

# 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遮塩性能の迅速評価手法

中村 英佑\*1・水戸 健介\*2・古賀 裕久\*3

**要旨:** 結合材や細骨材に高炉スラグあるいはフライアッシュを用いたコンクリートを対象として、非定常・電気泳動試験、電気抵抗率試験、浸せき試験を行い、遮塩性能の迅速評価手法を検討した。非定常・電気泳動試験によって、浸せき試験と同様に高炉スラグやフライアッシュの使用による遮塩性能の向上効果を評価できることに加え、材齢の経過に伴う遮塩性能の変化を把握できることがわかった。また、電気抵抗率は、使用材料や試験材齢、養生方法の違いにかかわらず、非定常・電気泳動試験から得られる塩化物イオン拡散係数と概ね反比例の関係となり、遮塩性能の評価指標として活用できる可能性があることがわかった。

**キーワード:** 遮塩性能, 高炉スラグ, フライアッシュ, 非定常・電気泳動試験, 電気抵抗率試験

## 1. はじめに

過酷な塩害環境で優れた遮塩性能を有するコンクリート構造物を構築するために高炉スラグやフライアッシュを積極的に用いたコンクリートの適用が注目されており、この普及に向けて遮塩性能を迅速に評価できる試験方法の確立が必要とされている。例えば、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では、塩化物イオン拡散係数の設定方法として、水セメント比と見掛けの拡散係数の関係式、電気泳動法(JSCE-G 571<sup>2)</sup>)や浸せき法(JSCE-G 572<sup>3)</sup>)による室内実験、自然暴露実験、実構造物調査があり、適用実績の少ない種別のコンクリートでは室内実験によって塩化物イオン拡散係数を求めることとなる。しかし、高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートでは電気泳動法や浸せき法の実施に要する試験期間が長期化する場合が多く、非定常・電気泳動試験<sup>4)</sup>や電気抵抗率試験<sup>5)</sup>など電気化学的原理にもとづく新しい迅速評価手法の検討が進められている。国外では、非定常・電気泳動試験はNT BUILD 492<sup>6)</sup>、電気抵抗率試験はAASHTO T 358<sup>7)</sup>として試験方法が標準化されており、NT BUILD 492はfib Model Code 2010<sup>8)</sup>で採用され、AASHTO T 358はコンクリートの遮塩性能の迅速評価手法として既に実用化されつつある<sup>9)</sup>。

このような背景にもとづき、本稿では、結合材や細骨材に高炉スラグあるいはフライアッシュを用いたコンクリートを対象として、非定常・電気泳動試験、電気抵抗率試験、浸せき試験を行い、遮塩性能の迅速評価手法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

コンクリート配合は、シリーズ I(表-1)とシリーズ

II(表-2)の計 14 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、早強ポルトランドセメントと天然砂を用いた配合(STD)を基準として、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。シリーズ I とシリーズ II を区別するために、シリーズ II で配合名称の末尾に「-S」を付記した。

シリーズ I では、コンクリート打込み翌日に脱型し、試験時まで水中養生を行った。シリーズ II では、コンクリート打込み後から蒸気養生を模擬した温度履歴を与えた後に脱型し、その後、試験時まで水中養生を行った。

水結合材比については、シリーズ I では 36%とした。シリーズ II では、初期材齢の圧縮強度を同程度とするために、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-S, SG650-S, FA20-S)で 33%、他の配合で 36%とした。結合材と細骨材の構成がコンクリートの遮塩性能と試験結果に与える影響を検討するために、単位水量を 165 kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量を 968 kg/m<sup>3</sup>に統一した。

シリーズ I では材齢 3, 28, 91 日、シリーズ II では材齢 1(脱型直後)、14, 28 日に、円柱供試体(φ100×200 mm)を用い、JIS A 1108:2006 に準拠して圧縮強度を測定した。

### 2.2 非定常・電気泳動試験の方法

シリーズ I では材齢 14, 28, 56, 91, 182, 365 日、シリーズ II では材齢 1(脱型直後)、14, 28 日の円柱供試体(φ100×200 mm)を対象として、非定常・電気泳動試験を行い、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 と同様の方法で真空飽和処理を行った。ASTM C 1202<sup>10)</sup>に準拠した電気泳

\*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

\*3 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：シリーズI

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

表-2 コンクリート配合と基礎物性：シリーズII

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 1日	材齢 14日	材齢 28日
			HPC	SG4	SG6	FA								
STD-S	36	165	458	—	—	—	721	—	968	12.0	5.3	48.7	60.3	62.6
SG430-S	33		350	150 (30%)	—	—	712	—		12.0	4.8	41.0	59.1	64.7
SG650-S			250	—	250 (50%)	—	707	—		11.5	3.8	55.5	65.0	70.5
FA20-S			400	—	—	100 (20%)	696	—		17.5	5.0	43.4	57.8	62.4
BFS50-S			36	—	—	—	—	361		379 (50%)	11.5	4.7	51.4	61.0
BFS100-S	—			—	—	—	—	758 (100%)		9.5	4.0	52.7	58.7	67.0

※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 4680 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 4530 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 5940 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 2.25 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 4010 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 2.77 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.25%), 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)

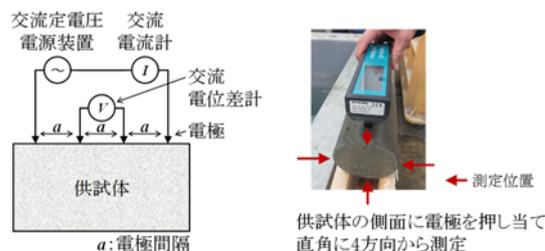
※単位量の百分率は、高炉スラグ微粉末とフライアッシュが結合材に占める質量%, 高炉スラグ細骨材が細骨材に占める容積%を表示

※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後から恒温恒湿槽を用いて蒸気養生を模擬した温度履歴(20℃で3時間の前養生, 50℃まで2時間で昇温度, 50℃を6時間維持, 20℃まで5時間で降温)を与えた後, 脱型して試験時まで 20℃で水中養生



(A)試験方法の模式図 (B)塩化物イオン浸透深さの測定例  
図-1 非常常・電気泳動試験の概略



(A)試験方法の模式図 (B)電気抵抗率の測定例  
図-2 電気抵抗率試験の概略

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-1(A))。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-1(B)), 式(1)<sup>4)</sup>を用いて塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  を算出した。脱型あるいは水中養生から試験を終えるまでの作業時間は約7日間であった。

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

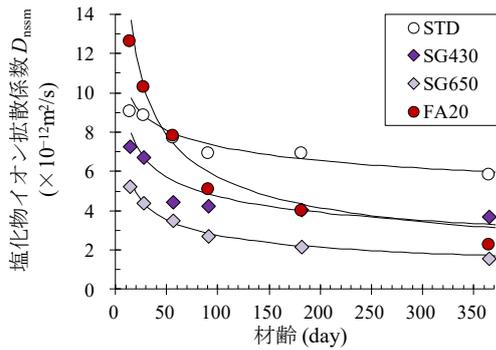
ここに,  $D_{nssm}$ : 塩化物イオン拡散係数(m<sup>2</sup>/s),  $R$ : 気体定数(= 8.31 J/(K·mol)),  $T$ : 通電時の陽極側と陰極側の溶液温度の平均値(K),  $z$ : 塩化物イオンの電荷(= 1),  $F$ : ファラ

デー定数(=  $9.65 \times 10^4$  J/(V·mol)),  $E$ : 電位勾配(試験の開始時と終了時における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。なお, 本稿の実験では, 印加電圧を 30V, 通電時間を 6, 24 時間に設定した。

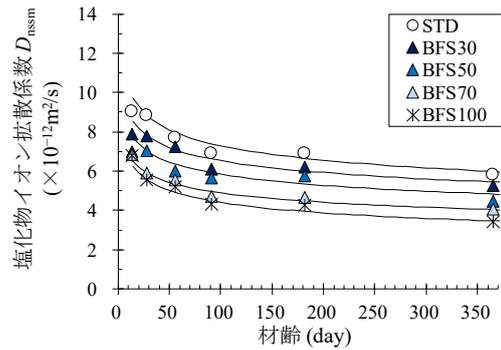
### 2.3 電気抵抗率試験の方法

シリーズIでは材齢 2, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 182, 273, 365 日, シリーズIIでは材齢 1(脱型直後), 2, 3, 7, 14, 21, 28, 42, 56, 70 日の円柱供試体(φ100×200 mm)を対象として, 電気抵抗率を測定した。

シリーズIで各配合 2 体, シリーズIIで各配合 3 体の



(A)混和材を用いた供試体



(B)高炉スラグ細骨材を用いた供試体

図-3 非定常・電気泳動試験の結果：シリーズI

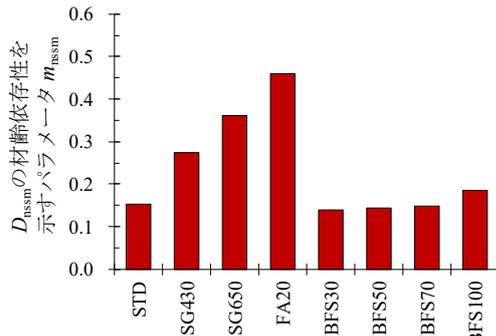


図-4  $D_{nssm}$  の材齢依存性を示すパラメータ  $m_{nssm}$

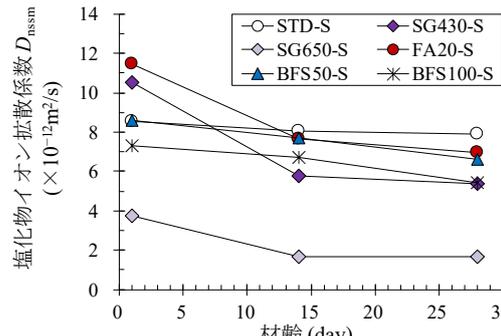


図-5 非定常・電気泳動試験の結果：シリーズII

供試体を用いた。AASHTO T 358 に準拠した 4 プローブ法の装置(電極間隔 50 mm, 周波数 40 Hz, 測定範囲 10 ~ 10 000  $\Omega$ m)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-2)。1 供試体あたりの作業時間は約 5 分間であった。4 プローブ法による電気抵抗率の測定値は供試体の形状や寸法, 電極の配置間隔の影響を受けるため, 本稿では, 既往研究<sup>11)</sup>で提案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電気抵抗率とした。

#### 2.4 浸せき試験の方法

シリーズ I では, 材齢 28 日まで水中養生した円柱供試体( $\phi$  100  $\times$  200 mm)を対象として, 浸せき試験を行い, 塩化物イオンの見掛けの拡散係数  $D_{ap}$  を求めた。

供試体の中央を高さ 150 mm に切断し, コンクリート打込み側の円形面以外をエポキシ樹脂塗料でシールした後, 濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液に 180 日間浸せきした。その後, 表面から厚さ 5 mm ごとに試料を採取して JIS A 1154:2012 の電位差滴定法によって塩化物イオン濃度を測定し, 濃度分布を最小二乗法によって式(2)にフィッティングして見掛けの拡散係数  $D_{ap}$  を算出した。

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (2)$$

ここに,  $C(x,t)$ : 距離  $x$  と試験期間  $t$  の塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $x$ : コンクリート表面からの距離(m),  $t$ : 試験期間(s),  $C_0$ : コンクリート表面の塩化物イオン濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),

$C_i$ : 初期含有塩化物イオン濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $D_{ap}$ : 見掛けの拡散係数( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $\operatorname{erf}$ : 誤差関数である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 非定常・電気泳動試験の結果

シリーズ I において, 非定常・電気泳動試験から得られた塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  を図-3 に示す。同図では,  $D_{nssm}$  と材齢の関係を式(3)で回帰分析して算出した回帰曲線を配合ごとに併記した。また, 式(3)の  $D_{nssm}$  の材齢依存性を示すパラメータ  $m_{nssm}$  を図-4 に示す。

$$D_t = D_n \left( \frac{n}{t} \right)^{m_{nssm}} \quad (3)$$

ここに,  $D_t$ : 任意材齢の  $D_{nssm}(\text{m}^2/\text{s})$ ,  $D_n$ : 基準となる材齢の  $D_{nssm}(\text{m}^2/\text{s})$ ,  $n$ : 基準となる材齢(day, 本稿では材齢 28 日に設定),  $t$ : 任意材齢(day),  $m_{nssm}$ :  $D_{nssm}$  の材齢依存性を示すパラメータである。

図-3 によると, 全ての供試体において,  $D_{nssm}$  は材齢の経過に伴って減少し, 遮塩性能が長期的に向上したことがわかる。ただし,  $D_{nssm}$  の大小と経時変化の傾向は, 結合材や細骨材の構成によって異なった。例えば, 高炉スラグ微粉末を用いた供試体(SG430, SG650)と高炉スラグ細骨材を用いた供試体(BFS30, BFS50, BFS70, BFS100)の  $D_{nssm}$  は, 早強ポルトランドセメントと天然砂を用いた供試体(STD)よりも常に小さくなった。一方, フライアッシュを用いた供試体(FA20)の  $D_{nssm}$  は, 材齢 56 日以降

で STD よりも小さくなった。FA20 では、フライアッシュのポゾラン反応によって、他の供試体よりも長期の材齢で遮塩性能の向上効果が現れたためと考えられる。

また、図-4 によると、SG430, SG650, FA20 の  $m_{nssm}$  は STD よりも大幅に大きく、FA20 の  $m_{nssm}$  が最大となった。 $m_{nssm}$  の値が大きいほど  $D_{nssm}$  の経時変化の程度が大きいことを意味しているため、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用が遮塩性能の向上に長期的に寄与したことを反映していると考えられる。一方、BFS30, BFS50, BFS70, BFS100 の  $m_{nssm}$  は STD と同程度であったが、高炉スラグ細骨材の混合率が高い供試体で僅かに大きく、高炉スラグ細骨材の混合率を高めることによって  $D_{nssm}$  の経時変化の程度が若干大きくなったと考えられる。

次に、シリーズ II において、非定常・電気泳動試験から得られた塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  を図-5 に示す。高炉スラグ微粉末 6000 を用いた供試体(SG650-S)と高炉スラグ細骨材を用いた供試体(BFS50-S, BFS100-S)では材齢 1 日以降、高炉スラグ微粉末 4000 を用いた供試体(SG430-S)とフライアッシュを用いた供試体(FA20-S)では材齢 14 日以降で、 $D_{nssm}$  が早強ポルトランドセメントと天然砂を用いた供試体(STD-S)よりも小さくなった。シリーズ II では、コンクリート打込み後に蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたことから、高炉スラグやフライアッシュの使用による遮塩性能の向上効果がシリーズ I よりも早期に現れたと考えられる。

以上のことを踏まえると、非定常・電気泳動試験では、試験実施時点でのコンクリートの遮塩性能の評価が可能であるため、高炉スラグやフライアッシュの使用による遮塩性能の向上効果に加えて、材齢の経過に伴う遮塩性能の変化を把握することができると考えられる。

### 3.2 電気抵抗率試験の結果

シリーズ I の電気抵抗率試験の結果を図-6、シリーズ II の電気抵抗率試験の結果を図-7 に示す。高炉スラグ微粉末を用いた供試体(SG430, SG650, SG430-S, SG650-S)とフライアッシュを用いた供試体(FA20, FA20-S)の電気抵抗率は、材齢の経過に伴って増加し、早強ポルトランドセメントと天然砂を用いた供試体(STD, STD-S)よりも大きくなった。FA20 では、この傾向が材齢 56 日以降で明確に現れ、図-3 で  $D_{nssm}$  が大幅に低下した材齢と概ね一致した。高炉スラグ細骨材を用いた供試体(BFS30, BFS50, BFS70, BFS100, BFS50-S, BFS100-S)の電気抵抗率は、材齢の経過に伴って大幅に増加することはなかったが、STD や STD-S よりも常に大きくなった。

### 3.3 $D_{nssm}$ と電気抵抗率の関係

非定常・電気泳動試験から得られた塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  と電気抵抗率の関係を図-8(A)、電気抵抗率の

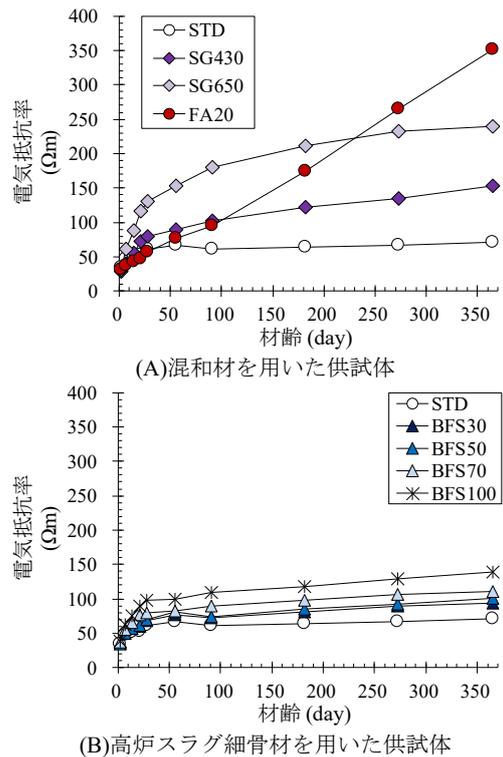


図-6 電気抵抗率試験の結果：シリーズ I

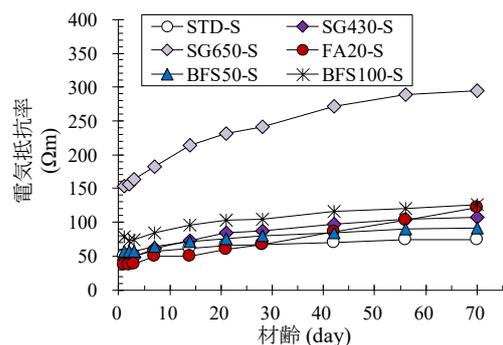


図-7 電気抵抗率試験の結果：シリーズ II

逆数(=導電率)との関係を図-8(B)に示す。同図では、非定常・電気泳動試験と電気抵抗率試験の実施材齢が同一の場合の結果を示した。すなわち、シリーズ I で材齢 14, 28, 56, 91, 182, 365 日、シリーズ II で材齢 1(脱型直後), 14, 28 日の結果を示した。

全体的な傾向として、 $D_{nssm}$  は、結合材や細骨材の構成、試験材齢、養生方法の違いにかかわらず、電気抵抗率と反比例し、導電率と比例する傾向にあった。同様の傾向は、浸せき試験から得られた見掛けの拡散係数と電気抵抗率の関係<sup>5), 12)</sup>、NT BUILD 492 から得られた塩化物イオン拡散係数と電気抵抗率の関係<sup>13), 14)</sup>でも報告されている。表-1 と表-2 によると、本稿の実験に用いた供試体の圧縮強度は、例えば、材齢 28 日では 60~70 N/mm<sup>2</sup> 程度で大幅な差はなかったが、 $D_{nssm}$  には結合材や細骨材の構成の違いによる差が生じていた。このため、圧縮強度のみでは高炉スラグやフライアッシュの使用による遮塩性能の向上効果を把握することが困難と考えられる。

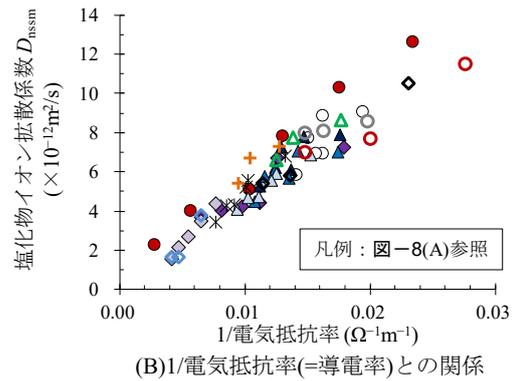
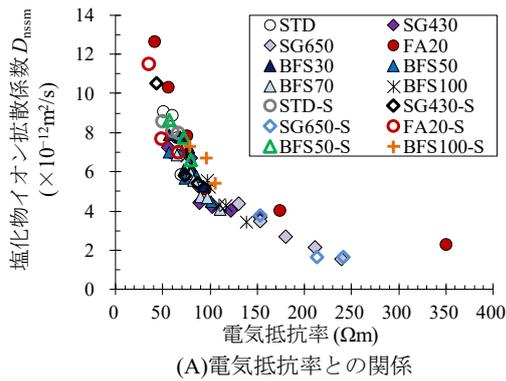


図-8 塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  と電気抵抗率

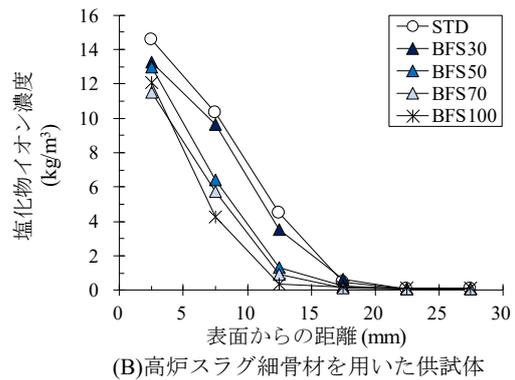
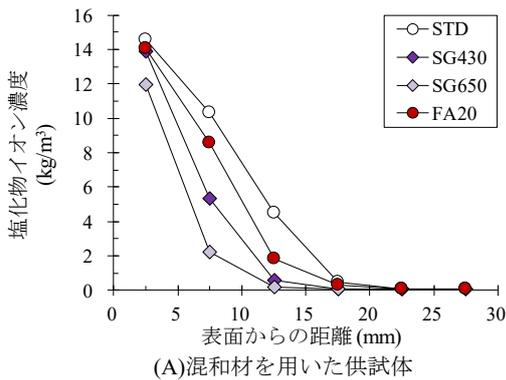


図-9 浸せき試験から得られた塩化物イオン濃度分布

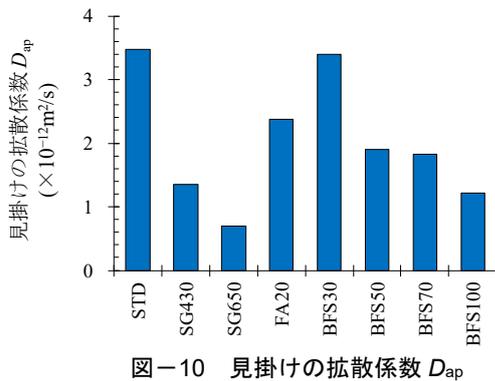


図-10 見掛けの拡散係数  $D_{ap}$

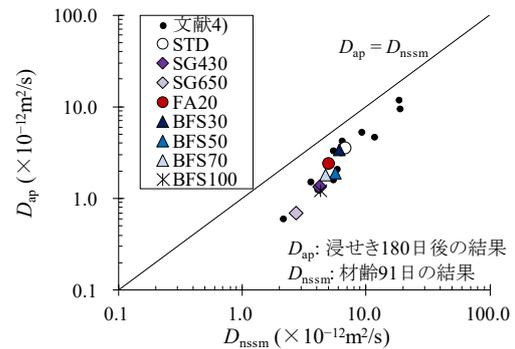


図-11 塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  と見掛けの拡散係数  $D_{ap}$

一方、電気抵抗率あるいは導電率は、 $D_{nssm}$ と概ね反比例あるいは比例する傾向を示しており、遮塩性能の評価指標として活用できる可能性があると考えられる。

また、2.2と2.3で前述したように、本稿の実験では、 $D_{nssm}$ を得るための作業時間は約7日間、電気抵抗率の測定のための作業時間は1供試体あたり約5分間であった。電気抵抗率試験では、非定常・電気泳動試験と比較しても短期の試験期間で、かつ、非破壊で結果を得ることができるため、例えば、遮塩性能に着目した硬化コンクリートの品質管理などで活用できる可能性があると考えられる。ただし、図-8を精査すると、電気抵抗率あるいは導電率が同程度であっても  $D_{nssm}$  に差が生じている場合もあった。電気抵抗率試験による遮塩性能の評価手法の信頼性を高めるためには、使用材料や配合の異なる多種多様なコンクリートを対象として実験データを更に蓄

積することが必要と考えられる。

### 3.4 浸せき試験の結果

シリーズIにおいて、浸せき試験から得られた塩化物イオン濃度分布を図-9、見掛けの拡散係数  $D_{ap}$ を図-10に示す。高炉スラグあるいはフライアッシュを用いた供試体(SG430, SG650, FA20, BFS30, BFS50, BFS70, BFS100)では、早強ポルトランドセメントと天然砂を用いた供試体(STD)と比較して、塩化物イオンの浸透が抑制され、この結果として  $D_{ap}$ が小さくなった。高炉スラグやフライアッシュの使用によって遮塩性能が向上したことを改めて確認できる。また、 $D_{ap}$ の大小に着目すると、高炉スラグ微粉末を用いた供試体で遮塩性能が大幅に向上したこと、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遮塩性能が向上したことがわかる。これらの傾向は図-3と図-5に前掲した  $D_{nssm}$ とも一致する。

### 3.5 $D_{nssm}$ と $D_{ap}$ の関係

非定常・電気泳動試験から得られた塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  と浸せき試験から得られた見掛けの拡散係数  $D_{ap}$  の関係を図-11 に示す。同図では、 $D_{nssm}$  を材齢 91 日の結果、 $D_{ap}$  を 180 日間の浸せき試験から得られた結果とし、文献 4) の実験データも併記した。文献 4) の実験データは、水結合材比を 40~50% として、結合材の一部に高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いたコンクリートとモルタルで得られたものである。

$D_{nssm}$  は  $D_{ap}$  よりも若干大きくなったが、結合材や細骨材の構成の違いにかかわらず、 $D_{nssm}$  が大きい供試体で  $D_{ap}$  も大きくなる傾向にあった。本稿の実験で対象とした水結合材比が低く、かつ、結合材や細骨材に高炉スラグあるいはフライアッシュを用いたコンクリートにおいても、非定常・電気泳動試験を適用することによって、浸せき試験と同様に、高炉スラグやフライアッシュの使用による遮塩性能の向上効果を評価できると考えられる。

### 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) 非定常・電気泳動試験は、浸せき試験と同様に、結合材や細骨材に高炉スラグあるいはフライアッシュを用いたコンクリートの遮塩性能の向上効果を評価できる。また、非定常・電気泳動試験は、試験実施時点での遮塩性能の評価が可能であり、材齢の経過に伴う遮塩性能の変化を把握できる。
- (2) 電気抵抗率は、使用材料や試験材齢、養生方法の違いにかかわらず、非定常・電気泳動試験から得られる塩化物イオン拡散係数と概ね反比例の関係となる。このため、電気抵抗率は、非定常・電気泳動試験よりも短期で、かつ、非破壊で遮塩性能を評価する際の評価指標として活用できる可能性がある。

### 参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.154-156，2013.3
- 2) 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(案)，土木学会，2013
- 3) JSCE-G 572-2013：浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)，土木学会，2013
- 4) 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

- 5) 皆川浩，久田真，榎原彩野，齊藤佑貴，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
- 6) NT BUILD 492: Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments, Nordtest, 1999
- 7) 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
- 8) fib: fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Shon, 2013.12
- 9) Gudimetta, J., and Crawford, G.: Resistivity Tests for Concrete—Recent Field Experience, ACI Materials Journal, V.113, No.4, July-August, pp.505-512, 2016
- 10) ASTM Designation: C 1202-10: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, 2010
- 11) 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
- 12) 藤井隆史，堀水紀，藤原斉，綾野克紀：高炉スラグを用いたコンクリートの中性化，塩化物イオン浸透性および電気抵抗性に関する研究，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.16，pp.195-200，2016.10
- 13) van Noort, R., Hunger, M., and Spiesz, P.: Long-term Chloride Migration Coefficient in Slag Cement-based Concrete and Resistivity as an Alternative Test Method, Construction and Building Materials, Vol.115, pp.746-759, 2016.4
- 14) Liu, Y., Presuel-Moreno, F. J., and Paredes, M. A.: Determination of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete by Electrical Resistivity Method, ACI Materials Journal, V.112, No.5, September-October, pp.631-640, 2015