

論文 プレキャスト PC 部材に用いるコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性の変動とその評価に関する検討

角田 貴也*1・櫻庭 浩樹*2・俵 道和*3・古賀 裕久*4

要旨: プレキャスト PC 部材を製作する国内 2 工場において複数の打設日にコンクリート供試体を製作し、塩化物イオンの見掛けの拡散係数の変動について検討した。この条件では、供試体ごとの見掛けの拡散係数の変動係数は概ね 20%以下であった。また、この見掛けの拡散係数の変動や電気抵抗率試験の測定誤差を考慮した場合でも、混和材を用いることによる塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上効果を、電気抵抗率試験により明確に評価することが可能であることを示した。

キーワード: プレキャスト PC 部材, 見掛けの拡散係数, 塩水浸せき試験, 電気抵抗率試験

1. はじめに

塩害環境下にコンクリート構造物を建設する場合、用いるコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を適切に評価し、塩化物イオンの浸透程度を検討することは重要である。製造しようとするコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価する方法としては、暴露試験や塩水浸せき試験、あるいは電気化学的手法がある。しかし、低水結合材比で、さらに混和材を用いたコンクリートでは塩化物イオンの浸透が停滞することが長期暴露試験で確認されており¹⁾、このような高耐久なコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性の迅速な評価手法の確立が望まれる。

著者らは、このような背景から、塩化物イオン浸透に対する抵抗性を迅速に評価する手法として、電気抵抗率試験の活用を提案してきた。これまでに、電気抵抗率による塩化物イオン浸透に対する抵抗性の分類²⁾、材料や配合が異なるコンクリートへの電気抵抗率試験の適用性³⁾等を検討してきた。また、これらのデータから、プレキャスト PC 部材の製造過程において、製造予定のコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を電気抵抗率試験により評価して配合を選定したり、製造したコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を品質管理時に確認する手法を提案した⁴⁾。

電気抵抗率により塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価する場合には、コンクリートの品質そのものの変動やこれらを実験の誤差を適切に考慮する必要があると考えられる。これまでに、著者らは、電気抵抗率について、コンクリートの品質による変動や測定誤差の検討をしてきた⁵⁾。しかし、見掛けの拡散係数については、変動程度の把握が必ずしも十分ではなかった。

そこで、国内 2 工場において、複数の打設日にコンクリート供試体を製作し、塩水浸せき試験および電気抵抗率試験を実施し、見掛けの拡散係数の変動やこれを考慮した上での電気抵抗率による塩化物イオン浸透に対する抵抗性評価の妥当性について検討した。また、見掛けの拡散係数の変動程度が腐食発生限界濃度に到達する年数に与える影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 コンクリートの配合および供試体製作方法

供試体を製作した 2 工場におけるコンクリートの配合およびフレッシュ性状を表-1 に示す。結合材は早強ポルトランドセメント単味 (H シリーズ) および早強ポルトランドセメントの重量比 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換したもの (SG650 シリーズ) の 2 種類とした。

図-1 に本実験のフローを示す。試験項目は電気抵抗率試験、塩水浸せき試験であり、項目ごとに $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を 1 日あたり 3 体製作した。一般には 1 水準あたり多くとも 3 体程度を用いて見掛けの拡散係数を確認するのに対し、本検討では最大で 8 体を用いて、材料や工場の違いによるその変動程度の評価を試みたものである。

供試体は、両工場連続した 3 日間の打設日で製作した。電気抵抗率試験に用いる供試体の養生は、製品と同一の蒸気養生 (A 工場: 最高温度 50°C, 最高温度保持時間 5 時間, B 工場: 最高温度 50°C, 最高温度保持時間 3 時間) ののち、材齢 1 日で脱型し、所定の材齢まで水温 20°C の水中養生とした。塩水浸せき試験に用いる供試体の養生条件は、製品と同一条件の蒸気養生ののち、材齢 1 日で脱型し、室温 20°C の試験室内で気中養生とした。

*1 (国研) 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 修(工) (正会員)

*2 (国研) 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 博(工) (正会員)

*3 (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 修(工) (正会員)

*4 (国研) 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 博(工) (正会員)

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

工場名	シリーズ名	水結 合材 比 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)		空気量(%)			スランブ(cm)					
				W	B=HPC+SG6		目標値	実測値		目標値	実測値			
					HPC	SG6		1日目	2日目		3日目	1日目	2日目	3日目
A工場	Hシリーズ	38.0	42.0	153	403(100%)	—	4.5 ±1.5	3.1	3.6	3.0	12.0±2.5	9.5	10.5	10.5
	SG650シリーズ	33.0	42.0	145	220(50%)	220(50%)		3.3	3.0	3.3		14.5	10.0	9.5
B工場	Hシリーズ	36.0	42.0	155	431(100%)	—	4.5 ±1.5	4.5	4.0	3.9	15.0±2.5	12.5	14.0	12.5
	SG650シリーズ	33.3	39.5	150	225(50%)	225(50%)		4.2	3.6	4.0		16.5	16.0	15.5

※HPC: 早強ポルトランドセメント(A工場: 密度 3.14g/cm³, 比表面積 4470cm²/g, B工場: 密度 3.14g/cm³, 比表面積 4350cm²/g), SG6: 高炉スラグ微粉末 6000(A工場: 密度 2.91g/cm³, 比表面積 6460cm²/g, B工場: 密度 2.91g/cm³, 比表面積 6010cm²/g), 細骨材 A工場: 表乾密度 2.62g/cm³, 吸水率 1.07%, B工場: 表乾密度 2.68g/cm³, 吸水率 1.06%, 粗骨材 A工場: 表乾密度 2.65g/cm³, 吸水率 0.41%, B工場: 表乾密度 2.72g/cm³, 吸水率 0.52%
 ※化学混和剤: A工場, B工場ともに AE 剤と高性能 AE 減水剤を使用
 ※設計基準強度は両工場ともに 50N/mm²とした

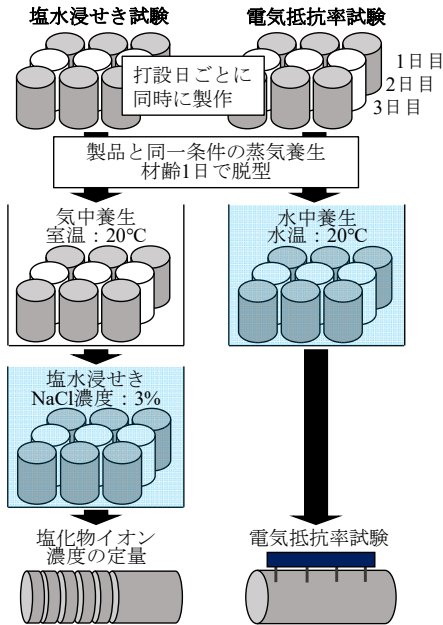


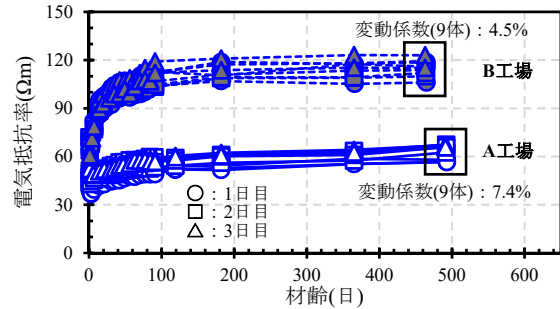
図-1 本実験のフロー

2.2 電気抵抗率試験の方法

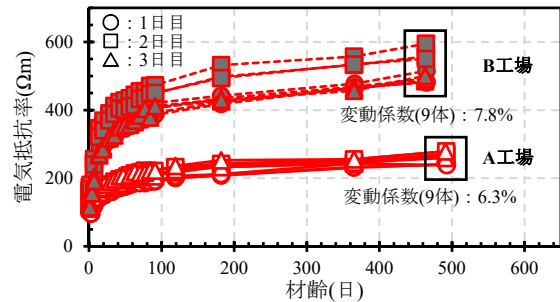
電気抵抗率試験は、JSCE-G 581 B 法に準拠し、4プローブ法用の測定装置（電極間隔 50mm, 周波数 40Hz, 測定可能範囲 10~10000Ωm）を用いて行った。電極を供試体側面に押し当て、互いに直交する 4 点で測定を行った。電気抵抗率は測定値を JSCE-G 581 附属書 1 に記載されているセル定数で換算後の 4 点の値の平均値とした。

2.3 塩水浸せき試験の方法

塩水浸せき試験に用いる供試体の加工は JSCE-G 572 に準拠して行い、濃度 3%の塩化ナトリウム溶液中に浸せきさせた。浸せき開始時の材齢は A 工場で作成した供試体は 68~70 日、B 工場で作成した供試体は 40~42 日であった。浸せき期間は 365 日とした。なお、塩化物イオンの浸透状況を確認するため、各工場、配合で 1 日目の打設日で製作した供試体 1 体は浸せき期間を 90 日とした。浸せき期間が経過したのち、浸せき面から深さ 5mm ごとに試料を採取し、JIS A 1154 に準拠した電位差滴定法により全塩化物イオン濃度を定量した。なお、試料の採取および電位差滴定法による定量は全ての供試体において同一の技術者が実施した。



(a)H シリーズ



(b)SG650 シリーズ

図-2 電気抵抗率の経時変化

3. 実験結果および考察

3.1 電気抵抗率試験の結果

図-2 に材齢経過に伴う電気抵抗率の変化を示す。図中には、同一条件の供試体 1 体ごとの値を示した。なお、試験機器の不具合により浸せき終了と同一日での測定ができなかったため、浸せき終了から 57 日後の電気抵抗率で評価した。図から、同種の結合材を用いた場合でも製作工場により電気抵抗率の発現に差が生じることが確認された。この要因は、工場ごとに用いた材料の違いなどの影響⁹⁾が挙げられるが、その影響程度を明確にするためには配合を要因ごとに変化させた実験等が必要と考えられる。また、同一工場、同一配合の条件でも電気抵抗率の発現には日間変動が生じることが確認された。

著者らは既往の研究⁹⁾で、同一条件で作成した供試体の品質の変動による電気抵抗率の変動係数は概ね 10%以内であることを報告している。今回の検討で、3 日間の打設日で製作された供試体 9 体の電気抵抗率の変動係数は 10%以下であることが確認された。

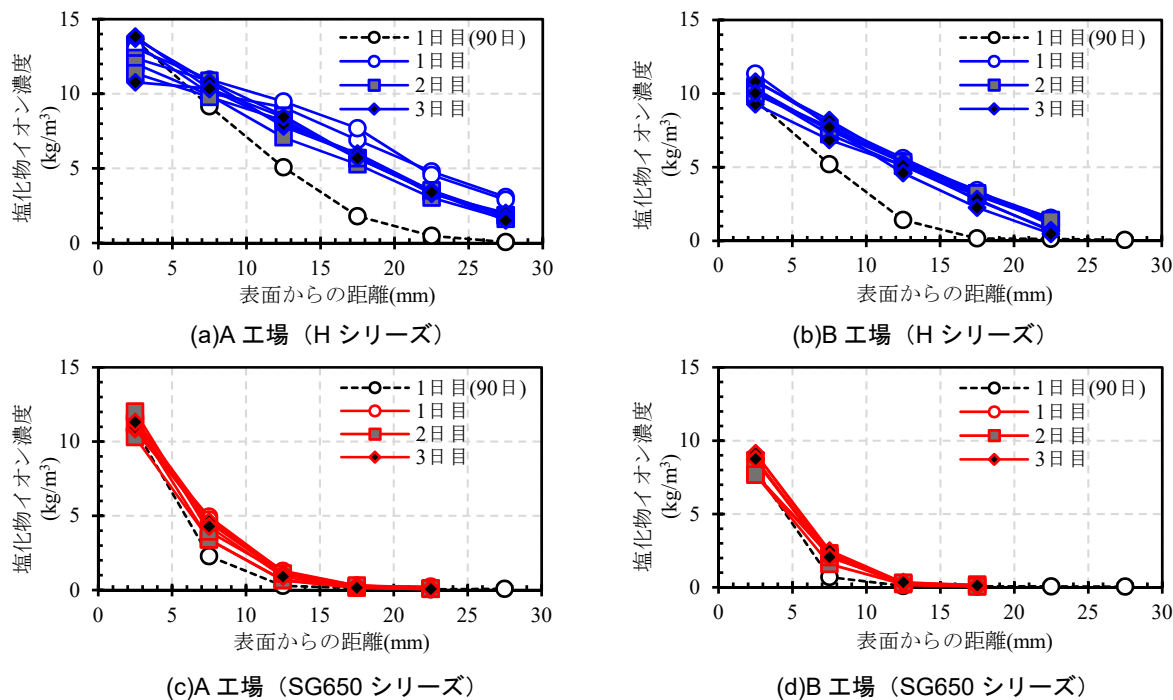


図-3 塩化物イオン濃度分布

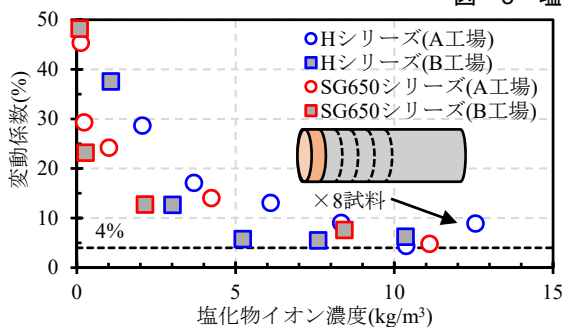


図-4 塩化物イオン濃度の変動

3.2 塩水浸せき試験の結果

(1) 塩化物イオン濃度分布

図-3 に、各工場で作製したコンクリート供試体の、深さ方向の全塩化物イオン濃度の分布を示す。図中の実線は、浸せき期間が 365 日時点の全塩化物イオン濃度の分布を供試体 1 本ごと示している。なお、参考のため、浸せき期間を 90 日にとどめた供試体の全塩化物イオン濃度の分布を点線で併記した。

図から、SG650 シリーズでは H シリーズに比べ塩化物イオンの浸透深さが小さく、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が高いことが明白である。また、同一の結合材の条件で工場の違いに着目すると、A 工場に比べ B 工場の方が塩化物イオンの浸透深さが小さくなった。したがって、同種の結合材でも用いる材料の違いが塩化物イオンの浸透程度に影響を与えると考えられるが、3.1 節での考察と同様に、影響程度を明確にするためには配合を要因ごとに変化させた実験等が必要と考えられる。また、同一工場、同一配合の条件でも、打設日の違いにより同一深さの塩化物イオン濃度に差が生じていることから、

塩化物イオン濃度の分布傾向には日間変動が生じることが確認された。

(2) 塩化物イオン濃度分布の変動に関する考察

図-4 に供試体表面からの距離ごとの塩化物イオン濃度の平均値と変動係数の関係を示す。図中のプロットは、3 日間で製作した同一工場、同一配合の供試体 8 体（浸せき 365 日時点）の同一深さにおける塩化物イオン濃度の変動係数を示している。既往の研究では、コンクリート中の塩化物イオン濃度を均一に調整した試料について電位差滴定法により塩化物イオン濃度を測定した場合には、その変動係数は概ね 4%程度となることが報告されている⁷⁾。これに対し、3 日間で製作した供試体 8 体の塩化物イオン濃度の変動係数は同一条件の箇所でも 4%より明確に大きく、試料中に含まれる塩化物イオンが少ない箇所ほど平均値に対して標準偏差が相対的に大きくなるため、変動係数は大きくなる傾向が確認された。

(3) 見掛けの拡散係数

図-5 に、各工場で作製したコンクリート供試体の打設日ごとの見掛けの拡散係数を示す。見掛けの拡散係数の算出は、図-3 に示した各供試体の塩化物イオン濃度分布を最小二乗法で式(1)にフィッティングして求めた。なお、この方法では、見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度が同時に算出される。

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \times x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (1)$$

ここで、 $C(x, t)$: 浸せき期間 t 年における表面からの距離 x における塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 erf : 誤差関数、 x : コンクリート表面からの距離(mm)、 t : 浸せき期間(年)、

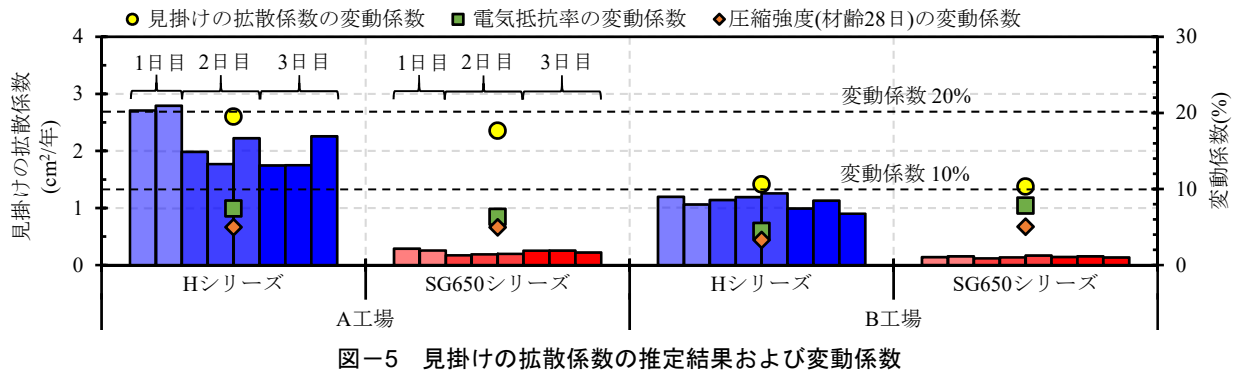
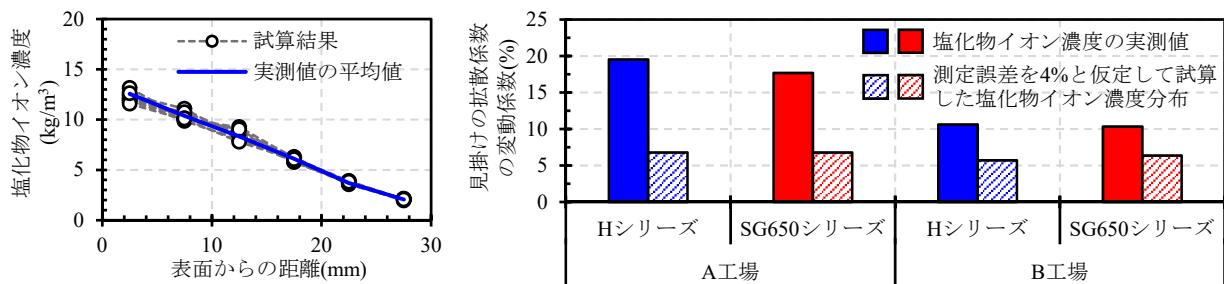


図-5 見掛けの拡散係数の推定結果および変動係数



(a)塩化物イオン濃度の試算例 (A工場 Hシリーズ)

(b)見掛けの拡散係数の変動係数

図-6 見掛けの拡散係数の変動に関する考察

C_0 : 表面塩化物イオン濃度(kg/m³), D_{ap} : 見掛けの拡散係数(cm²/年), C_i : 初期含有塩化物イオン濃度(kg/m³)である。初期含有塩化物イオン濃度 C_i は、浸せき期間 90 日における表面からの距離が 27.5mm の塩化物イオン濃度を用いた。図中の見掛けの拡散係数は打設日ごとの供試体 3 体 (1 日目は 2 体) の値を示している。見掛けの拡散係数の変動係数は、同一工場、同一配合の条件で浸せき期間が 365 日経過した時点 (8 体) の見掛けの拡散係数の平均値および標準偏差を用いて算出した。また、図-5 には、参考として浸せき終了後の電気抵抗率の変動係数 (3.1 節参照) および 3 日間で製作した供試体 9 体の材齢 28 日の圧縮強度の変動係数を併記した。

見掛けの拡散係数は同種の結合材を用いた場合でも、製作工場、打設日により差が生じた。見掛けの拡散係数の変動係数の大小は結合材の種類によらず製作工場によって異なる傾向であったが、両工場とも 20%以内であった。また、同一工場の条件では、結合材の種類によらず変動係数は概ね同程度であった。電気抵抗率の変動係数と比較すると、いずれの工場、配合の条件でも見掛けの拡散係数の変動係数は電気抵抗率の変動係数よりも大きくなった。既往の研究⁵⁾では、電気抵抗率と圧縮強度の変動係数はほぼ同程度であることが示されており、材齢が経過した場合の電気抵抗率についても、その変動係数は圧縮強度の変動係数と概ね同程度であった。

(4) 見掛けの拡散係数の変動に関する考察

見掛けの拡散係数には図-5 に示すように変動係数で 20%程度以下の変動が見られた。この理由として、製造

したコンクリートそのものの品質変動、浸せきする供試体の製作等に起因する影響、塩化物イオン濃度の測定誤差などが想定される。これらの影響を明確に分離することは困難であるが、塩化物イオン濃度の測定誤差については既往の知見があることから、その影響程度について考察する。

塩化物イオン濃度の測定誤差を変動係数で 4%⁶⁾と仮定し、同一工場、同一配合の条件で算出した供試体表面からの距離ごとの塩化物イオン濃度の平均値から標準偏差を算出し、正規分布に従うランダムな塩化物イオン濃度を作成した。このデータは、工場、配合ごとに 8 パターン作成した。得られた塩化物イオン濃度分布の例を図-6(a)に示す。図中には、A 工場の H シリーズの 3 日間で製作した供試体で得られた表面からの深さごとの塩化物イオン濃度の平均値から試算した結果を 8 パターン全て示している。試算で得られた分布から、工場、配合ごとに 3.2(3) で示す方法で見掛けの拡散係数を推定した。

このように塩化物イオン濃度の測定誤差のみを考慮した場合の見掛けの拡散係数の変動係数を図-6(b)に示す。図中の凡例は、見掛けの拡散係数の推定に用いたデータを示している。図から、見掛けの拡散係数の変動係数は工場、配合によらず、塩化物イオン濃度の実測値の分布から推定した場合の方が大きかった。したがって、見掛けの拡散係数の変動は塩化物イオン濃度の測定誤差よりも、供試体個別の品質の影響が大きいと考えられる。

(5) 電気抵抗率と見掛けの拡散係数の関係

図-7 に電気抵抗率と見掛けの拡散係数の関係を示す。

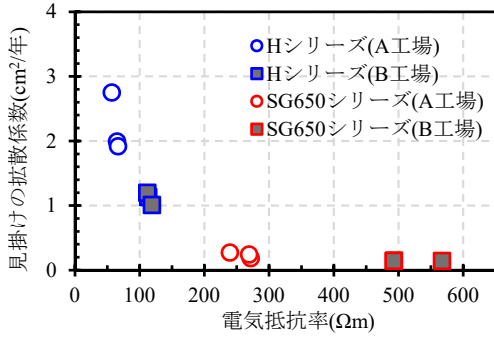


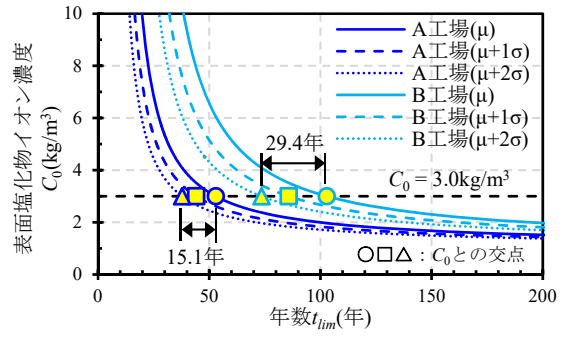
図-7 見掛けの拡散係数と電気抵抗率の関係

電気抵抗率および見掛けの拡散係数は、打設日ごとの供試体 3 体の平均値を示している（見掛けの拡散係数は 1 日目のみ 2 体）。既往の研究⁶⁾では、電気抵抗率と塩水浸せき試験で得られる見掛けの拡散係数は反比例の関係であることが示されている。図から、打設日が異なる場合でも既往の研究と同様に概ね反比例の関係となることが確認された。著者らは、材料や配合が異なるコンクリートを用いたり、複数の PC 工場において供試体を製作したりして電気抵抗率と拡散係数の関係を検証し、混和材を用いることによる塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上効果を電気抵抗率で分類できると整理している⁴⁾。図-7 から、品質の差による変動を考慮した場合でも電気抵抗率を指標とすることで H シリーズと SG650 シリーズで塩化物イオン浸透に対する抵抗性を明確に分類できることを確認した。ただし、品質の差による電気抵抗率や見掛けの拡散係数の変動は避けられないことから、これらの変動を考慮して配合を選定するとよい。

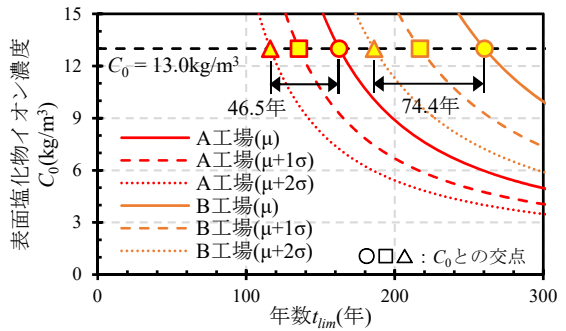
4. 見掛けの拡散係数の変動が腐食発生限界濃度に到達する年数に与える影響

上記より、電気抵抗率および見掛けの拡散係数の変動を考慮した場合でも、コンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を分類できることを示した。ここでは、電気抵抗率により分類されたコンクリートの品質変動が塩化物イオン浸透に与える影響について考察する。ここでは、式(1)の t を深さ x における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に到達する年数（以下、年数 t_{lim} ）として整理した式(2)⁸⁾から年数 t_{lim} と表面塩化物イオン濃度の関係を試算した。耐久設計では、表面塩化物イオン濃度、腐食発生限界濃度を安全側に設定したうえで、見掛けの拡散係数を変化させて耐用年数について検討されるものとする。本試算は耐久設計を想定して見掛けの拡散係数の変動が耐用年数に及ぼす影響を検討したものである。

$$t_{lim} = \left\{ \frac{0.1 \times x}{\Phi^{-1} \left(1 - \frac{C'_{lim}}{2C_0} \right)} \right\}^2 \cdot \frac{1}{2D_{ap}} \quad (2)$$



(a)H シリーズ



(b)SG650 シリーズ

図-8 見掛けの拡散係数の変動が年数 t_{lim} の推定結果に与える影響（変動係数を 20%と仮定）

ここで、 t_{lim} ：深さ x mm で塩化物イオン濃度が C'_{lim} に到達する際の年数(年)、 Φ^{-1} ：正規分布の累積分布関数の逆関数、 C'_{lim} ：深さ x mm における塩化物イオン濃度の閾値 (kg/m^3)である。 C'_{lim} は、腐食発生限界塩化物イオン濃度を $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 、初期含有塩化物イオン濃度を $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ と仮定し、 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ と設定した。 x は道路橋示方書Ⅲ編に示される塩害の影響が最も激しい地域に対応するかぶり厚さ (70mm) とした。見掛けの拡散係数 D_{ap} は、その変動係数を 20%と仮定し、各工場、配合の平均値と、変動を考慮した平均値+1 σ および平均値+2 σ の値を用いた。塩水浸せき試験で得られる見掛けの拡散係数は、コンクリートの含水状態等の影響により大気中環境下で得られる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。既往の研究⁹⁾では、暴露試験と塩水浸せき試験で得られる見掛けの拡散係数を比較し、水の移流を受けにくい条件では塩水浸せき試験で得られる見掛けの拡散係数に 0.2 程度を乗した値が大気中環境下における見掛けの拡散係数とみなせるとしている。ここでは、上述の見掛けの拡散係数 D_{ap} に 0.2 を乗じて大気中環境下における見掛けの拡散係数に換算したうえで試算に用いた。

図-8 に結合材種類ごとの試算結果を示す。同一の表面塩化物イオン濃度の場合の年数 t_{lim} を比較すると、H シリーズでは、例えばコンクリート標準示方書 [設計編]¹⁰⁾ (以下、示方書) に示される飛来塩分が多い地域の海岸からの距離が 0.25km の表面塩化物イオン濃度

$C_0=3.0\text{kg/m}^3$ とした場合には、見掛けの拡散係数の平均値と平均値+ 2σ とした場合で年数 t_{lim} には 15.1~29.4 年程度の差が生じることが確認された。SG650 シリーズでは、例えば示方書に示される飛沫帯の表面塩化物イオン濃度 $C_0=13.0\text{kg/m}^3$ とした場合には見掛けの拡散係数の平均値と平均値+ 2σ とした場合で年数 t_{lim} には 46.5~74.4 年程度の差が生じることが確認された。

式(2)から、深さ x 、表面塩化物イオン濃度 C_0 および塩化物イオン濃度の閾値 C_{lim} を一定として整理すると、

$$t_{lim} = A \cdot \frac{1}{D_{ap}} \quad (3)$$

を得る。ここで、定数部分を A と置いた。式(3)から、見掛けの拡散係数の変動係数を 20% と仮定すると、例えば見掛けの拡散係数を平均値+ 2σ (平均値+40%) とした場合の年数 t_{lim} は平均値とした場合の年数 t_{lim} に対して約 28.6% 短くなる。したがって、設計において塩化物イオンの浸透程度を検討する場合には見掛けの拡散係数の変動の程度を把握しておくことが重要であると考えられる。

ただし、電気抵抗率で混和材の使用有無による塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上効果を分類した場合、見掛けの拡散係数の変動を考慮した年数 t_{lim} においても、SG650 シリーズでは H シリーズに比べ塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上していることは明白であった。

5. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- 1) 塩水浸せき試験の結果から、同一工場、同一配合の条件であっても、コンクリート中への塩化物イオンの浸透程度は異なり、特に塩化物イオン濃度が低い場合には、その変動係数が大きくなる傾向が確認された。
- 2) 複数の打設日で製作されたコンクリートの見掛けの拡散係数の供試体個別の品質による変動は 20% 程度よりも小さいものであった。
- 3) 電気抵抗率および見掛けの拡散係数の変動を考慮した場合でも、電気抵抗率を指標として早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を明確に分類することが可能であることを示した。
- 4) 見掛けの拡散係数の変動が腐食発生限界濃度に到達する年数に与える影響は大きく、耐久設計において塩化物イオンの浸透程度を検討するうえで見掛けの拡散係数の変動を適切に把握しておくことが重要である。

本稿は、(国研) 土木研究所と (一社) 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まとめたものである。

参考文献

- 1) 栗原勇樹, 中村英佑, 鈴木雅博, 古賀裕久: 混和材を用いたコンクリートの実環境下での強度と耐久性に関する検討, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.25, pp.405-408, 2016
- 2) 櫻庭浩樹, 小田部貴憲, 鈴木雅博, 古賀裕久: 混和材を用いた高耐久なコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性評価, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.29, pp.409-414, 2020
- 3) 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
- 4) 土木研究所, プレストレスト・コンクリート建設業協会: 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関する共同研究報告書—プレキャスト PC 部材の高耐久化に向けた混和材を用いたコンクリートの設計・製造マニュアル (案) —, 共同研究報告書第 559 号, 2022
- 5) 角田貴也, 櫻庭浩樹, 俵道和, 古賀裕久: PCaPC 部材の塩化物イオン浸透抵抗性の迅速評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.502-507, 2022
- 6) 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
- 7) 土木研究所: コンクリート中の塩化物イオン量測定 of 誤差に関する検討, 土木研究所資料第 3987 号, 2005
- 8) 山路徹, 審良善和, 小牟禮建一, Excel を用いたコンクリート構造物の塩害劣化予測手法, セメント・コンクリート, No.773, pp.22-28, 2011
- 9) 皆川浩, 中村英佑, 藤井隆史, 綾野克紀: 大気中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, 2019
- 10) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.163-164, 2017