

混和材を用いて塩化物イオン浸透抵抗性を高めた コンクリートの評価指標の提案

櫻庭 浩樹*1・小田部 貴憲*2・鈴木 雅博*3・古賀 裕久*4

混和材を用いて塩化物イオン浸透抵抗性を高めたコンクリートの迅速な評価方法として、非定常電気泳動試験および電気抵抗率試験を検討し、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用による効果を短期間で評価できることを確認した。また、これらのコンクリートについて、塩水への浸せき試験を長期間行い、迅速評価試験の結果と比較検討して、塩化物イオン浸透抵抗性を区分するための指標を提案した。さらに、プレキャストプレストレストコンクリート部材を製造する11の工場のコンクリートを用いて非定常電気泳動試験および電気抵抗率試験を行った。その結果、電気抵抗率を指標とすることで、製品出荷時に、供用後の塩化物イオン浸透抵抗性を確認できることを示した。

キーワード：塩化物イオン浸透抵抗性、非定常電気泳動試験、電気抵抗率試験、実製品適用

1. はじめに

近年、混和材を用いた塩化物イオン浸透抵抗性が極めて高いコンクリートでは、図-1に示すように塩化物イオンの経時的な浸透が停滞する可能性が報告されている¹⁾。過酷な塩害環境で供用される構造物に対して、このようなコンクリートを用いれば、耐久性を向上できると期待される。しかし、現状では、塩化物イオンの浸透を停滞させる条件は明確ではない。塩化物イオン浸透抵抗性は、一般的に浸せき試験や屋外暴露試験により評価されるが、高耐久コンクリートの検証には年単位の期間を要するため、迅速な評価試験方法の確立が必要と考えられる。

このような背景から、著者らは、塩化物イオン浸透抵抗性の迅速な評価方法として、非定常電気泳動試験および電気抵抗率試験を提案しており、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用による塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果を短期間で評価できることを確認している²⁾。

本報告では、塩化物イオンの経時的な浸透が停滞するようなコンクリートを含む種々のコンクリートの試験結果を整理し、非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数や電気抵抗率を指標としたコンクリートの分類を検討した。

さらに、全国各地のプレキャストプレストレストコンクリート（以下、PCaPC）製造工場（11工場）のコンクリートを用いて非定常電気泳動試験および電気抵抗率試験を行った。この結果を踏まえ、製品出荷時の測定で、供用後の塩化物イオン浸透抵抗性を評価する方法を提案した。

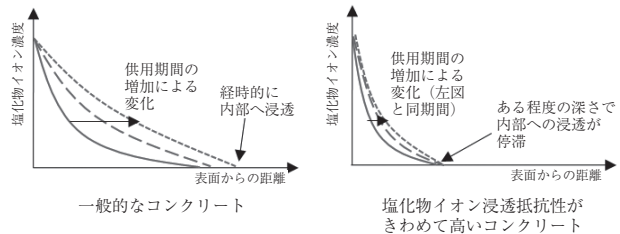


図-1 本研究で着目する塩化物イオンの挙動

2. 塩化物イオン浸透抵抗性が極めて高いコンクリートに対応した試験方法

本章では、本報告で検証した塩化物イオン浸透抵抗性がきわめて高いコンクリートの条件とその評価に用いた浸せき試験、非定常電気泳動試験および電気抵抗率試験について説明する。

2.1 コンクリート

実験には、配合と養生条件が異なる合計8種類の円柱供試体（φ100×200mm）を用いた（表-1）。

配合は、水結合材比を33%または36%とし、結合材を早強ポルトランドセメント単味の場合（H）、Hの一部を高炉スラグ微粉末（高炉スラグ微粉末6000：SG6、高炉スラグ微粉末4000：SG4）あるいはフライアッシュⅡ種（FA2）で置換した場合の3種類とした。

養生条件は、コンクリート打込み翌日に脱型し、試験材齢まで水中養生したもの（以下、水中養生シリーズ）、コンクリート打込み後から温度と湿度をプログラム制御可能な養生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、50℃を6時間維持、20℃まで5時間で降温）を与えたのちに脱型し、試験材齢まで20℃で水中養生したもの（以下、蒸気養生シリーズ）

*1 Hiroki SAKURABA：国立研究開発法人土木研究所

*2 Takanori KOTABE：国立研究開発法人土木研究所（現：(株)安部日鋼工業）

*3 Masahiro SUZUKI：一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

*4 Hirohisa KOGA：国立研究開発法人土木研究所

表 - 1 養生条件ならびにコンクリートの配合と圧縮強度

養生条件 (実験シリーズ)	供試体表記	W/B (%)	単位量 (kg/m ³) (結合材の構成割合 (%))					圧縮強度 (N/mm ²) 材齢 28 日		
			W	B=HPC+SG4+SG6+FA			S		G	
				HPC	SG4	SG6				FA2
水中養生 シリーズ	H36	36.0	165	458	—	—	—	721	968	65.3
	H36SG430			321	138 (30%)	—	—	712		60.5
	H36SG650			229	—	229 (50%)	—	707		69.4
	H36FA220			367	—	—	92 (20%)	696		60.6
蒸気養生 シリーズ	H36-S	36.0		458	—	—	—	721		62.6
	H36SG430-S	33.0		350	150 (30%)	—	—	712		64.7
	H36SG650-S			250	—	250 (50%)	—	707		70.5
	H36FA220-S			400	—	—	100 (20%)	696		62.4

水中養生シリーズ 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/cm³，比表面積 4 480 cm²/g），SG4：高炉スラグ微粉末 4 000（密度 2.89 g/cm³，比表面積 4 350 cm²/g，せつこう添加（SO₃ 換算 2%）），SG6：高炉スラグ微粉末 6 000（密度 2.91 g/cm³，比表面積 6 210 cm²/g，せつこう添加（SO₃ 換算 3%）），FA2：フライアッシュⅡ種（密度 2.35 g/cm³，比表面積 4 330 cm²/g），S：細骨材（静岡県掛川産陸砂，密度 2.56 g/cm³，吸水率 2.23%），G：粗骨材（茨城県笠間産砕石 6 号（密度 2.67 g/cm³，吸水率 0.43%，硬質砂岩）と同 5 号（密度 2.67 g/cm³，吸水率 0.46%，硬質砂岩）を均等に混合），化学混和剤：高性能減水剤と空気連行剤を使用
蒸気養生シリーズ HPC：早強ポルトランドセメント（密度 3.14 g/cm³，比表面積 4 680 cm²/g），SG4：高炉スラグ微粉末 4 000（密度 2.89 g/cm³，比表面積 4 530 cm²/g，せつこう添加（SO₃ 換算 2%）），SG6：高炉スラグ微粉末 6 000（密度 2.91 g/cm³，比表面積 5 940 cm²/g，せつこう添加（SO₃ 換算 3%）），FA2：フライアッシュⅡ種（密度 2.25 g/cm³，比表面積 4 010 cm²/g），そのほかは水中養生シリーズと同一

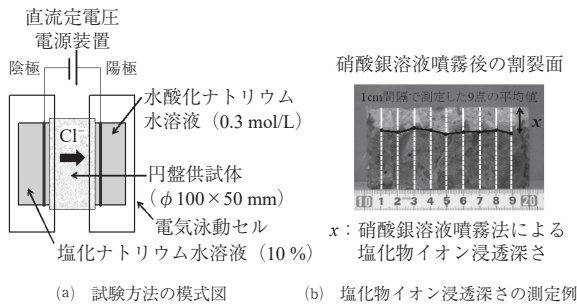


図 - 2 非正常・電気泳動試験の概要

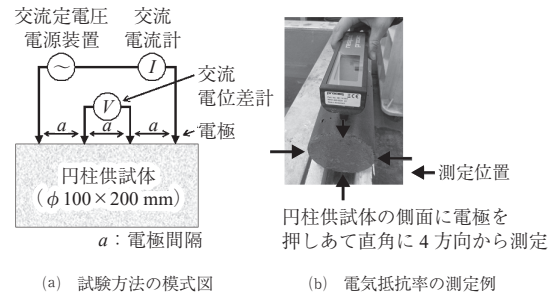


図 - 3 電気抵抗率試験の概要

の 2 種類がある。

供試体の表記は、「H33SG650-S」のように、セメントの種類、水結合材比（33%，36%），混和材の種類（SG4，SG6，FA2）と置換率（20%，30%，50%）を組み合わせで表し、蒸気養生シリーズには末尾に「-S」を付記した。いずれの配合も材齢 28 日の圧縮強度は、60～70 N/mm² 程度であった。

2.2 浸せき試験の方法

各種類の供試体 1 体の両端面から約 25 mm 部分を切断除去し、高さ 150 mm 程度に成形した。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のち、濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液に浸せきした。浸せき期間は、水中養生シリーズの供試体は 1 097 日、蒸気養生シリーズの供試体は 730 日までとした。その後、表面から厚さ 5 mm ごとに試料を採取して JIS A 1154 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り式 (1) 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。

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

ここで、 $C(x, t)$ ： x 位置の t における塩化物イオン濃度 (kg/m³)， 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 (kg/m³)， C_i ：初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m³)， D_{ap} ：見掛けの拡散係数 (m²/s)， erf ：誤差関数である。

2.3 非正常電気泳動試験の方法

各種類の円柱供試体 1 体の中央から厚さ 50 mm の円盤供試体を 2 個ずつ切断し、真空飽和处理を行った。電気泳動セルに円盤供試体を設置し、印加電圧を 30 V として円盤供試体に塩化物イオンを電気泳動させた（図 - 2 (a)）。通電時間は 6 時間と 24 時間とした。その後、円盤供試体の割裂面に 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)），式 (2) を用いて非正常電気泳動法による塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} （以下、塩化物イオン拡散係数）を算出した²⁾。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} K \quad (2)$$

ここに、 D_{nssm} ：塩化物イオン拡散係数 (m²/s)， R ：気体定数 (= 8.31J/(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 × 10⁴ 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。塩化物イオン浸透速度係数 K は、通電時間 24 時間と 6 時間の塩化物イオン浸透深さの差分を通電時間の差分で除して求めた。

2.4 電気抵抗率試験の方法

電気抵抗率の測定は、水中養生シリーズは各 2 体、蒸気養生シリーズは各 3 体の供試体を用い、JSCE-G 581 B 法に準拠して行った。測定装置には、電極間隔 50 mm，周波数 40 Hz，測定範囲 10～10000 Ωm のものを用いた。測定は、電極を供試体側面に押しあて、互いに直角をなす 4

表 - 2 各試験実施時の材齢

試験の種類	実験シリーズ	材齢 (日)														
		91	101-106	133, 140	182	180-189	201, 202	223, 230	365	372-385	408, 415	730	749, 750	758-765	773, 780	1 140, 1 143
浸せき試験	水中養生			●				▲			■				◆	×
	蒸気養生						▲			■			◆			
非常電気泳動試験	水中養生		●			▲				■				◆		
	蒸気養生		●			▲				■						
電気抵抗率試験	水中養生	○			△				□			◇				
	蒸気養生	○			△				□							

浸せき試験における浸せきの期間 ●: 浸せき 90 日, ▲: 浸せき 180 日, ■: 浸せき 365 日, ◆: 浸せき 730 日, ×: 浸せき 1 097 日

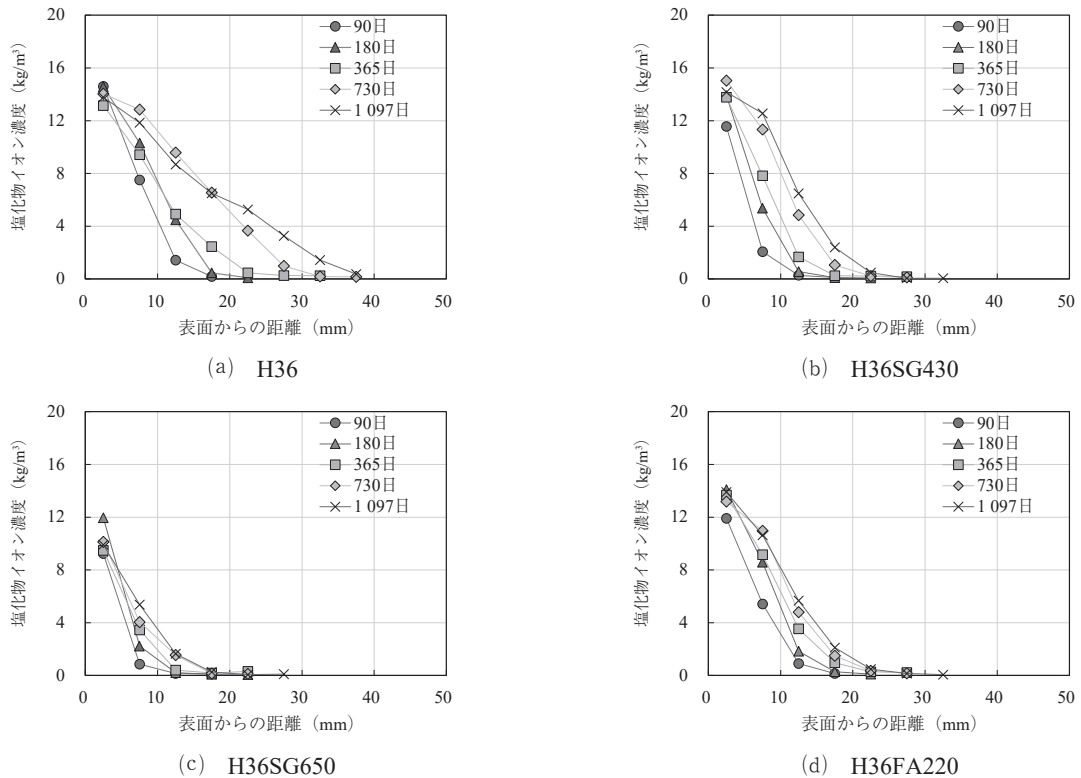


図 - 4 浸せき試験後の塩化物イオン濃度分布の例 (水中養生シリーズ)

方向から行った (図 - 3)。測定値は、JSCE-G 581 附属書 1 に記載されているセル定数を用いて、供試体の形状や寸法、電極の配置間隔に依存しない値に換算した。電気抵抗率の評価には、換算後の値を平均した値を用いた。

2.5 各試験における供試体の材齢

各試験実施時の材齢を表 - 2 に示す。浸せき試験は、水中養生と蒸気養生シリーズでわずかに試験材齢が異なっているが、本報告では、浸せき日数で整理した。浸せき試験と非常電気泳動試験または電気抵抗率試験の結果を比較する際には、もっとも近い材齢の結果を用いた。非常電気泳動試験を行う供試体は、同時期に行った電気抵抗率試験と同じ時点で水中養生を終了した。その後、供試体の切断などの試験準備を行い、表 - 2 の材齢で通電を行って、塩化物イオン浸透深さを測定した。

3. 塩化物イオン浸透抵抗性がきわめて高いコンクリートの評価指標の検討

本章では、まず、従来から行われている浸せき試験の結

果から塩化物イオン浸透抵抗性がきわめて高いコンクリートを評価し、次に迅速評価試験である非常電気泳動試験と電気抵抗率試験の結果を比較することで、塩化物イオンの浸透が停滞するようなコンクリートを分類するための評価指標を検討した。

3.1 浸せき試験

塩化物イオン濃度分布の例を図 - 4 に示す。H36 では、経時的に塩化物イオンが内部に浸透していることが確認された。H36SG430 では、H36 と比較すると内部への塩化物イオンの浸透が抑制されているが、浸せき期間を通して経時的に塩化物イオンが浸透していると考えられる。一方、H36SG650 と H36FA220 では、塩化物イオンの内部への浸透が、浸せき期間 365 日以降は明確ではなく、停滞しているように見える。

塩化物イオン浸透フロントの経時変化を図 - 5 に示す。ここで、塩化物イオン浸透フロントは、塩化物イオン濃度が 0.3 kg/m^3 を超えた試料の midpoint までの距離と定義した。これは、分析した試料の初期含有塩化物イオン濃度が

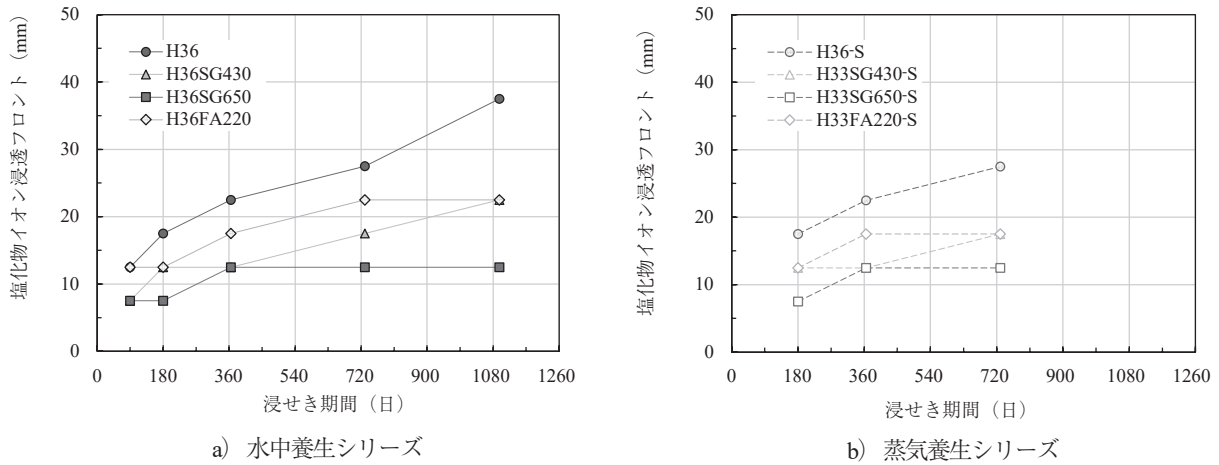


図 - 5 浸せき試験中の塩化物イオン浸透フロントの経時変化

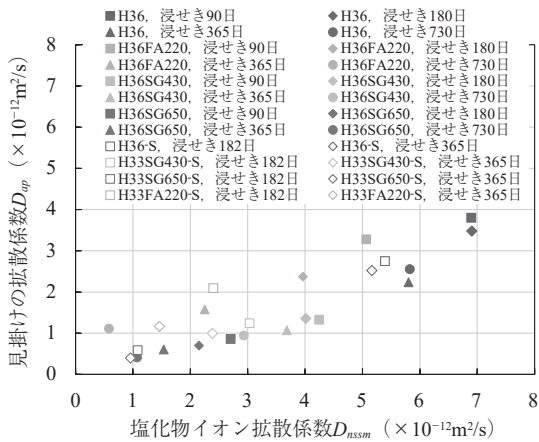


図 - 6 見掛けの拡散係数 D_{ap} と塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}

0.15 kg/m³ 程度であったことを考慮し、0.3 kg/m³ を基準とすることで塩化物イオンの浸透の有無を判断できると考えたためである。試料の中点までの距離は、たとえば、表面からの距離 5 ~ 10 mm の範囲から採取した試料の場合は 7.5 mm (= 5 mm + 2.5 mm) となる。

H36, H36-S, H36SG430, H33SG430-S では、経時的に塩化物イオン浸透フロントが増加しているのに対し、H36SG650, H33SG650-S, H36FA220, H33FA220-S では、浸せき 365 日以降に、塩化物イオン浸透フロントが停滞した。このことから、後者のグループは、塩化物イオン浸透抵抗性がきわめて高いと考えられる。H36FA220 と H33FA220-S の塩化物イオン浸透フロントが、H36SG430 と H33SG430-S の場合と同程度まで達した理由は、ポゾラン反応が顕著になって空隙構造が密になるまでに時間を要したためと推察される。なお、蒸気養生シリーズの H33FA220-S の方が、H36FA220 と比較して早期に停滞する傾向があった。

3.2 浸せき試験と非定常電気泳動試験

見掛けの拡散係数 D_{ap} と塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を図 - 6 に示す。全体の傾向として、見掛けの拡散係数 D_{ap} と塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} は相関関係にあることを確

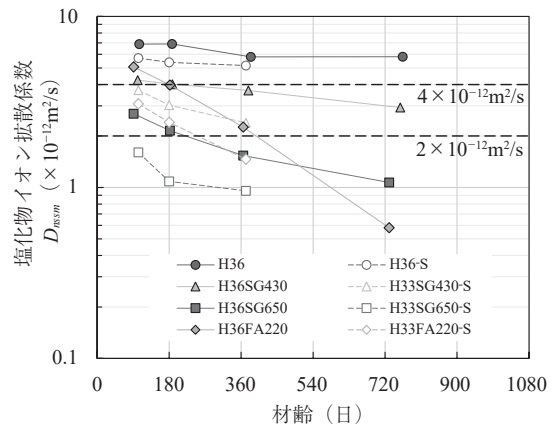


図 - 7 塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}

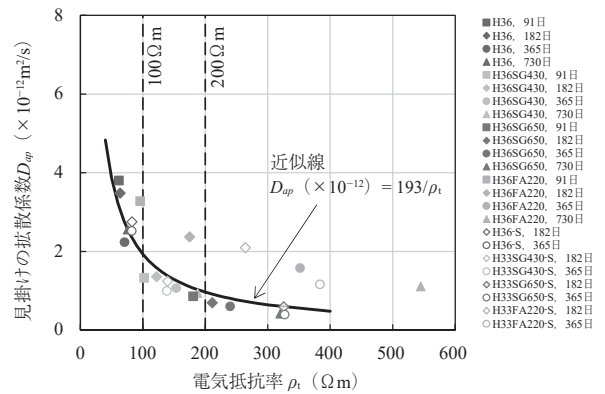


図 - 8 見掛けの拡散係数 D_{ap} と電気抵抗率 ρ_t の関係

認できる。

3.1 節で塩化物イオンの浸透が停滞した H36SG650, H33SG650-S では、他の供試体よりも見掛けの拡散係数 D_{ap} が小さい値を示した。一方、同様に塩化物イオンの浸透が停滞した H36FA220, H33FA220-S では、H36SG650, H33SG650-S よりも大きい値で浸透の停滞が確認された。これは、浸せき試験の開始材齢が 20 または 50 日であり、ポゾラン反応が顕著になる以前に塩化物イオンが浸透した影響で、見掛け上、拡散係数が大きくなったためと考えら

表 - 3 塩化物イオン浸透抵抗性の分類

本実験での配合	塩化物イオンの浸透抵抗性の区分	塩化物イオン浸透抵抗性の指標		塩化物イオン浸透抵抗性の区分に応じた対策例
		非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} ($\times 10^{-12}m^2/s$)	電気抵抗率 (Ωm)	
1) 早強ポルトランドセメント単味 (W/B36%)	従来から橋梁に用いられている PCaPC	> 4	< 100	塩害の影響度合いがもっとも激しい区分では、かぶりのみでは防食できず、塗装鉄筋等併用
2) 高炉スラグ微粉末 4000 を置換率 30% で用いた場合 (W/B33% or 36%)	塩化物イオン浸透抵抗性が高い	2 ~ 4	100 ~ 200	塩害の影響度合いがもっとも激しい区分では、100年間で、かぶり 70mm 位置の塩化物イオン濃度が腐食限界値に達しない
3) 高炉スラグ微粉末 6000 を置換率 50%、または、フライアッシュを置換率 20% で用いた場合 (W/B33% or 36%)	塩化物イオン浸透抵抗性がきわめて高い	< 2	> 200	塩化物イオンの浸透が停滞するため塩害の影響を受けない

れる。

塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を図 - 7 に示す。浸せき 365 日以降に塩化物イオンの浸透が停滞したことも踏まえて、塩化物イオン浸透抵抗性を分類すると、1) 早強ポルトランドセメント単味の場合、2) 高炉スラグ微粉末 4000 を置換率 30% で用いた場合、3) 高炉スラグ微粉末 6000 を置換率 50% またはフライアッシュを置換率 20% で用いた場合となり、1) ~ 3) は、 $4 \times 10^{-12}m^2/s$ と $2 \times 10^{-12}m^2/s$ を閾値としておおよそ区分することができた。

3.3 浸せき試験と電気抵抗率試験

見掛けの拡散係数 D_{ap} と電気抵抗率の関係を図 - 8 に示す。また、図中には、反比例の関係を仮定し、最小二乗法により得られた近似曲線も示す。ただし、3.2 節で述べたとおり、フライアッシュを用いた場合は、見掛けの拡散係数 D_{ap} がほかの混和材を用いた場合と比較して大きいことを考慮して、近似曲線を算出する際には除外した。

全体的な傾向として、供試体の種類や材齢に関わらず、両試験結果は、既往研究で確認されているとおりのおおむね反比例の関係であることを確認できる³⁾。浸せき 365 日以降に塩化物イオンの浸透が停滞したことも踏まえて、電気抵抗率を用いて塩化物イオン浸透抵抗性を分類すると、1) 早強ポルトランドセメント単味の場合、2) 高炉スラグ微粉末 4000 を置換率 30% で用いた場合、3) 高炉スラグ微粉末 6000 を置換率 50% またはフライアッシュを置換率 20% で用いた場合となり、1) ~ 3) は、100 Ωm と 200 Ωm を閾値としておおよそ区分することができた。なお、塩化物イオン浸透の停滞が見られた材齢時点の電気抵抗率は、H36SG650, H33SG650-S, H36FA220 および H33FA220-S でそれぞれ、240, 327, 545 および 383 Ωm であり、いずれも 200 Ωm を超える値を示した。

3.4 実環境における塩化物イオン浸透挙動と電気抵抗率の対応

ここで、浸せき 365 日以降の試験結果を踏まえ、電気抵抗率が 100 Ωm 程度のコンクリートの見掛けの拡散係数を図 - 8 中の近似式から求めると、 D_{ap} は $2 \times 10^{-12}m^2/s$ 程度となる。

浸せき試験で得られる見掛けの拡散係数は、コンクリート中の含水率の違いなどの条件に起因して、屋外暴露試験などで得られる実環境での見掛けの拡散係数よりも大きくなることが知られている。既往研究⁴⁾を参考に、波しぶきが直接かからない条件での新潟県および沖縄県の海岸線

を想定し、その違いを補正すると、実環境での見掛けの拡散係数は、前述の浸せきによる見掛けの拡散係数 $D_{ap} = 2 \times 10^{-12}m^2/s$ に対して $D_{ap} = 0.4 \times 10^{-12}m^2/s$ 程度になると推定される。

実環境における見掛けの拡散係数 $D_{ap} = 0.4 \times 10^{-12}m^2/s$ 、塩害環境が厳しい沖縄県の海岸線で波しぶきは直接かからない条件を想定した表面塩化物イオン濃度⁵⁾ $C_0 = 6.3 kg/m^3$ 、初期含有塩化物イオン濃度 $C_i = 0.3 kg/m^3$ の条件で、式 (1) により、100 年後の塩化物イオン濃度分布を求めると、かぶり 70 mm 位置で腐食発生限界塩化物イオン濃度 1.2 kg/m^3 以下となる。

したがって、電気抵抗率 100 Ωm 以上となり、従来のプレレストコンクリートよりも電気抵抗率が大きい配合に区分される場合は、塩害環境が厳しい沖縄県の海岸線でも、波しぶきが直接かからない条件においては、100 年間で鋼材腐食は発生しないと考えられる。

3.5 塩化物イオン浸透抵抗性の分類

塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} または電気抵抗率を指標として、塩化物イオン浸透抵抗性を分類した結果を表 - 3 に示す。浸せき試験における塩化物イオン浸透挙動と、非定常電気泳動試験または電気抵抗率試験の結果を関連付けて整理することで、3 種類の区分に分類できた。ただし、3) のフライアッシュを置換率 20% で用いた配合の場合には、一般にポゾラン反応が顕著になるまでに時間を要するため、電気抵抗率の増加も遅いことに留意が必要である。

4. 提案した指標値の実製品への適用性評価

第 3 章では、浸せき試験と、非定常電気泳動試験および電気抵抗率試験の結果を比較することで、塩化物イオン浸透抵抗性を分類する指標値を提案した。第 4 章では、全国各地の PCaPC 製造工場 (11 工場) のコンクリートを用いて、様々な材料や製造条件において適用できるかを検証した。

また、第 3 章で提案した指標値は、浸せき期間 1 年以上の結果を踏まえて設定したものであり、製品出荷前の段階では適用できないことが想定された。そこで、若材齢時の電気抵抗率の推移から、図 - 9 に示すように、供用後の電気抵抗率を推定できないか検討した。

4.1 検討方法

PCaPC 部材の製造工場から実機練りのコンクリートを採取し、製品と同一の蒸気養生を与えた $\phi 100 \times 200 mm$ の供試体を製作した。コンクリートの配合、養生条件、お

表 - 4 コンクリート配合, 養生条件, および圧縮強度

工場名 製造時期	記号	W/B (%)	s/a (%)	Air (%)	W (kg/m ³)	結合材の構成割合 (%) B = HPC + SG6 + FA2			養生条件	圧縮強度 (N/mm ²)	
						HPC	SG6	FA2		材齢 1 日	材齢 28 日
工場 (A) 2019 年 7 月	H-S	35.0	40.0	3.0	153	100	-	-	蒸気養生	51.6	75.8
	SG650-S	33.0	39.0	4.5	145	50	50	-	蒸気養生	48.5	66.4
工場 (B) 2019 年 8 月	H-S	35.4	38.8	4.5	157	100	-	-	蒸気養生	47.8	82.8
	SG650-S	33.4	43.0	4.5	150	50	50	-	蒸気養生	45.0	65.8
工場 (C) 2019 年 8 月	H	34.9	41.0	4.5	145	100	-	-	気中養生	56.2	65.3
	SG650	33.7	43.0	4.5	143	50	50	-	気中養生	49.6	78.3
工場 (D) 2019 年 8 月	H-S	36.0	44.5	4.5	150	100	-	-	蒸気養生	41.2	66.6
	SG650-S	36.0	42.0	4.5	150	50	50	-	蒸気養生	36.1	67.4
工場 (E) 2019 年 10 月	H-S	33.5	43.8	4.5	152	100	-	-	蒸気養生	48.1	70.3
	SG650-S	33.0	43.8	4.5	150	50	50	-	蒸気養生	37.9	73.5
工場 (F) 2019 年 10 月	H-S	33.5	43.8	4.5	152	100	-	-	蒸気養生	49.1	69.5
	SG650-S	32.0	47.5	5.5	160	50	50	-	蒸気養生	42.8	67.6
工場 (G) 2019 年 10 月	H-S	36.0	40.9	4.5	148	100	-	-	蒸気養生	45.6	58.5
	SG650-S	35.8	41.3	4.5	146	50	50	-	蒸気養生	43.3	65.7
工場 (H) 2019 年 12 月	H-S	36.0	44.4	4.5	163	100	-	-	蒸気養生	42.4	58.7
	SG650-S	34.0	38.9	4.5	162	50	50	-	蒸気養生	42.8	70.8
工場 (I) 2019 年 12 月	H-S	36.0	42.0	4.5	155	100	-	-	蒸気養生	41.6	62.8
	SG650-S	33.3	39.5	4.5	150	50	50	-	蒸気養生	48.3	68.9
工場 (J) 2019 年 12 月	H-S	37.4	41.0	4.5	157	100	-	-	蒸気養生	40.4	58.0
	SG650-S	33.0	45.0	4.5	160	50	50	-	蒸気養生	42.6	69.8
工場 (K) 2019 年 9 月	H-S	36.0	42.0	4.5	151	100	-	-	蒸気養生	40.1	56.5
	FA215-S	33.0	41.4	4.5	151	85	-	15	蒸気養生	40.7	55.9

供試体共通事項

- ・プリキ製のコンクリート供試体成形型枠を使用し円柱供試体を製造
- ・混和材は、高炉スラグ微粉末 6000 またはフライアッシュ II 種を使用
- ・主桁、床版、まくらぎ、建築部材などの PCaPC 部材に用いられるコンクリートを採取、設計基準強度 50 N/mm²
- ・蒸気養生の養生を開始する時期、温度上昇速度、冷却速度、養生温度および養生時間などは部材ごとに異なる (本検討の範囲: 前養生 3 ~ 11 h, 最高温度 40 ~ 60 °C, 最高温度保持時間 3 ~ 8 h), 気中養生する部材はコンクリート打込み後の急激な乾燥を防ぐ対策を実施
- ・使用材料の産地や供給元は各工場で異なる
- ・スランブの目標値は部材ごとに異なる (本検討の範囲: 12 ~ 18 cm)

および圧縮強度を表 - 4 に示す。本検討では 2 種類の混和材を使用し、結合材を早強ポルトランドセメントのみとした配合 (以下, H シリーズ), 結合材に高炉スラグ微粉末 6000 を用いて置換率を 50% とした配合 (以下, SG650 シリーズ), フライアッシュ II 種を用いて置換率を 15% とした配合 (以下, FA215) とした。蒸気養生を実施した供試体は, 末尾に -S を付記した。供試体は材齢 1 日に脱型し 20 °C の水中で所定の材齢まで養生した。次に, 製作した 3 体の供試体を対象として, 2.3 節および 2.4 節に示した方法により, 非定常電気泳動試験 (材齢 91 日) および電気抵抗率試験 (材齢 1 ~ 91 日) を実施した。これらの試験結果では, 供試体 3 体の平均値を示す。

4.2 実験結果と考察

(1) 非定常電気泳動試験

材齢 91 日の塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} と電気抵抗率の関係を図 - 10 に示す。同図には, これらが反比例の関係にあると仮定して回帰した近似線を示した。図全体を俯瞰すると, 過去の研究結果²⁾と同様に, 塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} と電気抵抗率は反比例の関係にあることが確認された。

全国各地の PCaPC 製造工場のコンクリートに対しても, H シリーズと SG650 シリーズは明確に区別されており, 高炉スラグ微粉末を使用することによる塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果を, 電気抵抗率試験および非定常電気泳動試験で評価できている。また, 表 - 3 に示した閾値と比較すると, 材齢 91 日の試験値であるものの, おおむね対応する結果が得られている。とくに, 電気抵抗率を指標とした場合, 200 Ωm を閾値とすることで, 早強単味配合と高炉スラグ微粉末配合の場合を明確に区別できた。

(2) 電気抵抗率試験

各シリーズの電気抵抗率と材齢の関係を図 - 11 に示す。いずれのシリーズも材齢経過に伴い電気抵抗率は高くなるが, 同種の結合材を用いた配合であっても製造した工場に

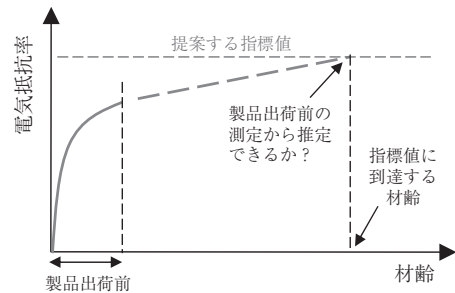


図 - 9 製品出荷前の電気抵抗率測定による評価のイメージ

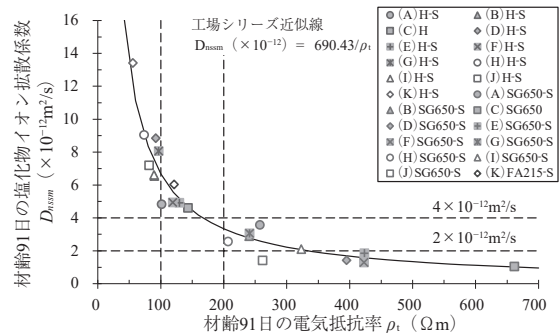


図 - 10 塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} と電気抵抗率 ρ_t の関係

よって電気抵抗率に差があることが分かる。たとえば, H シリーズおよび SG650 シリーズでは, 材齢 7 日以降, 工場 (C) の供試体の電気抵抗率は, 工場 (H) の供試体の 2 倍以上であった。

ここで, 材齢に伴う電気抵抗率の変化について考察する。既往研究²⁾から, 材齢の経過に伴う塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} の変化は, 式 (3) で表すことができると推定される。

$$D_t = D_n \left(\frac{n}{t} \right)^m \tag{3}$$

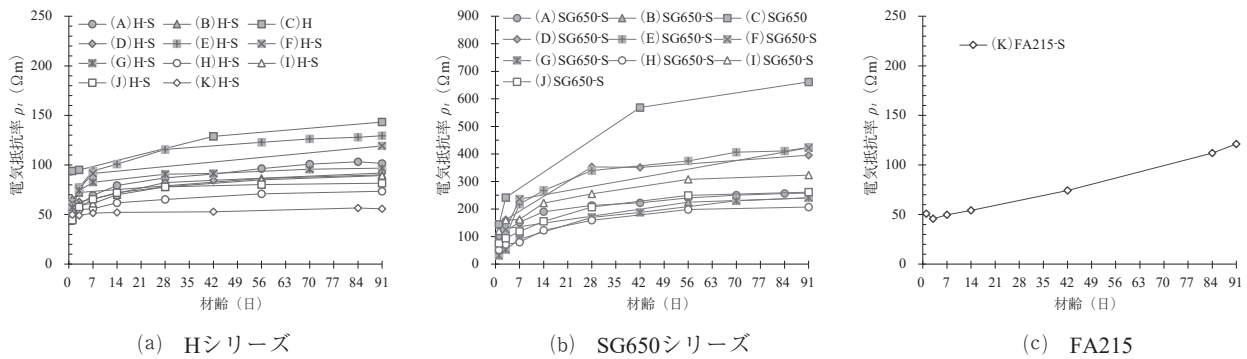


図 - 11 電気抵抗率 ρ_t と材齢の関係

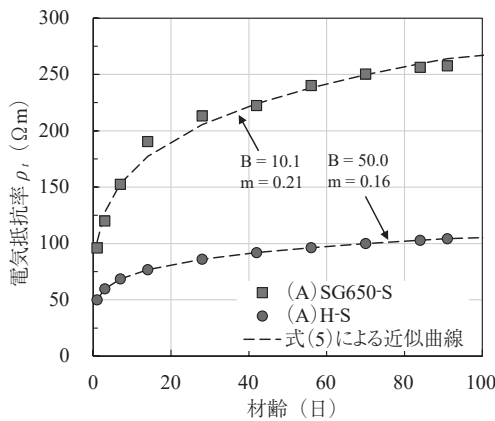


図 - 12 式(5)による電気抵抗率 ρ_t の近似曲線の例

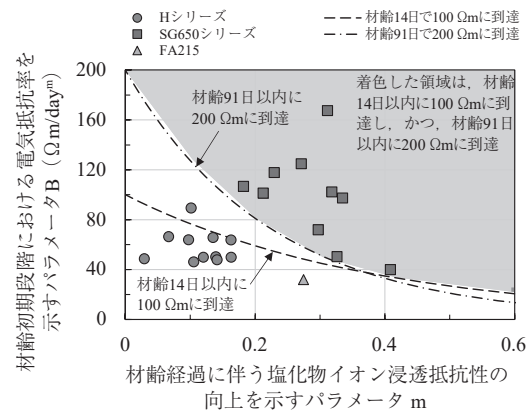


図 - 13 式(5)のパラメータに基づいた電気抵抗率の変化状況の整理

ここに、 D_t : 任意材齢の D_{nssm} (m^2/s), D_n : 基準となる材齢の D_{nssm} (m^2/s), n : 基準となる材齢 (day), t : 任意材齢 (day), m : 材齢経過に伴う塩化物イオン浸透抵抗性の向上を示すパラメータである。

非定常電気泳動試験と電気抵抗率の関係は、図 - 10 に示したとおり反比例の関係があるため、式(4)で表すことができる。

$$D_t = \frac{A}{\rho_t} \quad (4)$$

ここに、 A : 試験結果から得られる定数 ($\Omega m^3/s$), ρ_t : 任意材齢の電気抵抗率 (Ωm)

式(4)に式(3)を代入して ρ_t について解き、定数の部分を新たに置きなおすと、式(5)が得られる。

$$\rho_t = Bt^m \quad (5)$$

ここに、 B : 試験結果から得られる定数で、材齢初期段階における電気抵抗率を示すパラメータ ($\Omega m/day^m$)

そこで、全国各地の PCaPC 製造工場のコンクリートのデータを最小二乗法により式(5)にフィッティングし、近似曲線を求めた例を図 - 12 に示す。式(5)を用いることで、良好に近似できることが確認された。なお、パラメータ B が大きいほど材齢初期段階の電気抵抗率が大きいこと、パラメータ m が大きいほど長期的な電気抵抗率の発現が大きいことを意味する。

式(5)のパラメータに基づいて、電気抵抗率の変化状況を整理した結果を図 - 13 に示す。図中には、電気抵抗率

表 - 5 「塩化物イオン浸透抵抗性がきわめて高い」ことを確認するための条件

製造条件	電気抵抗率目標値 (Ωm)
配合 水結合材比 33 ~ 36%、早強セメントを高炉スラグ微粉末 6000 で 50% 置換。	材齢 14 日以内に 100 Ωm に到達すること。
養生 前養生時間の確保や適切な条件での蒸気養生の実施が前提。	ただし、式(5)のパラメータ B , m が図 - 13 の着色した領域に示した値であることが前提。

が材齢 14 日以内に 100 Ωm に到達し、さらに材齢 91 日以内に 200 Ωm に到達するための条件を満たす領域も示す。材齢 14 日は、工場から出荷する前に電気抵抗率試験を実施することを想定して設定し、材齢 91 日は、図 - 10 で示した結果との対応を確認するために設定した。

図 - 13 から、結合材の種類によって電気抵抗率に大きな差があり、SG650 シリーズの場合は、材齢 14 日以内に 100 Ωm かつ材齢 91 日以内に 200 Ωm に到達することを確認できた。なお、SG650 シリーズについては、工場 (C), (D), (E), (F), (I) では材齢 2 ~ 10 日以内、工場 (A), (B), (G), (H), (J) では材齢 24 ~ 70 日以内には、電気抵抗率 200 Ωm に到達していた。FA215 の場合は、1 件のみのデータではあるが、材齢 14 日以内に 100 Ωm かつ材齢 91 日以内に 200 Ωm には到達できない結果であった。

以上から、異なる材齢で複数回の電気抵抗率試験を実施し、パラメータ B と m を求めることで、表 - 3 に示した「塩化物イオン浸透抵抗性がきわめて高い」区分であることを、

工場から出荷前に確認することも可能と考えられる。その条件の案を表-5に示す。ただし、前養生時間の確保や通常の条件の範囲で蒸気養生を実施するなど、適切な製造条件であることが前提である。たとえば、前養生の時間を短縮すると微細ひび割れが発生⁶⁾するなど、品質の低下につながるおそれがあるため、留意が必要である。

5. おわりに

本報告では、混和材を用いたコンクリートを対象として、塩化物イオン浸透抵抗性を迅速に評価する指標を検討した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 室内で製作した供試体を用いた検討では、高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを用いた場合、浸せき365日以降に塩化物イオンの浸透が停滞する場合があることを確認した。また、見掛けの拡散係数 D_{ap} と電気抵抗率の結果から、電気抵抗率と実環境における塩化物イオンの浸透挙動の関係を整理した。
- (2) 塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} や電気抵抗率を用いて閾値を定めることで、塩化物イオンの浸透が停滞するような塩化物イオン浸透抵抗性が極めて高いコンクリートの分類方法を提案した。
- (3) 全国各地のPCaPC工場で作成した供試体を用いた非常電氣泳動試験および電気抵抗率試験の関係は、提案した塩化物イオン浸透抵抗性の分類とおおむね対応することを確認した。
- (4) 塩化物イオン浸透抵抗性を評価する指標として提案した電気抵抗率を推定する式を用いて、電気抵抗率の変化の状況を2つのパラメータで表して整理し、

工場から部材を出荷する前を想定した若材齢において、塩化物イオン浸透抵抗性がきわめて高いことを確認するための条件の案を示した。

なお、本研究は、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との共同研究「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」における実験結果の一部を報告したものである。

参考文献

- 1) 例えば、プレストレストコンクリート工学会：コンクリートの耐久性実証へのチャレンジ，第46回PC技術講習会，pp.1-22，2018
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 皆川浩，中村英佑，藤井隆史，綾野克紀：大気環境下における塩化物イオンの見掛けの拡散係数の設定に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.767-772，2019.7
- 5) 土木研究所：ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書（Ⅱ）-コンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討-，No.258，pp.20-25，2001.3
- 6) 大塚浩司，庄谷征美，小関憲一，阿波稔：コンクリートの蒸気養生過程で発生する表面微細ひび割れの性状に関する研究，土木学会論文集，No.520/V-28，pp.143-155，1995

【2021年3月31日受付】



新刊案内

繊維強化ポリマー（FRP）のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針

令和2年9月

コンクリート構造物の耐久性を向上させるため、腐食が生じない繊維強化ポリマー（FRP）を鉄筋あるいはPC鋼材の代替材料として適用することが求められてきています。本工学会では、「繊維強化ポリマーのコンクリート構造物への適用に関する委員会」（委員長：睦好宏史 埼玉大学）を2017年に設置し、指針の策定に取り組んでまいりました。本指針は、1996年に刊行された土木学会の指針（案）に基づいて、わが国や欧米の最新の研究成果および本工学会が2019年に刊行した「コンクリート構造技術規準-性能創造による設計・施工・保全-」を新たに取り入れたものです。実橋を対象とした試設計、LCC比較、品質規格試験および各繊維強化ポリマーの特性（炭素、アラミド、ガラス、バサルト）についても詳述されており、最新の技術指針となりますので、是非ご活用ください。

定 価 9,240 円(税込)／送料 500 円

会員特価 7,700 円(税込)／送料 500 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会