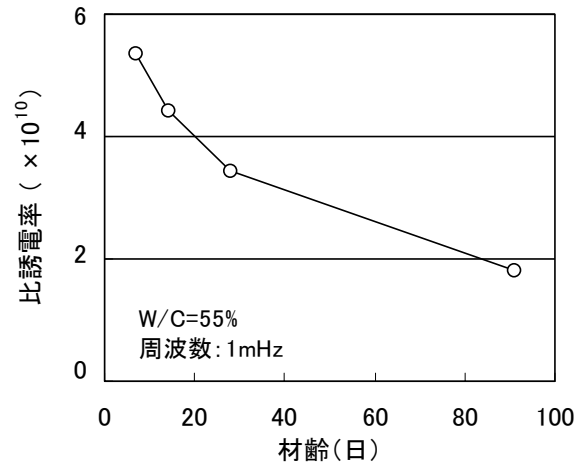


図-8 比誘電率と材齢の関係

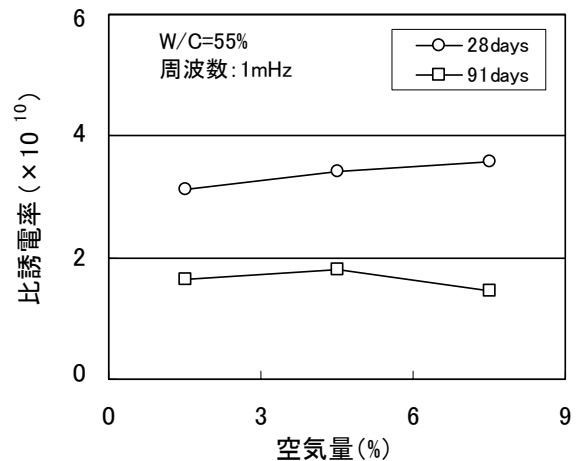


図-9 比誘電率と空気量の関係

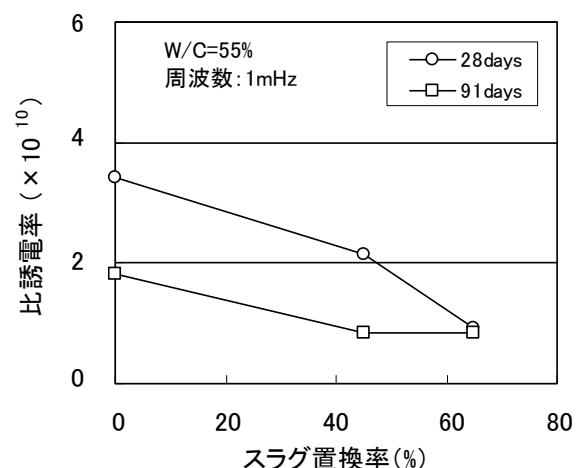


図-10 比誘電率と置換率の関係

さにかかわらず一定値に近いと考えられる。よって、本研究の範囲では、塩分濃度よりも浸透深さが比誘電率に影響したと考えられる。塩化

物イオンが存在することで、コンクリートの抵抗が小さくなり、電荷が生じやすくなり比誘電率が大きくなったものと考えられる。

以上の結果から、コンクリート中に浸透した塩化物イオンの存在を比誘電率により推定できる可能性が認められた。

4.6 空隙率と比誘電率の関係

図-12は、図-7、9および10の材齢91日における比誘電率の測定結果とコンクリートの空隙率の関係を示したものである。普通セメントを使用した場合（以下 OPC）は、バラツキはあるものの、空隙率が大きくなると比誘電率も大きくなる傾向が認められる。飽水状態のコンクリートの測定結果であることから、比誘電率の相違は、空隙に含まれる水分量の違いによるものと考えられる。これは、比誘電率でコンクリートの緻密さを評価できる可能性を示唆していると考えられる。

一方、BF では、空隙率の大小による比誘電率の明確な違いは確認できなかった。この結果と図-10での結果とを併せて考えると、BF では高炉スラグ微粉末自体が、比誘電率に影響を及ぼしている可能性が考えられる。

5. まとめ

コンクリートの比誘電率を測定した結果、低周波域での測定結果は、品質評価の指標として有用なデータとなる可能性がある。また、コンクリートの比誘電率に大きく影響を及ぼす因子は含水状態であり、飽水状態でのコンクリートの比誘電率により、コンクリートの緻密さを評価できる可能性を示した。

比誘電率による品質評価方法の信頼性を高めるためには、実構造物のようにこれらの影響因子が複合した場合の性状を明らかにする必要がある、更なるデータの蓄積が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 花井哲也：不均質構造と誘電率 ―物質を壊ささずに内部構造を探る―，吉岡書店，2000

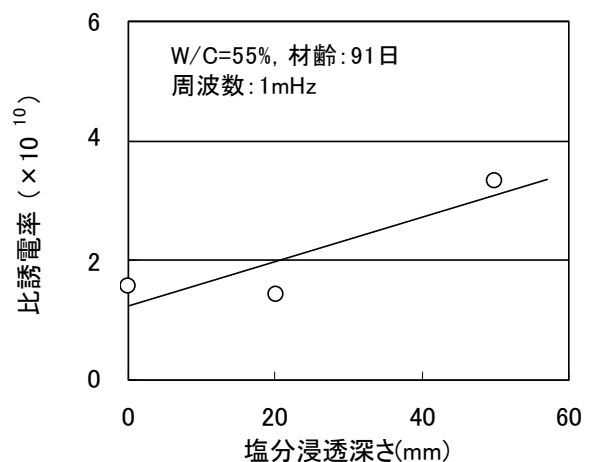


図-11 コンクリート中の塩分が比誘電率に及ぼす影響

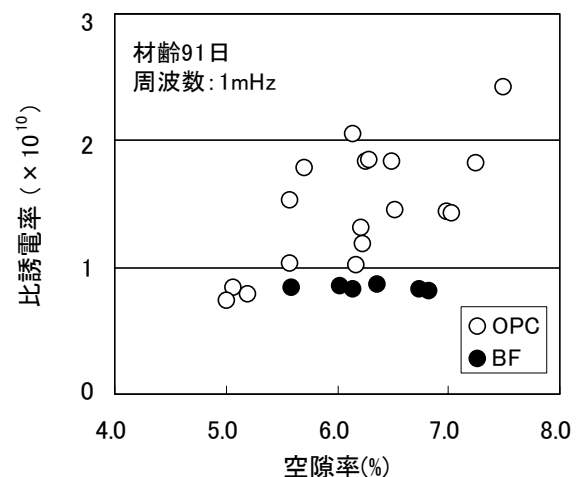


図-12 比誘電率と空隙率の関係

- 2) 土木研究所：コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究，土木研究所資料，第3716号，pp.5-9，平成12年3月
- 3) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'02（基礎編），pp.118
- 4) 森濱和正ほか：コンクリート内部の含水状態と比誘電率の関係，日本非破壊検査協会平成11年春季大会講演概要集，pp.91-94，1999
- 5) 溝淵利明ほか：電磁波による鉄筋コンクリート中の塩分測定に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，2002