

# 報告 高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの電気抵抗率の温度依存性

中村 英佑\*1・水戸 健介\*2・鈴木 雅博\*3・古賀 裕久\*4

**要旨：**電気抵抗率試験を活用したコンクリートの遮塩性能の迅速評価手法の確立に向けて、高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの電気抵抗率の温度依存性について検討した。電気抵抗率は、試験時の供試体の温度の影響を受け、温度が高いほど小さくなった。この温度変化に伴う電気抵抗率の変動の程度は高炉スラグやフライアッシュの使用有無によって異なったが、アレニウス則と同様の形状の式によって配合ごとに補正できることを示した。電気抵抗率を指標として遮塩性能を評価するためには、試験時の供試体の温度を約 20℃に調温すること、これが困難な場合には測定値を補正することが必要であることを示した。

**キーワード：**電気抵抗率、遮塩性能、高炉スラグ、フライアッシュ、アレニウス則

## 1. はじめに

電気抵抗率試験はコンクリートの遮塩性能の迅速評価手法として国内外で注目されており<sup>1)</sup>、測定方法が規準化され<sup>2) 3)</sup>、高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの品質管理での実用化が進められている<sup>4) 5) 6)</sup>。新設コンクリート構造物における品質管理で電気抵抗率試験を採用する場合、試験結果に影響を与え得る主な要因として、供試体の含水状態、形状・寸法、温度など<sup>7)</sup>が挙げられる。含水状態については、養生直後の含水状態が飽和とみなせる供試体を測定対象とすることで乾燥による電気抵抗率の変動を避けることが可能である。形状・寸法については、既存の試験規準<sup>2) 3)</sup>では供試体の形状・寸法ごとに遮塩性能の評価に用いる電気抵抗率の閾値や測定値の換算に用いるセル定数を例示しており、一般的な形状・寸法の供試体を測定対象とすることで遮塩性能の評価や測定値の換算が可能である。一方、温度については、打込み後のコンクリートは様々な温度条件下に置かれる場合が多く、試験時の供試体の温度変化によって電気抵抗率の変動することが知られているが<sup>8) 9) 10) 11)</sup>、その変動の程度や補正方法、遮塩性能の評価結果との関係は十分には明確にされていない。

そこで、本稿では、高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートを対象とし、試験時の供試体の温度変化による電気抵抗率の変動とその補正方法、遮塩性能の評価結果に与える影響について検討した結果を報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 コンクリート配合と基礎物性

コンクリート配合と基礎物性を表-1 に示す。コンク

リート配合は、8種類である。プレストレストコンクリートへの適用を想定して、早強ポルトランドセメントと天然砂を用いたものを基準配合(STD)とし、結合材の一部に高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた配合(SG430, SG650, FA20)、細骨材の一部あるいは全部に高炉スラグ細骨材を用いた配合(BFS30, BFS50, BFS70, BFS100)とした。結合材と細骨材の構成の違いがコンクリートの電気抵抗率の温度依存性に与える影響を検討するために、全ての配合で、水結合材比を 36%、単位水量を 165 kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量を 968 kg/m<sup>3</sup>とした。

### 2.2 供試体

供試体は、前報<sup>12)</sup>で遮塩性能の迅速評価手法の検討に用いた供試体と同時に製作した円柱(φ100×200 mm)である。コンクリート打込み翌日に脱型し、材齢 2 年まで 20℃の養生槽で水中養生を行った後、実験に用いた。

### 2.3 電気抵抗率試験の方法

電気抵抗率の温度依存性を検討するために、供試体の温度を変化させて電気抵抗率を測定した。水道水で満たしたプラスチック製容器に供試体を入れて恒温恒湿槽に静置し、槽内の温度を変化させて供試体の調温を行った。具体的には、槽内を所定の温度として 24 時間以上経過した後、1)容器内の水の温度、2)容器内に設置した温度測定用の円柱の中心温度(円柱内部に埋設した熱電対で測定)、3)電気抵抗率の測定直前における供試体表面の温度(赤外線式の非接触型放射温度計で測定)を測定し、目標温度の±1.5℃以内であることを確認した。本稿では、3)を試験時の供試体の温度とした。目標温度については、国内の一般的な標準養生の設定温度である 20℃を基準として、20℃から 5℃まで 5℃ずつ低下させ、その後、5℃

\*1 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 主任研究員 (正会員)

\*2 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 交流研究員 (正会員)

\*3 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会 (正会員)

\*4 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 上席研究員 (正会員)

表-1 コンクリート配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				
		W	B = HPC + SG4 + SG6 + FA				S			BFS	G	材齢 3日	材齢 28日	材齢 91日
			HPC	SG4	SG6	FA								
STD	36	165	458	—	—	—	721	—	968	12.0	5.3	49.3	65.3	74.0
SG430			321	138 (30%)	—	—	712	—		10.0	5.9	33.5	60.5	71.1
SG650			229	—	229 (50%)	—	707	—		12.0	5.0	35.6	69.4	80.5
FA20			367	—	—	92 (20%)	696	—		8.0	4.8	40.4	60.6	65.7
BFS30			458	—	—	—	505	227 (30%)		9.0	5.4	51.1	67.8	73.6
BFS50				—	—	—	361	379 (50%)		11.5	5.2	51.1	67.9	75.6
BFS70				—	—	—	216	531 (70%)		13.0	5.0	54.1	68.7	73.4
BFS100				—	—	—	—	758 (100%)		13.0	5.3	52.7	68.7	80.1

※W: 上水道水(茨城県つくば市), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度 3.14 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 4480 cm<sup>2</sup>/g), SG4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度 2.89 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 4350 cm<sup>2</sup>/g, せつこう添加(SO<sub>3</sub>換算 2%)), SG6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度 2.91 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 6210 cm<sup>2</sup>/g, せつこう添加(SO<sub>3</sub>換算 3%)), FA: フライアッシュ II 種(密度 2.35 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 4330 cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度 2.56 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.23%), BFS: 5 mm 高炉スラグ細骨材(密度 2.69 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.68%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6号(密度 2.67 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.43%, 硬質砂岩)と同 5号(密度 2.67 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.46%, 硬質砂岩)を均等に混合)

※単位量の百分率は、高炉スラグ微粉末とフライアッシュが結合材に占める質量%, 高炉スラグ細骨材が細骨材に占める容積%を表示

※化学混和剤: 高性能減水剤と空気連行剤を使用

※養生方法: コンクリート打込み翌日に脱型して試験時まで 20℃で水中養生

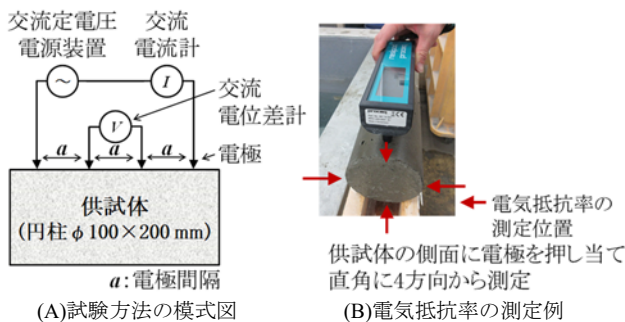


図-1 電気抵抗率試験の概略

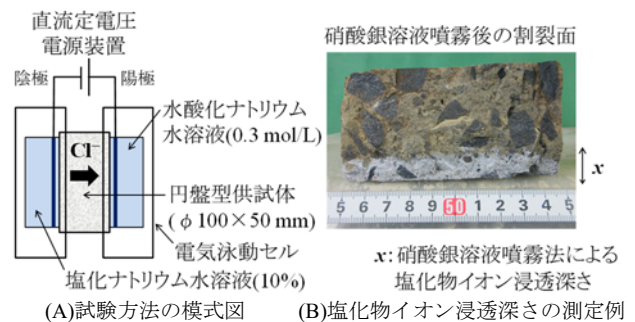


図-2 非定常・電気泳動試験の概略

から 40℃まで 5℃ずつ上昇させ、再び 40℃から 20℃まで 5℃ずつ低下させた。電気抵抗率の測定については、各目標温度で 1 回ずつ行った。

各配合 2 体ずつの供試体を対象として、電気抵抗率を測定した。既存の試験規準<sup>2)</sup> 3)に準拠した 4 プローブ法の測定装置(電極間隔 50 mm, 周波数 40 Hz, 測定範囲 10 ~ 10 000 Ωm)を用い、4 個の棒状の電極を供試体側面に押し当て、互いに直角をなす 4 方向から測定を行った(図-1)。4 プローブ法では、供試体に交流電流を印加し、その際に測定された電流と電位差から電気抵抗率を求めるため、電気抵抗率の測定値は供試体の形状・寸法や電極の配置間隔の影響を受ける<sup>13)</sup>。このため、本稿では、JSCE-G 581<sup>3)</sup>に例示されているセル定数を用いて測定値を換算し、換算後の値の算術平均を求めた。

#### 2.4 非定常・電気泳動試験の方法

温度変化による電気抵抗率の変動が遮塩性能の評価結果に与える影響を検討するために、電気抵抗率の測定後、非定常・電気泳動試験を行って塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  を求めた。各配合 1 体の供試体の中央から厚さ 50 mm の円盤型供試体を 2 個ずつ切断し、JSCE-G 571<sup>14)</sup>と同様の方法で真空飽和処理を行った。電気泳動セルに供試体を設置し、通電を行って供試体内部に塩化物イオンを電気泳動させた(図-2(A), 印加電圧 30V, 通電時間 6, 24 時間)。その後、供試体の割裂面に 0.1 mol/L 硝酸銀溶

液を噴霧して塩化物イオン浸透深さを測定し(図-2(B)), 塩化物イオン浸透速度係数  $K$  を求め、式(1)を用いて塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  を算出した<sup>15)</sup>。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} K \quad (1)$$

ここに、 $D_{nssm}$ : 塩化物イオン拡散係数(m<sup>2</sup>/s),  $R$ : 気体定数(= 8.31 J/(K·mol)),  $T$ : 通電時の陽極側と陰極側の溶液温度の平均値(K),  $z$ : 塩化物イオンの電荷(= 1),  $F$ : ファラデー定数(= 9.65 × 10<sup>4</sup> J/(V·mol)),  $E$ : 電位勾配(試験の開始時と終了時での両溶液間の電圧の平均値を供試体厚さ(= 0.05 m)で除した値, V/m),  $K$ : 塩化物イオン浸透速度係数(m/s)である。

#### 2.5 細孔径分布の測定方法

電気抵抗率の測定後、基準配合の STD, 混和材を用いた SG430, SG650, FA20, 高炉スラグ細骨材の混合率を 100%とした BFS100 の 5 種類の供試体を対象として、水銀圧入法によって細孔径分布を測定した。測定には、各配合 1 体の供試体の中心のモルタル部を約 5mm 角となるように湿式カッターで切断し、付着水をアセトンで除去した後に凍結乾燥機で 1 週間乾燥させた試料を用いた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 温度変化による電気抵抗率の変動

電気抵抗率の測定結果を図-3, 図-4 に示す。図-

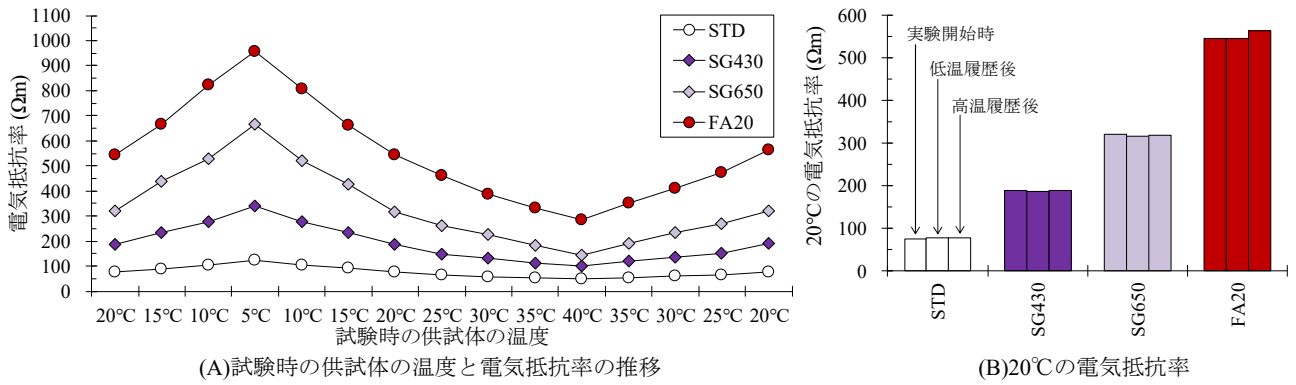


図-3 混和材を用いた供試体の電気抵抗率の測定結果

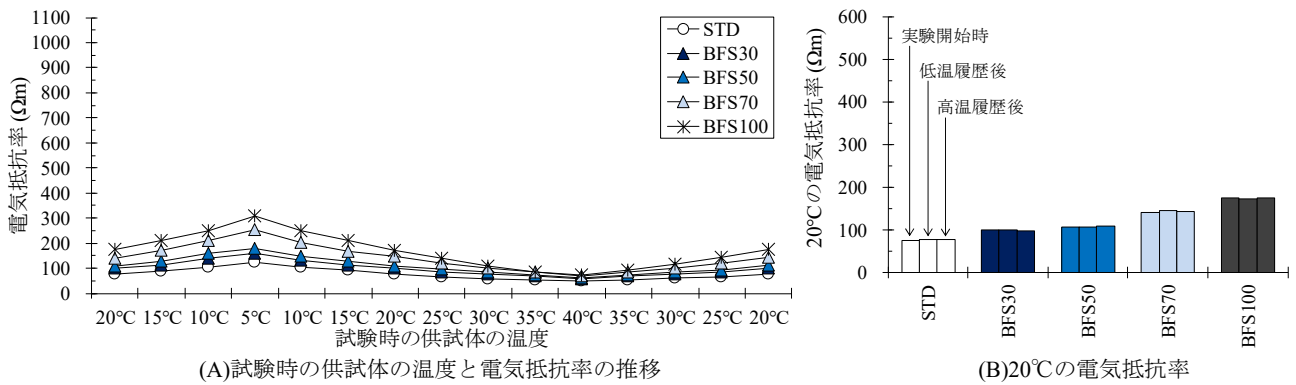


図-4 高炉スラグ細骨材を用いた供試体の電気抵抗率の測定結果

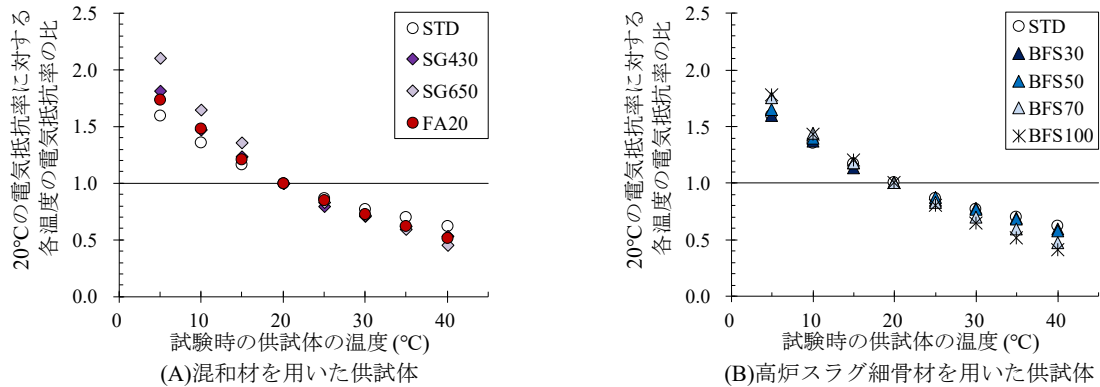


図-5 20°Cの電気抵抗率に対する各温度の電気抵抗率の比

3(A)と図-4(A)には、試験時の供試体の温度と電気抵抗率の推移を示した。この結果によると、高炉スラグやフライアッシュの使用有無にかかわらず、全ての供試体において、電気抵抗率は、温度が高いほど小さく、温度が低いほど大きくなった。一般に、温度が高いほどコンクリート内部の空隙中の電荷の主な担い手であるイオンの移動度が大きくなり、電気抵抗率が小さくなることが知られている<sup>7)</sup>。本稿の実験結果では、高炉スラグやフライアッシュの使用有無の違いにかかわらず、一般的なコンクリートの温度変化と電気抵抗率の変動の関係が再現されたことを確認できる。

図-3(B)と図-4(B)には、温度を20°Cとした3回(実験開始時、低温履歴後、高温履歴後)の測定で得られた電気抵抗率を示した。高炉スラグやフライアッシュを用いた供試体の電気抵抗率は、基準配合のSTDよりも大きくな

った。この傾向は、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを用いた供試体で特に明確に現れており、フライアッシュを用いたFA20の電気抵抗率が最も大きく、次に高炉スラグ微粉末6000を用いたSG650の電気抵抗率が大きくなった。また、高炉スラグ細骨材を用いた供試体では、混合率が高いほど電気抵抗率が大きくなった。

なお、同一配合の供試体では、温度を20°Cとした3回の測定で得られた電気抵抗率は、温度履歴を与えた前後で同程度であった。本稿の実験では材齢2年まで水中養生を行った供試体を用いたため、温度履歴による供試体自体の変質が抑制されて、主に供試体の温度変化に起因する電気抵抗率の変動を把握できたと考えられる。

### 3.2 使用材料の違いが電気抵抗率の変動に与える影響

温度変化による電気抵抗率の変動の程度を配合間で比較するために、各温度の電気抵抗率を20°Cの電気抵抗率

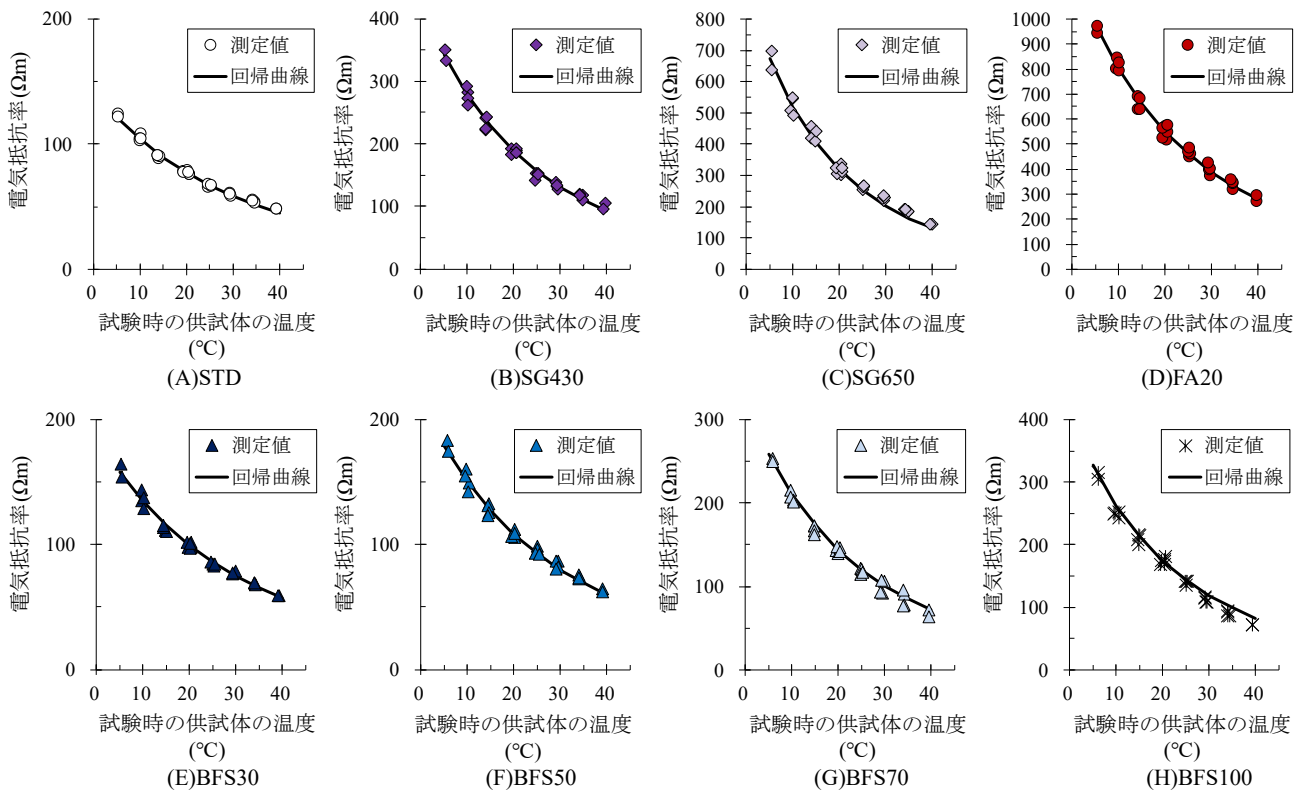


図-6 電気抵抗率の測定値とアレニウス則にもとづく補正式の回帰曲線

に対する比に換算した結果を図-5に示す。電気抵抗率は、20℃の場合と比較して、40℃の場合に約0.4~0.6倍に小さくなり、5℃の場合に約1.6~2.1倍に大きくなった。配合間の差を詳細に比較すると、高炉スラグやフライアッシュを用いた供試体の電気抵抗率の変動の程度は基準配合のSTDよりも大きく、特に高炉スラグ微粉末6000を用いたSG650で大きくなったことがわかる。また、高炉スラグ細骨材を用いた供試体では、混合率が高いほど変動の程度が大きくなった。結合材や細骨材の構成の違いによって、コンクリートの温度変化による電気抵抗率の変動の程度が異なると考えられる。

### 3.3 アレニウス則にもとづく電気抵抗率の補正

3.2で述べたように、結合材や細骨材の構成の違いによって温度変化による電気抵抗率の変動の程度が異なったため、その補正方法を検討する。既往研究<sup>8),9),11)</sup>では、コンクリートの温度変化による電気抵抗率の変動はアレニウス則と同様の形状の式によって補正できることが報告されている。そこで、試験時の供試体の温度と電気抵抗率の測定値を最小二乗法によって式(2)にフィッティングし、補正式を求めた。

$$\rho_T = \rho_0 \cdot \exp \left[ \frac{E_p}{R} \left( \frac{1}{T+273.15} - \frac{1}{T_0+273.15} \right) \right] \quad (2)$$

ここに、 $\rho_T$ : 測定時の温度  $T$  における電気抵抗率( $\Omega\text{m}$ )、 $\rho_0$ : 標準温度  $T_0$  における電気抵抗率( $\Omega\text{m}$ )、 $E_p$ : 電気抵抗率の温度依存性を示す係数(J/mol)、 $R$ : 気体定数(= 8.31 J/(K·mol))、 $T$ : 測定時の温度(°C)、 $T_0$ : 標準温度(=20°C)で

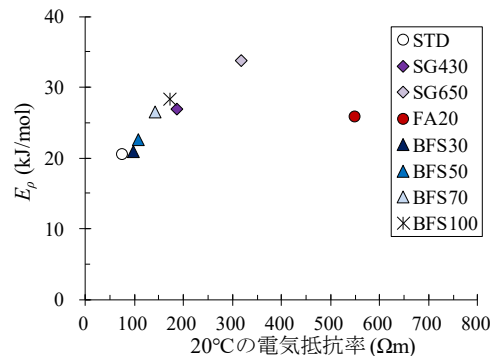


図-7  $E_p$  と 20℃の電気抵抗率

ある。

電気抵抗率の測定値と式(2)の回帰曲線を配合ごとくに図-6に示す。高炉スラグやフライアッシュの使用有無にかかわらず、電気抵抗率の測定値と式(2)の回帰曲線は概ね一致した。高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートでも、本稿の実験で対象とした5℃から40℃の範囲内では、温度変化による電気抵抗率の変動をアレニウス則と同様の形状の式で補正できると考えられる。

次に、式(2)の  $E_p$  の計算値と20℃の電気抵抗率の測定値を図-7に示す。 $E_p$  の大きさを比較すると、高炉スラグ細骨材の混合率を30%、50%としたBFS30、BFS50の  $E_p$  は基準配合のSTDと同程度となったが、他の供試体の  $E_p$  はSTDよりも大きくなったことがわかる。高炉スラグ細骨材を用いた供試体では、混合率が高いほど  $E_p$  が大きくなった。高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの温度変化による電気抵抗率の変動はアレニウス則



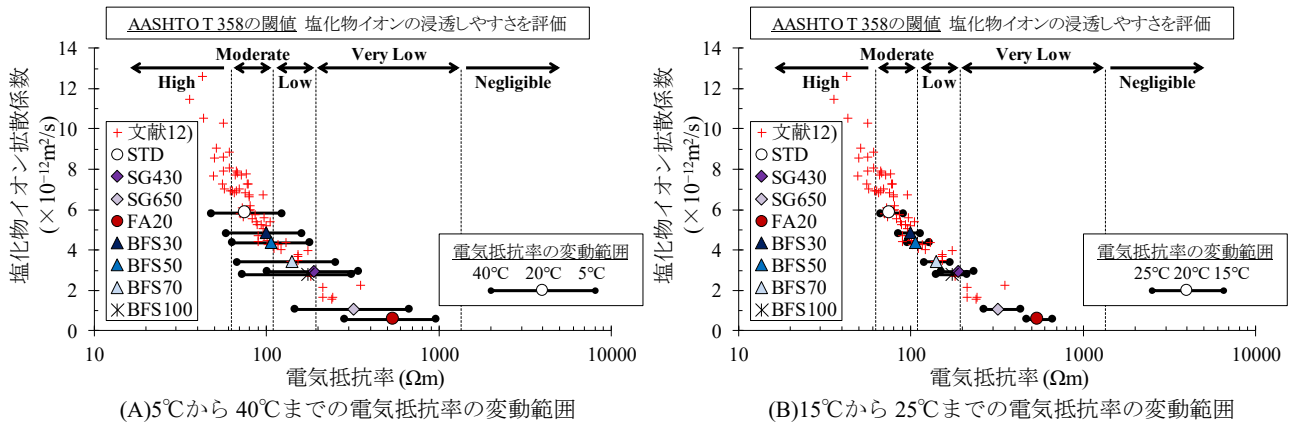


図-8 電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数

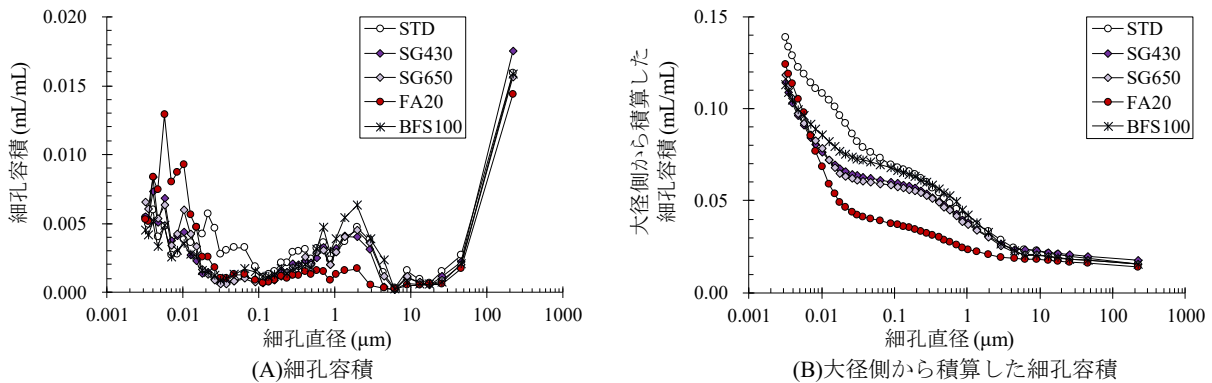


図-9 細孔径分布の測定結果

と同様の形状の式で補正できるが、補正式に含まれる  $E_p$  は結合材や細骨材の構成によって異なると考えられる。

また、 $E_p$  の計算値と 20°C の電気抵抗率の測定値の関係に着目すると、基準配合の STD と高炉スラグ微粉末を用いた SG430, SG650, 高炉スラグ細骨材を用いた BFS30, BFS50, BFS70, BFS100 では、電気抵抗率が大きいほど  $E_p$  が大きくなる傾向にあり、相関性が認められた。一方、フライアッシュを用いた FA20 では、他の 7 種類の供試体とは傾向が異なり、電気抵抗率が最も大きくなったが、 $E_p$  は SG430, BFS70, BFS100 と同程度であった。コンクリートの電気抵抗率の温度依存性の程度は、電気抵抗率自体の大小だけでなく、結合材や細骨材として用いる材料の種類とその構成によって異なり、特にフライアッシュを用いた場合に傾向が大幅に異なると考えられる。

### 3.4 電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係

電気抵抗率と非定常・電気泳動試験から求めた塩化物イオン拡散係数を図-8 に示す。同図では、前報<sup>12)</sup>の材齢 1 年までの結果に、本稿の実験で得た材齢 2 年の電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数を併記した。材齢 1 年までの電気抵抗率については 20°C の測定値、材齢 2 年の電気抵抗率については約 5°C から約 40°C の電気抵抗率の変動範囲(図-8(A))と約 15°C から約 25°C の電気抵抗率の変動範囲(図-8(B))を示した。また、電気抵抗率を指標とした遮塩性能の評価方法の一例として、AASHTO T 358<sup>2)</sup>の

遮塩性能を評価するための電気抵抗率の閾値を円柱(φ 100×200 mm)に換算した値<sup>1)</sup>を示した。

本稿の実験で得た材齢 2 年の電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係は材齢 1 年までの結果の傾向と概ね一致し、電気抵抗率が大きいほど塩化物イオン拡散係数が小さくなる傾向にあった。しかし、図-8(A)から、約 5°C から約 40°C まで温度が変化すると、電気抵抗率が変動し、電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係が 20°C の実験結果から大幅に乖離する可能性があること、AASHTO T 358 の閾値による遮塩性能の評価結果が 20°C の実験結果に対する評価結果と異なる場合があることがわかる。一方、図-8(B)から、約 15°C から約 25°C まで温度が変化すると、依然として電気抵抗率の変動は生じるものの、その変動範囲が小さくなること、電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係の 20°C の実験結果からの乖離が小さくなることがわかる。電気抵抗率を指標として遮塩性能を評価する際には、試験時の供試体の温度を約 20°C に調温することが望ましく、温度が 20°C から 5°C 以上異なる場合にはアレニウス則と同様の形状の式を用いて電気抵抗率を 20°C の値に補正する必要があると考えられる。

### 3.5 電気抵抗率と細孔構造の関係

細孔径分布の測定結果を図-9 に示す。同図では、硬化体の細孔径分布を単位体積あたりの細孔容積に換算して示した。高炉スラグやフライアッシュを用いた供試体

では、基準配合の STD と比較して、細孔直径約 0.003～0.02 μm の範囲の細孔容積が多く、細孔直径約 0.02 μm～0.5 μm の範囲の細孔容積が少なくなった。高炉スラグやフライアッシュの使用は大径の細孔容積の減少と小径の細孔容積の増加、すなわち、細孔構造の緻密化に寄与し、結果として、3.1 で述べたように、高炉スラグやフライアッシュを用いた供試体の電気抵抗率が STD よりも大きくなったと考えられる。また、フライアッシュを用いた FA20 では、他の供試体と比較して細孔直径約 0.5～4 μm の範囲の細孔容積が少なく、硬化体の細孔構造が大幅に緻密化したことがわかる。3.3 で述べたように、フライアッシュを用いた FA20 と他の供試体では電気抵抗率の温度依存性の程度が異なったが、FA20 ではフライアッシュのボゾラン反応が長期的に進行し、細孔構造の緻密化の程度や空隙中のイオン組成が他の供試体と比較して大幅に異なったことが一因ではないかと推察される。

#### 4. まとめ

本稿の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) コンクリートの電気抵抗率は、試験時の温度の影響を受け、温度が高いほど小さく、温度が低いほど大きくなり、この変動の程度が高炉スラグやフライアッシュの使用有無によって異なることを示した。
- (2) 温度変化による電気抵抗率の変動は、高炉スラグやフライアッシュの使用有無の違いにかかわらず、アレニウス則と同様の形状の補正式によって配合ごとに補正できることを示した。
- (3) 電気抵抗率を指標として遮塩性能を適切に評価するためには、試験時の供試体の温度を約 20°C に調温して測定を行うことが望ましいこと、温度が 20°C から 5°C 以上異なる場合には電気抵抗率を 20°C の値に補正する必要があることを示した。

なお、本稿は、国立研究開発法人土木研究所と一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会による共同研究「新設プレストレストコンクリート橋の品質・信頼性向上方法の構築」の検討成果の一部である。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関する研究委員会報告書，pp.3-62，JCI-C96，2018.9
- 2) AASHTO Designation: T 358-17: Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.4
- 3) JSCE-G 581-2018: 四電極法によるコンクリートの電

- 気抵抗率試験方法(案)，2018 年制定コンクリート標準示方書 [規準編]，土木学会，2018.10
- 4) Gjorv, O. E.: Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments, 2nd Edition, CRC Press, pp.187-216, 2014.1
  - 5) Gudimettla, J., and Crawford, G.: Resistivity Tests for Concrete—Recent Field Experience, ACI Materials Journal, V.113, No.4, July-August, pp.505-512, 2016
  - 6) Riding, K. A., Thomas, M. D. A., Hooton, R. D., Obla, K. H., and Weiss, W. J.: Performance-Based Specifications for Concrete Exposed to Chlorides, Concrete International, pp.41-47, Volume 40, No.7, 2018.7
  - 7) 日本コンクリート工学会：物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関する研究委員会報告書，pp.62-75，JCI-C88，2015.9
  - 8) RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion, Test Methods for on Site Measurement of Resistivity of Concrete, Materials and Structures, Vol.33, pp.603-611, 2000.12
  - 9) Liu, Y., and Presuel-Moreno, F. J.: Normalization of Temperature Effect on Concrete Resistivity by Method Using Arrhenius Law, ACI Materials Journal, V.111, No.4, July-August, pp.433-442, 2014
  - 10) Sengul, O.: Use of Electrical Resistivity as an Indicator for Durability, Construction and Building Materials, Vol.73, pp.434-441, 2014.10
  - 11) Azarsa, P., and Gupta, R.: Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review, Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2017, 2017
  - 12) 中村英佑，水戸健介，古賀裕久：高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの遮塩性能の迅速評価手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.219-224，2018
  - 13) 皆川浩，駒井道哉，藤田亮，宮本慎太郎，久田真：4 プローブ法をコンクリート供試体に適用した時のセル定数の数値解析による算定とその検証，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.17，pp.447-452，2017.10
  - 14) JSCE-G 571-2013: 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法，2018 年制定コンクリート標準示方書 [規準編]，土木学会，2018.10
  - 15) 中村英佑，皆川浩，宮本慎太郎，久田真，古賀裕久，渡辺博志：通電後の塩化物イオン浸透深さを用いたコンクリートの遮塩性能の評価，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.72，No.3，pp.304-322，2016.9