

# 論文 骨材種類や混和材がモルタルの電気抵抗率に与える影響に関する一考察

井貝 武史\*1・佐伯 竜彦\*2・斎藤 豪\*3

**要旨:** 本研究では、鉱物組成の異なる数種の骨材を用いて、骨材種類や混和材がモルタルの電気抵抗率に与える影響について検討を行った。また、空隙構造の複雑性を評価する指標として酸素拡散係数に着目し、酸素拡散係数と電気抵抗率との関係について検討を行った。その結果、電気抵抗率に与える混和材の影響として、高炉スラグ微粉末と比較し、シリカフュームの置換率の影響が大きいことが分かった。また、電気抵抗率に与える骨材種類の影響は、骨材界面（遷移帯）性状の影響のみではなく、骨材そのものの電気抵抗率など他の影響が含まれる可能性が示唆された。

**キーワード:** 電気抵抗率, 混和材, 骨材種類, 遷移帯

## 1. はじめに

コンクリート構造物の塩害に関する品質評価指標の一つとして電気抵抗率が注目されている。これは、電気抵抗率の測定方法が比較的簡便で、非破壊かつ短時間で結果を得ることができること、電気抵抗率とコンクリートの遮塩性能に相関があることが既往の研究<sup>1-3)</sup>より指摘されているためである。

しかしながら、電気抵抗率に与える影響因子は、例えば空隙構造や含水率、伝導物質である空隙中のイオンなど多岐にわたっており、まだ十分に解明されていない。

コンクリートは、骨材とセメントペーストから成る二相複合材料であり、コンクリートの品質は、セメントペースト部の水和物の量および物理的・化学的性質に影響を受けるとともに、骨材の影響を受ける。

コンクリートに用いられる骨材は、その多くがコンクリート構造物の建設される地域周辺で産出されたものであり、自由に選択することができないことから、骨材種類が電気抵抗率ひいてはコンクリートの耐久性に与える影響を解明することは重要である。

そこで本研究では、鉱物組成の異なる数種の骨材を用いて、細骨材の種類および混和材がモルタルの電気抵抗率に与える影響を評価することを目的に検討を行った。

また、骨材とセメントペーストとの境界領域は、遷移帯と呼ばれる、Ca(OH)<sub>2</sub>に富み他のバルク部分と不連続で、空隙量が多い部分<sup>4)</sup>であることに着目し、空隙構造複雑性を評価する指標として酸素拡散係数を用い、酸素拡散係数と電気抵抗率との関係について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

実験に使用した結合材は、研究用普通ポルトランドセメント (OPC)、高炉スラグ微粉末 (BFS)、フライアッシュ (FA) およびシリカフューム (SF) の4種類である。各結合材の品質を表-1に示す。練混ぜ水はイオン交換水を用い、化学混和剤は使用していない。

実験に使用した細骨材は、セメントの強さ試験に用いるISO標準砂 (ISO Standard Sands) と、変成岩砕砂 (Metamorphic rock)、安山岩砕砂 (Andesite) および石灰岩砕砂 (Lime stone) の4種類とした。実験に先立ち、XRD/Rietveld解析により各骨材の鉱物組成を求めた。算出した骨材の鉱物組成を表-2に示す。併せて、骨材の物性を表-3に示す。また、細骨材 (砕砂) は、2.7~4.9%程度の微粒分を含んでいたため、微粒分の影響を排除するため、75μmふるいを用いて微粒分を洗い流したもの

表-1 セメントおよび混和材の品質

材料名	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	化学成分 (wt %)					
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
OPC	N	3.16	3440	20.91	5.45	2.94	65.18	1.54	2.08
BFS	B	2.91	4290	33.84	14.22	0.33	43.43	5.59	2.05
FA	F	2.14	3500	56.65	27.63	4.40	3.58	1.20	-
SF	S	2.20	195000*	96.50	0.46	0.13	0.18	0.37	-

※SFの比表面積はN<sub>2</sub>吸着法より求めたBET比表面積

\*1 (株)福田組 土木部技術部 担当課長 博士(工学) (正会員)

\*2 新潟大学 工学部工学科 教授 博士(工学) (フェロー会員)

\*3 新潟大学 工学部工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

表-2 骨材の鉱物組成

骨材種類	鉱物組成割合 (wt %)							
	Quartz	Plagioclase		Orthoclase	Hornblende	Chamosite	Muscovite	Calcite
		Albite	Anorthite					
ISO 標準砂	99.0	-	-	-	-	-	-	-
変成岩砕砂	28.1	35.7	11.3	5.9	7.2	7.8	-	-
安山岩砕砂	-	14.9	49.5	7.2	-	-	28.1	-
石灰岩砕砂	8.5	-	-	-	-	-	-	91.5

表-3 細骨材の物性

骨材種類	記号	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	実積率 (%)
標準砂	I	2.64	2.64	-	66.7
変成岩	M	2.80	2.77	1.35	60.0
安山岩	A	2.68	2.66	1.05	58.9
石灰岩	L	2.66	2.64	0.76	63.0

表-4 配合

結合材種類	記号	水結合材比 (%)	混和材置換率 (%)		
			B	F	S
N	N45	45	0	0	0
N+B	NB45-40	45	40	0	0
	NB45-70	45	70	0	0
N+F	NF45-30	45	0	30	0
N+S	NS45-4	45	0	0	4
	NS45-10	45	0	0	10
N+B+S	NBS45-40-3	45	40	0	3

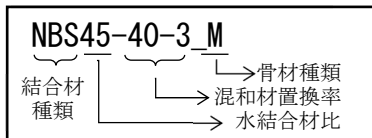


図-1 配合表記方法

を用いた。また、粒度分布の違いによる影響を排除するため、粒度分布を標準砂と同程度となるよう粒度調整を行った。

配合を表-4に示す。水結合材比は45%一定とした。混和材置換率(質量比)は、混合セメントのB種・C種の置換率およびセメントの少量混合成分割合を参考に、普通ポルトランドセメント(N)に混和材を1種類混合した2成分混合では、高炉スラグ微粉末(B)は40%および70%、フライアッシュ(F)は30%、シリカフェーム(S)は4%および10%とし、普通ポルトランドセメントに2種類の混和材を混和した3成分混合では、高炉スラグ微粉末40%およびシリカフェーム3%とした。モルタル供試体の骨材体積率は50%一定とした。なお、今後実験結果の配合は、図-1に示すように結合材種類、水結合材比、混和材置換率および骨材種類の組み合わせにより表記する。

## 2.2 試験体作製

モルタルの練混ぜは、JIS R 5201に準拠して行った。インピーダンス測定に用いる試験体は、図-2に示すように、φ50mmの円柱状供試体の中心にφ10×100mmのみがき丸鋼を配置し、中央部50mm幅を除き、端部をエポキシ樹脂でシールした。酸素拡散係数の測定は、30×40×5mmの薄板状供試体を用いた。空隙率および細孔径分布の測定のための試料は、スチロール棒瓶(10ml)に打設した。すべての配合について材齢2~3日において脱型した後、湿布で包みポリ塩化ビニル袋内に密封し、

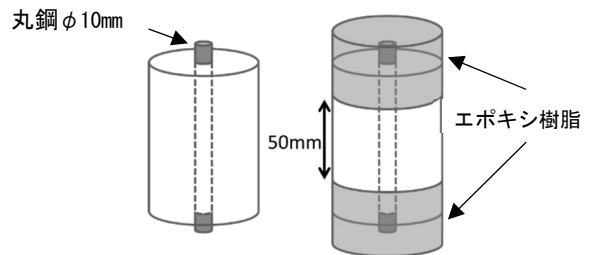


図-2 インピーダンス測定用供試体

20°C恒温槽内において材齢28日まで養生を行った。

各配合・骨材毎に2供試体を作製し、それぞれについて測定し平均した。

## 2.3 実験方法

### (1) 交流インピーダンスの測定

交流インピーダンスの測定は、金属-溶液界面およびそこで起こる現象をすべて電気的回路に置き換えて解析を行う。電気的回路は抵抗、コンデンサー、コイルなどの電気回路素子の組み合わせ(等価回路)により表すことができ、これらの電気的な情報を得ることによって、金属-溶液界面の物性や反応に関する知見を得ることができる。たとえば、セメント硬化体の等価回路は図-3で表すことができる<sup>9)</sup>。ここで、Rsは液抵抗(セメント硬化体自体の抵抗)、Cは電気二重層容量、Rpは電荷移動抵抗である。図-3の等価回路において、低周波数の電圧が印加されると、金属-溶液界面での電気二重層の存在から、印加した電圧の周波数によって異なる振幅および位相差をもつ応答が得られる。すなわち、インピーダンスは絶対値|Z|と位相差θによって特徴づけられ、さらに周波数の異なる交流を与えることで周波数に対する

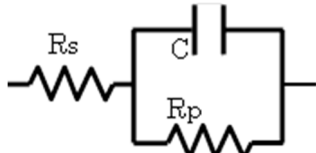


図-3 セメント硬化体の等価回路モデル

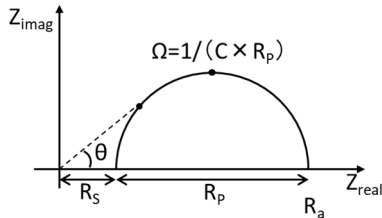


図-4 複素平面表示

特性も得ることができる。図-3 の等価回路のインピーダンス  $Z$  は式(1)で表される。

$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C} \quad (1)$$

ここで、 $j$ : 複素数,  $\omega$ : 角周波数, である。

周波数が高い状態では、電気二重層容量のインピーダンス ( $1/\omega C$ ) は非常に小さくなるため電流は  $C$  側に流れ、全体のインピーダンスは  $Z \approx R_s$  となる。一方、低周波の状態ではコンデンサーのインピーダンスは無限大となり、電流は  $R_p$  側を流れ、全体のインピーダンスは  $Z \approx R_s + R_p$  となる。このように、周波数の異なる交流を与えることで等価回路の各成分を分けて求めることができる。

本研究では、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$  供試体を用いてインピーダンス測定を行い、セメント硬化体の等価回路モデルを求めた。測定にはケミカルインピーダンスメータを用い、4~1MHz の周波数領域でインピーダンスを測定した。基準電極は銀塩化銀電極を用い、計測時の供試体の浸漬溶液として、水酸化カルシウム飽和溶液を使用した。

測定したインピーダンスを、図-4 に示すように複素平面表示 (Cole-Cole プロット) し、図-3 のように仮定した等価回路と照らし合わせて解析することで各パラメータ値 ( $R_s$ ,  $R_p$ ,  $C$ ) を求めることができる。しかしながら、本研究で測定に用いたケミカルインピーダンスの周波数 (4~1MHz) の範囲では、各パラメータを明瞭に分離することが困難であったことから、電荷移動抵抗とコンクリート抵抗の和を、硬化体の電気抵抗率であると仮定して、半円が実部軸と交わる点を供試体の交流インピーダンス  $R_a (= R_s + R_p)$  とした。この交流インピーダンスの値から、式(2)を用いて電気抵抗率  $\rho_t$  を算出した<sup>6)</sup>。

$$\rho_t = \frac{R_a \cdot A}{L} \quad (2)$$

ここに、 $\rho_t$ : 供試体電気抵抗率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )、 $R_a$ : 交流インピーダンス測定値 ( $\Omega$ )、 $L$ : 電極間距離 (m)、 $A$ : 有効電

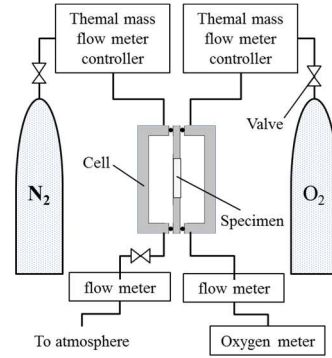


図-5 酸素拡散試験装置の概略図

極面積 ( $\text{m}^2$ )、である。

## (2) 酸素拡散係数の測定

セメント系硬化体の空隙構造複雑性を定量化することは、一般的に困難であるとされている。一方で菊地らは、非帯電粒子である気体、特にセメント系硬化体を変質させない酸素ガスの拡散係数を測定することによって、空隙構造の複雑性による影響を抽出する試みを行っている<sup>7)</sup>。塩化物イオンの拡散性状は、空隙構造と電気的作用の両者の影響を受ける一方、酸素拡散性状は、空隙構造の影響のみを受けるため、両者は単純な比例関係ではないものの、相関関係があること<sup>7)</sup>が示されている。セメント系硬化体における酸素の拡散係数は、硬化体の空隙構造と供試体の乾燥条件の影響を受ける。乾燥条件については、菊地らの研究<sup>7)</sup>を参考に、50°C恒量とした。

酸素拡散係数試験は、白川らの方法<sup>8)</sup>を参考に、図-5 に示す試験装置にて行った。供試体は、材齢 28 日の  $30 \times 40 \times 5 \text{mm}$  の薄板モルタル供試体を、温度 50°C で恒量となるまで乾燥させたものを用いた。供試体を貼り付けたゴム板の両側を金属製のセルで挟込み、供試体とセルをボルトで固定した。セルの片側には高純度の酸素ガスを、もう一方に高純度の窒素ガスを共に流量  $130 \text{cm}^3/\text{min}$  で注入し、セメント系硬化体を透過して窒素ガス側に拡散してきた酸素ガスの濃度を、酸素濃度計を用いて測定した。酸素濃度変化が確認されなくなった時点を選定状態とみなして酸素濃度を記録し、白川が提案した式(3)を用いて酸素拡散係数を算出した。境界膜厚さは、窒素側、酸素側ともに、白川らと同じ  $2.1 \text{mm}$  とした。

$$D_{O_2} = \frac{R_N \cdot (C_N - C_b) \cdot (L + \delta_N + \delta_O)}{\left\{ 1 - \frac{R_N}{R_O} \cdot \left( \frac{M_O}{M_N} \right)^{1/2} \cdot (C_N - C_b) - C_N \right\} \cdot A_c} \quad (3)$$

ここに、 $D_{O_2}$ : 酸素拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )、 $C_N$ : 窒素ガス中の酸素濃度 (%),  $C_b$ : 窒素ガスボンベ中の酸素濃度 (%),  $R_N$ ,  $R_O$ : 窒素および酸素のガス流量 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )、 $M_N$ ,  $M_O$ : 窒素および酸素分子量 ( $\text{g/mol}$ )、 $L$ : 供試体の厚さ (cm)、 $A_c$ : 供試体の断面積 ( $\text{cm}^2$ )、 $\delta_N$ ,  $\delta_O$ : 窒素ガス側および酸素ガス側の境界膜の厚さ (mm)、である。

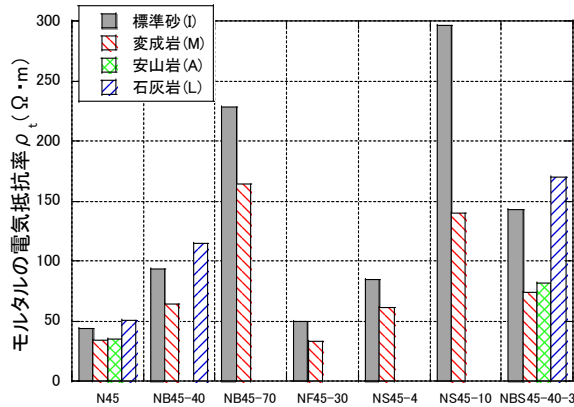


図-6 モルタルの電気抵抗率

### (3) 空隙率および細孔径分布

空隙構造把握のため、アルキメデス法による空隙率および水銀圧入法による空隙径分布の測定を行った。

空隙率の測定は、養生終了後の供試体を粒径 10mm 程度に粗砕し、試料約 3g についてイオン交換水で真空飽和処理を行った後、表面乾燥飽水重量および水中重量の測定を行った。その後、酸素拡散試験供試体と同様に、50°C電気炉にて恒量となるまで乾燥し、乾燥前後の質量差を用い、アルキメデスの原理に基づき、式(4)により空隙率の算出を行った。

$$\varepsilon_{\text{cap}} = \frac{m_s - m_{50C}}{m_s - m_w} \times 100 \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon_{\text{cap}}$ ：毛細管空隙率(%),  $m_s$ ：表面乾燥飽水重量(g),  $m_{50C}$ ：50°C乾燥重量(g),  $m_w$ ：水中重量(g), である。

細孔径分布の測定は、水銀圧入式ポロシメータを用いた。養生終了後の供試体について、アセトンに2日間浸漬を行い、水和停止処理を行った後、真空デシケータ内でシリカゲルを用いて恒量となるまで乾燥させた。乾燥試料を直径 5mm 程度に粗砕し、3g 程度の試料にて測定を行った。細孔径の測定範囲は、直径 5 nm~2 $\mu$ m (最大圧力 300MPa) である。

なお、空隙率および細孔径分布の測定は、NB45-70、NF45-30 および NS45-10 を除く 13 水準を対象とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 モルタルの電気抵抗率

図-6 に配合・骨材毎のモルタルの電気抵抗率を示す。図より、配合・骨材毎に電気抵抗率が異なっていることがわかる。しかし、この値は、配合・骨材の両方の影響を含んでいる。そこで、混和材・骨材のそれぞれの影響について検討を行った。

#### (1) 混和材の影響

混和材置換による影響を評価するため、各骨材の N45

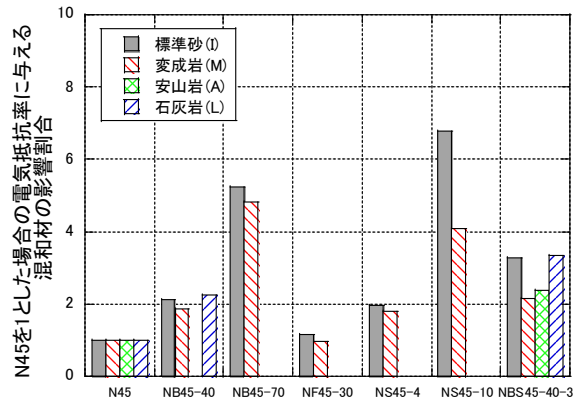


図-7 N45 を 1 とした場合の電気抵抗率に与える混和材の影響割合  $\rho_B$

表-5 重回帰分析結果

説明変数	係数	標準誤差	t 値	P 値
切片	0.656	0.422	1.555	1.41.E-01
BFS 置換率	4.418	0.987	4.476	4.44.E-04
FA 置換率	1.333	2.631	0.507	6.20.E-01
SF 置換率	41.047	7.716	5.320	8.57.E-05

配合を 1 とした場合の電気抵抗率に与える混和材の影響割合  $\rho_B$  を図-7 に示す。図より、骨材種類により多少ばらつきは見られるものの、混和材を置換することで電気抵抗率が上昇していることが確認できた。2 成分混合では、高炉スラグ微粉末およびシリカフェームを置換した配合では、置換割合が増加することで、電気抵抗率が増加していることがわかった。フライアッシュを置換した配合では、N45 と同程度であった。皆川ら<sup>3)</sup>によると、フライアッシュを置換した配合においても電気抵抗率の増加が報告されている。本実験では、材齢 28 日において試験を実施しており、フライアッシュのポズラン反応が十分に進展していないことが要因と考えられる。3 成分混合 (NBS45-40-3) では、高炉スラグ微粉末とシリカフェーム両方の影響を受け、2 成分混合 (NB45-40, NS45-4) と比較し電気抵抗率が増加していることが確認できた。

そこで、各混和材の影響割合を評価するため、図-7 の結果を用いて、各混和材の置換率を説明変数とし、N45 を 1 とした場合の電気抵抗率に与える混和材の影響割合  $\rho_B$  を目的変数とした重回帰分析を試みた。重回帰分析結果を式(5)および表-5 に示す。

$$\rho_B = -0.656 + 4.418 \cdot BFS + 1.333 \cdot FA + 41.047 \cdot SF \quad (5)$$

ここに、 $\rho_B$ ：N45 を 1 とした場合の電気抵抗率に与える混和材の影響割合,  $BFS$ ：高炉スラグ微粉末置換率(%),  $FA$ ：フライアッシュ置換率(%),  $SF$ ：シリカフェーム置換率(%), である。

重回帰分析より、FA 置換率の t 値は 0.507 と低く、ま

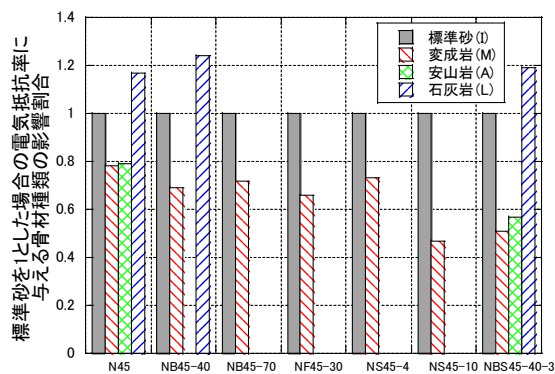


図-8 標準砂を1とした場合の電気抵抗率に与える骨材種類の影響割合  $\rho_s$

た P 値も 0.620 と高いため、説明変数として影響が小さいと考えられる。この要因として、FA 置換率の試料数が少ないことが考えられる。その他の説明変数においては、t 値の絶対値が 2 以上であり、かつ P 値が 0.05 以下であることから、目的変数を説明する変数として意味があると判断できる。また、重決定係数  $R^2=0.732$  と高い相関関係があることが分かった。

回帰分析の結果より、シリカフェーム置換率に起因する係数が、他の係数と比較して高く、本研究の範囲ではシリカフェーム置換率が電気抵抗率に与える影響が大きいことが示唆された。

## (2) 骨材の影響

骨材種類の影響を評価するため、標準砂の配合を 1 とした場合の電気抵抗率に与える骨材種類の影響割合  $\rho_s$  を図-8 に示す。図より、配合により多少のばらつきは見られるものの、石灰岩を用いた配合では、標準砂と比較し、電気抵抗率が 1.2 倍程度高い傾向が見られた。この傾向は小田部らの報告<sup>9)</sup>と同様であり、石灰岩に起因するものと考えられる。一方、変成岩および安山岩を用いた配合では、標準砂と比較し、骨材種類の影響割合  $\rho_s$  が 0.5~0.8 程度と低くなる傾向が見られ、骨材種類により電気抵抗率が異なることが確認できた。

一般的にトンネルの調査等に利用される電気探査法で分類される岩石の電気抵抗率は、標準砂と同様に石英の含有量の多い花崗岩や変成岩、安山岩および石灰岩で概ね  $10^3 \sim 10^5 (\Omega \cdot m)$  程度<sup>10)</sup>と言われている。岩石の電気抵抗率は、風化や亀裂、間隙率など多くの影響を受けるが、本実験に用いた骨材自体の電気抵抗率は概ね同程度であったと考えられる。

宇内ら<sup>11)</sup>によると、セメントペースト供試体の細孔溶液の電気抵抗率は  $10^{-2} \sim 10^{-3} (\Omega \cdot m)$  程度であり、岩石の電気抵抗率と比較し、非常に小さい。そのため、モルタル供試体中の電子の移動経路は、主に空隙中の細孔溶液と考えられる。また、骨材とセメントペーストとの境界

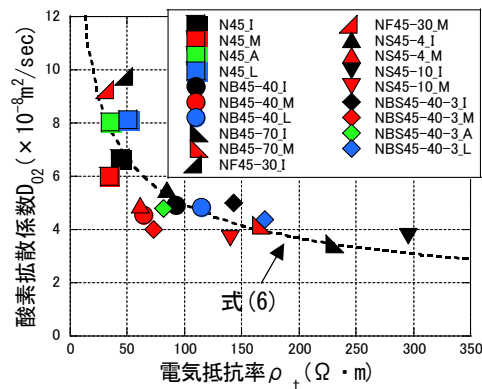


図-9 酸素拡散係数と電気抵抗率の関係

領域は、遷移帯と呼ばれ、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  に富み他のバルク部分と不連続で、空隙量が多い部分<sup>4)</sup>である。骨材の岩種により析出する  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の大きさや形状に差異があることが報告<sup>12)</sup>されており、骨材種類の違いにより遷移帯性状が異なることが電気抵抗率に影響を与えている可能性が示唆された。

## 3.2 酸素拡散性状と電気抵抗率の関係

図-9 にモルタルの酸素拡散係数と電気抵抗率の関係を示す。図より、両者には反比例の関係があることがわかる。この関係は、塩化物イオン拡散係数と電気抵抗率の関係と同様<sup>3)</sup>である。また、図中に式(6)の近似式を併せて示す。

$$D_{O_2} = 3.62 \times 10^{-7} \frac{1}{\rho_t^{0.431}} \quad (6)$$

ここに、 $D_{O_2}$ : 酸素拡散係数( $\text{cm}^2/\text{s}$ )、 $\rho_t$ : 電気抵抗率( $\Omega \cdot \text{m}$ )、である。

近似式の決定係数は、 $R^2=0.614$  と一定の相関関係があることが確認できた。

空隙構造を表すパラメータとして、酸素拡散における屈曲度  $\tau_{O_2}$  を算出し、各種検討を行った。屈曲度  $\tau_{O_2}$  は、式(7)によって求めた<sup>13)</sup>。式中の孔内有孔拡散係数は、細孔径分布および開放空隙量により、別途算出した<sup>7)</sup>。

$$D_{O_2} = \frac{1}{\tau_{O_2}^2} D \quad (7)$$

ここに、 $D_{O_2}$ : 酸素拡散係数( $\text{cm}^2/\text{s}$ )、 $\tau_{O_2}$ : 酸素拡散における屈曲度、 $D$ : 孔内有効拡散係数( $\text{cm}^2/\text{s}$ )、である。

遷移帯は、直径 50 nm 以上の空隙を多く有しており、コンクリートおよびモルタルの弱点箇所と考えられている<sup>14)</sup>。加えて、遷移帯は連結性が高いため、連結箇所ではさらに空隙が多く脆弱な上に、物質移動抵抗性が低くなると言われている<sup>15)</sup>。この特徴に着目し、毛細管空隙率  $\varepsilon_{\text{cap}}$  あたりの酸素拡散における屈曲度  $\tau_{O_2}$  が、間接的に遷移帯の影響を示すと考え評価を行った。毛細管空隙率あたりの屈曲度  $\tau_{O_2}/\varepsilon_{\text{cap}}$  が小さいほど遷移帯の影響が大きいと考えられる。

図-10 に毛細管空隙率あたりの酸素拡散における屈曲度  $\tau_{O_2}/\epsilon_{cap}$  と電気抵抗率  $\rho_t$  の関係を示す。なお、 $\tau_{O_2}/\epsilon_{cap}$  の算出は、空隙率および細孔径分布の測定を行った 13 水準を対象とした。図より骨材ごとに一定の相関関係（決定係数  $R^2=0.832\sim 1.000$ ）が見られた。骨材種類によってその傾きが異なっており、骨材種類の違いにより混和材が電気抵抗率に与える影響度合いと遷移帯性状に与える影響度合いが異なることから、骨材種類の影響は遷移帯性状のみではなく、骨材そのものの電気抵抗率など他の影響が含まれる可能性が示唆された。

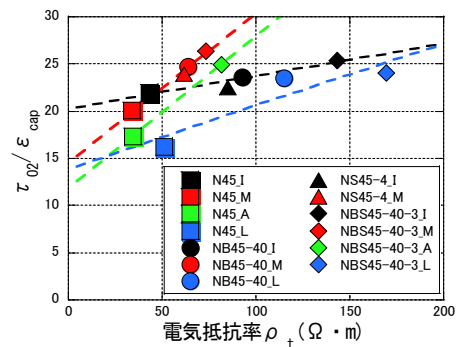


図-10 電気抵抗率と毛細管空隙率あたりの酸素拡散における屈曲度の関係

#### 4. まとめ

本研究では、鉱物組成の異なる数種の骨材を用いて、骨材種類および混和材がモルタルの電気抵抗率に与える影響の評価を試みた。本研究の範囲で得られた結果を以下に示す。

- 1) 混和材置換率および細骨材種類の違いによりモルタルの電気抵抗率が異なることが明らかとなった。
- 2) 混和材の影響は、高炉スラグ微粉末と比較し、シリカフェームの置換率の影響が大きい。
- 3) 骨材種類の影響は、骨材界面（遷移帯）性状の影響のみではなく、骨材そのものの電気抵抗率など他の影響が含まれる可能性が示唆された。

**謝辞：**本研究の実施にあたっては、研究当時新潟大学工学部 4 年であった 佐藤悠介 氏、石山彩加 氏のご助力を頂きました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 関博，宮田克二，北峯博司，金子雄一：比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験的考察，土木学会論文集，V-17，No. 451，pp. 49-57，1992.8
- 2) 建設省土木研究所：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，2000.3
- 3) 皆川浩，久田真，榎原彩野，斎藤佑貴，市川聖芳，井上浩男：コンクリートの電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係に関する基礎的研究，土木学会論文集 E，Vol. 66，No. 1，pp. 119-131，2010.3
- 4) 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性，わかりやすいセメント科学，社団法人セメント協会，pp. 78-104，1993.
- 5) 福山智子，野口貴文：交流インピーダンス法を用いた鉄筋腐食の非破壊検査に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，材料施工，pp.

185-186，2006.

- 6) 胡桃澤清文，名和豊春：いくつかの手法による硬化セメントペーストの空隙構造の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No. 1，pp. 532-535，2012.
- 7) 菊地道生，須田裕哉，佐伯竜彦：酸素および塩化物イオンの実効拡散係数によるセメント系硬化体におけるイオン移動性状の評価，セメント・コンクリート論文集，No. 64，pp. 346-353，2010.
- 8) 白川敏夫，島添洋治，麻生實，永松静也，佐藤嘉昭：セメント硬化体中への気体の拡散係数測定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 515 号，pp. 15-21，1999.
- 9) 小田部貴憲，櫻庭浩樹，俵道和，古賀裕久：種々の使用材料や配合が異なるコンクリートを用いた電気抵抗率試験の適用性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 42，No. 1，pp. 65-70，2020.
- 10) 池田和彦，大島洋志：わかりやすい土木地質学入門（第 4 版），土木工学社，p. 224，1979.5
- 11) 宇内大樹，佐伯竜彦，斎藤豪：セメント系硬化体の等価回路モデルに及ぼす空隙構造および細孔溶液組成の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol. 70，pp. 185-192，2016.
- 12) 内川浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学，Vol. 33，No. 9，pp. 5-17，1995.
- 13) 近藤精一，石川辰雄，阿部郁夫：吸着の化学 第 2 版，丸善，pp. 87-91，2001.
- 14) 加藤佳孝，魚沼健人：配合条件が遷移帯細孔構造に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21，No. 2，pp. 811-816，1999.
- 15) 出口知史，館石和雄，魚本健人：骨材界面組織が物質拡散に与える影響についての解析的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20，No. 2，pp. 763-768，1998.