

# 論文 コンクリートの塩化物イオン拡散係数算定式の導出と特性値の設定に関する検討

井口 重信\*1・高橋 佑弥\*2・岸 利治\*3

**要旨**：土木学会のコンクリート標準示方書〔設計編〕では、コンクリートの塩化物イオン拡散係数について、実環境での暴露試験の結果、浸せき法による試験結果、電気泳動法による試験結果などから得られたデータの回帰式の中央値から設定された導出式が示されている。これらの導出式は、元の試験データのばらつきや各試験方法相互の中央値の差異などは明示されておらず、得られる設計値の信頼性を考慮ができていなかった。そこで、各試験データのばらつきを考慮する安全係数を導入することで、塩化物イオン拡散係数導出式の精度の考慮と、各試験方法相互の差異を補完可能な設計方法について検討した。

**キーワード**：塩化物イオン、拡散係数、浸せき法、電気泳動法

## 1. はじめに

コンクリート中の塩化物イオン拡散係数の特性値については、2007年版コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>1)</sup>（以下、2007年版コン示）では実環境暴露データを回帰した式を、2017年版コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>2)</sup>（以下、2017年版コン示）では電気泳動法の実験結果を回帰した式をもとにした見掛けの拡散係数の導出式が例示されている。これらの導出式は、いずれもデータの中央値を回帰して定式化されており、拡散係数の予測精度のばらつきについては考慮されていない。そこで、拡散係数の特性値の設定に際してばらつきを考慮した安全係数 $\gamma_k$ を導入することで、予測精度を考慮して評価が可能な方法を検討した。また、拡散係数の特性値の設定は、実暴露環境下でのデータを基本とすることとし、拡散係数が予測精度のばらつきにより上回る確率を考慮できる方法とすることとした。さらに、2017年版コン示では、浸せき法や電気泳動法といった各予測手法で得られた予測値と実環境暴露による予測値の間で、参照したデータの中央値の差異も考慮されていないことから、各予測手法による予測値の差異についても安全係数 $\gamma_k$ 等で考慮する方法を検討したので、以下にその概要を記す。

## 2. コンクリートの塩化物イオン拡散係数導出式

### 2.1 普通ポルトランドセメントを用いる場合

コンクリート中への塩化物イオンの侵入現象は、その濃度勾配に依存する拡散や水分移動に起因する移流がセメント水和生成物やセメント成分への固定あるいは吸着等を伴いながら起きるものと考えられている<sup>3)</sup>。しかし、この現象を精緻に設計体系に導入することは困難であることから、土木学会のコンクリート標準示方書では設計

の簡便性を考慮してFickの拡散則を用い、水セメント比やセメント種類に応じた見掛けの拡散係数を設計耐用年数に拠らず一定値として取扱われている。一方で、実現象をFickの拡散則で近似した場合、コンクリートの塩化物イオン拡散係数は時間の経過とともに減少することが知られている<sup>4)</sup>。そのため設計耐用年数が長い構造物を設計しようとする場合に、フライアッシュなどの混和材添加による遮塩性能などを加味出来ず、合理的な設計が難しいことなどが課題として挙げられていた<sup>5)</sup>。そこで、筆者らは、式(1)に示すような設計耐用年数に応じた見掛けの拡散係数を用いることで合理的な設計が可能になる方法を提案している。設計耐用年数に応じて拡散係数を漸減させる方法はfibのモデルコード<sup>6)</sup>にも記載があるが、参照見掛けの拡散係数 $D_r$ や設計耐用年数感度パラメータ $k_D$ に相当する数値については、浸せき法や電気泳動法などの試験結果を実施し得られた数値を用いることとされており、水セメント比や混和材比率に応じた簡便な導出式までは示されていない。

$$D_p(t) = D_r \cdot t^{-k_D} \quad (1)$$

ここに、 $D_p(t)$ ：コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の予測値 (cm<sup>2</sup>/年)

$D_r$ ：参照見掛けの拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)で、設計耐用年数を1年とした時の値

$k_D$ ：設計耐用年数感度パラメータ

$t$ ：塩化物イオンの侵入に対する設計耐用年数(年)

なお、設計耐用年数に応じた拡散係数の値を用いて鋼材位置の塩化物イオン濃度の設計応答値を計算することになるため、設計耐用期間中に拡散係数が増加することを考慮するのではなく、あくまで設計耐用期間中は拡散係数一定である仮定のもと、設計耐用年数に応じて異なる

\*1 東日本旅客鉄道株式会社 東京建設プロジェクトマネジメントオフィス 修士(工学) (正会員)

\*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 東京大学 生産技術研究所 教授 博士(工学) (正会員)

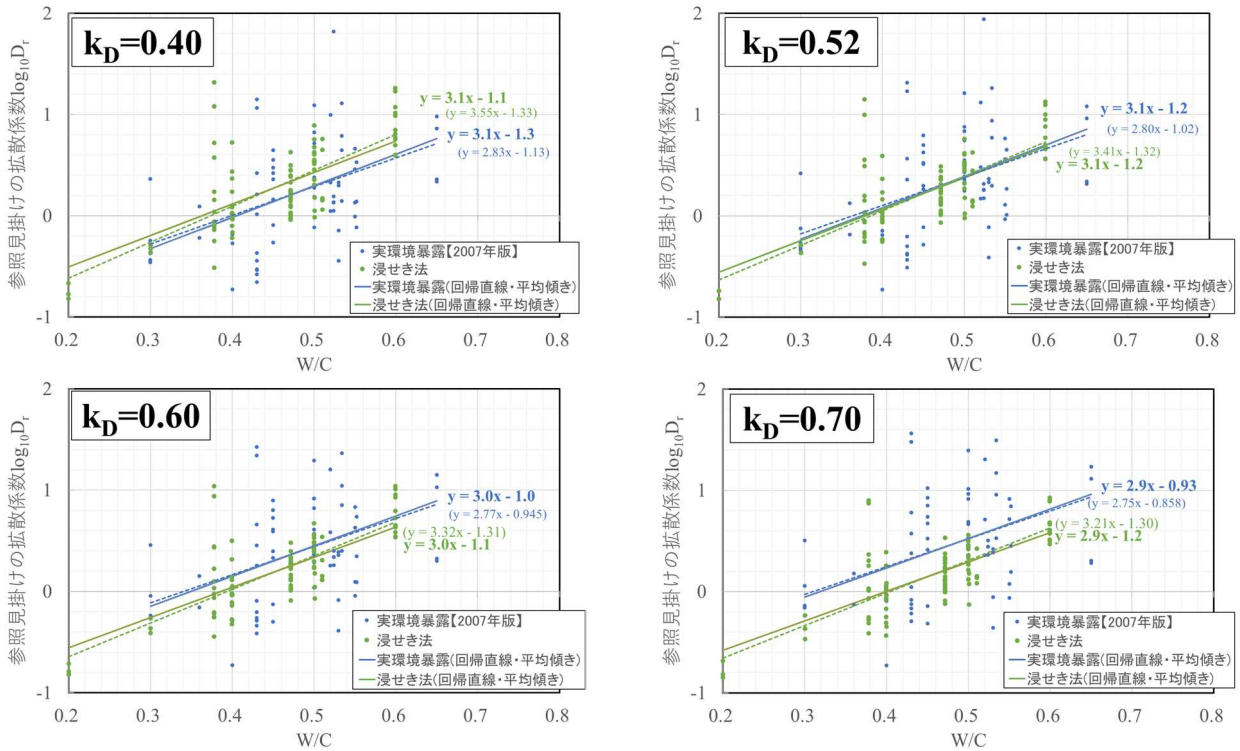


図-1 異なる  $k_D$  の値での  $D_r$ -W/C 関係の比較

る拡散係数の値を用いるものである。

拡散係数の経時変化を式(1)で予測する場合、設計耐用年数感度パラメータ  $k_D$  の設定が重要になる。そこで、実環境暴露データを出典としている 2007 年版コン示式の元データと、筆者らが過去に行った実験結果<sup>3)</sup>や既往の研究結果<sup>3)</sup>から収集した浸せき法による試験結果データのうち、普通ポルトランドセメント（以下、OPC）を用いたケースの拡散係数データを用いて、実環境暴露の挙動を適切に表現可能な  $k_D$  の値を以下のように求めた。

図-1 に、各拡散係数のデータの浸せき年数（実環境暴露データの場合には経年） $t$  をもとに  $k_D$  の値を 0.4, 0.52, 0.6, 0.7 とした場合の、参照見掛けの拡散係数  $D_r$  と各試料の W/C との関係を示す。図中の青色が実環境暴露のデータ、緑色が浸せき法によるデータである。また、点線が各データを切片と傾きの両者を変数として近似した場合の回帰式、実線が得られた傾き値を両者の平均値として固定し、切片のみを変数として近似した場合の回帰式である。図より、 $k_D$  が 0.52 の場合に実環境暴露データと浸せきデータの回帰式が最も近くなることが分かる。これより、2007 年版コン示の掲載式の導出に用いられた実環境暴露データにおける設計耐用年数感度パラメータ  $k_D$  は 0.52 であると推定される。実環境暴露データと浸せきデータの両者を用いて、回帰式を算出すると、式(2)のようになる。これが、OPC の場合の参照見掛けの拡散係数  $D_r$  の算出式となる。なお、回帰式の導出にあたっては式の適用範囲外のデータについても用いて回帰し導出した。後述する式(7)、(8)の導出でも同様である。

$$\log_{10} D_r = 3.4(W/C) - 1.3, \quad k_D = 0.52$$

$$(0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (2)$$

ここに、W/C：水セメント比

## 2.2 高炉セメントB種相当ならびにフライアッシュセメントB種相当を使用する場合

高炉スラグ微粉末（以下、BFS）やフライアッシュ（以下、FA）などの混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン拡散係数については、これらの実環境暴露データが少ないことから、セメント中の混和材比率などをパラメータに実施された浸せき法による試験結果から混和材による影響を導出し、この影響を式(2)に混和材比率に影響する項を付加することで、拡散係数の導出式を求めることとした。文献3)、5)、7)で示されている、複数時期での浸せき期間で見掛けの拡散係数が測定されている試験結果を用いて求めた  $k_D$  と  $D_r$  それぞれについて、セメント中の混和材比率を変数として整理し、OPC に比べてどの程度それぞれの値が異なるのかを求めた。 $k_D$ 、 $D_r$  について整理した図をそれぞれ図-2、図-3 に示す。いずれも混和材の添加により  $k_D$  の値は増加、 $D_r$  については減少する傾向がある。図より、BFS ならびに FA の混和材比率が  $k_D$ 、 $D_r$  に与える影響について、式(3)、(4)および式(5)、(6)のように導出される。

・高炉スラグ微粉末（BFS）を使用する場合

$$k_D = 0.27 \times \frac{BFS}{OPC+BFS} + 0.52 \quad (k_D \leq 1.0) \quad (3)$$

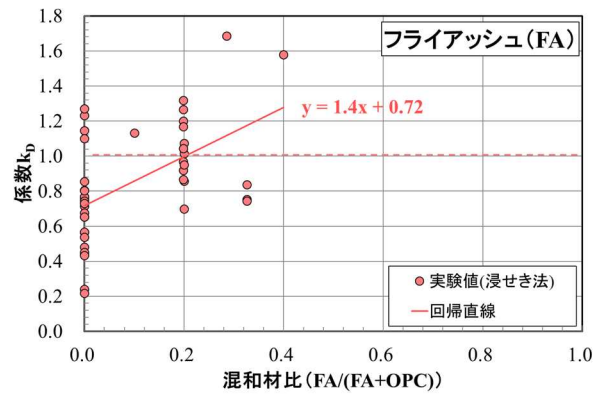
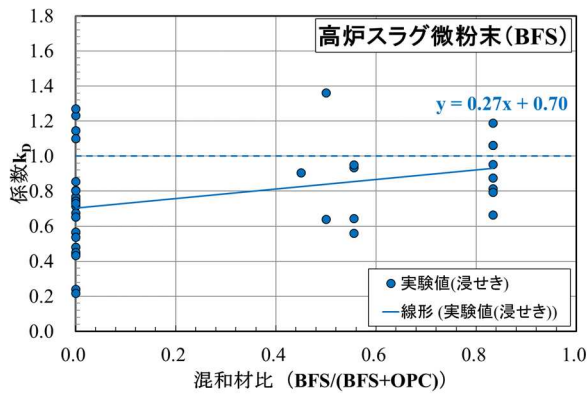


図-2  $k_D$  に与える混和材比率の影響

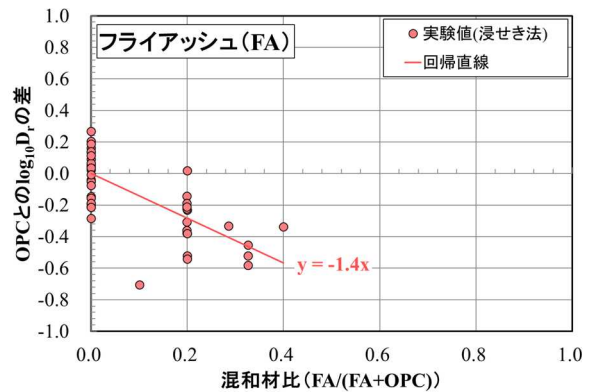
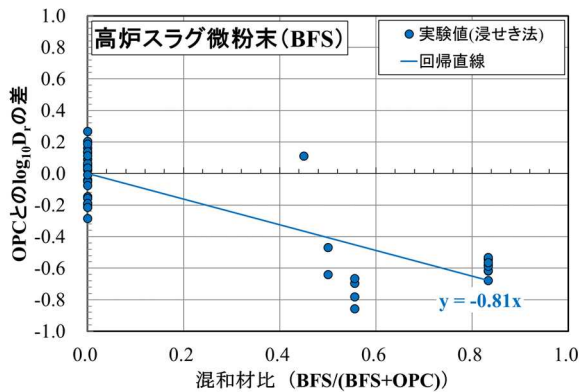


図-3  $D_r$  に与える混和材比率の影響

$$\log_{10} D_r = -0.81 \times \frac{BFS}{OPC+BFS} + 3.4(W/C) - 1.3 \quad (4)$$

ここに、 $\frac{BFS}{OPC+BFS}$  : 高炉スラグ微粉末の混和材比率

・フライアッシュ (FA) を使用する場合

$$k_D = 1.40 \times \frac{FA}{OPC+FA} + 0.52 \quad (k_D \leq 1.0) \quad (5)$$

$$\log_{10} D_r = -1.42 \times \frac{FA}{OPC+FA} + 3.4(W/C) - 1.3 \quad (6)$$

ここに、 $\frac{FA}{OPC+FA}$  : フライアッシュの混和材比率

以上の関係式を導出した後、高炉セメント B 種相当については混和材比率を 45%、フライアッシュセメント B 種相当については混和材 15%として、式(7)、(8)のように参照見掛けの拡散係数  $D_r$  の導出式を得る。

・高炉セメント B 種相当を使用する場合

$$\log_{10} D_r = 3.4(W/C) - 1.7, \quad k_D = 0.64 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (7)$$

・フライアッシュセメント B 種相当を使用する場合

$$\log_{10} D_r = 3.4(W/C) - 1.5, \quad k_D = 0.73 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (8)$$

### 3. 特性値の設定に関する安全係数 $\gamma_k$ の検討

拡散係数の特性値については、塩害環境下での構造安

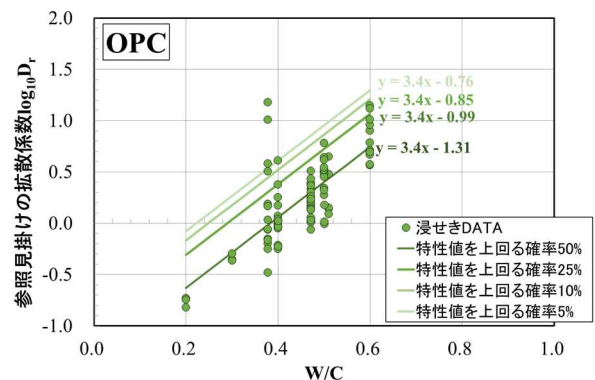


図-4 異なる超過確率条件下の  $D_r$  予測曲線

全性を決定する重要な事項であることから、式(9)に示すように、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の予測値  $D_p$  に安全係数  $\gamma_k$  を乗じて求めることで、予測値の精度を考慮できる方法を検討した。

$$D_k = \gamma_k \cdot \gamma_p \cdot D_p \quad (9)$$

ここに、 $D_k$  : コンクリートの塩化物イオン拡散係数の特性値 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )

$\gamma_k$  : 特性値の設定に関する安全係数

$\gamma_p$  : 材料物性の予測値の精度を考慮する安全係数

特性値の設定に関する安全係数  $\gamma_k$  の設定にあたって、OPC の場合で特性値を上回る確率を 5%、10%、25%、50%とした場合の回帰式を図-4 に示す。特性値を上回る確率が 50%以外の回帰直線の算出にあたっては、50%

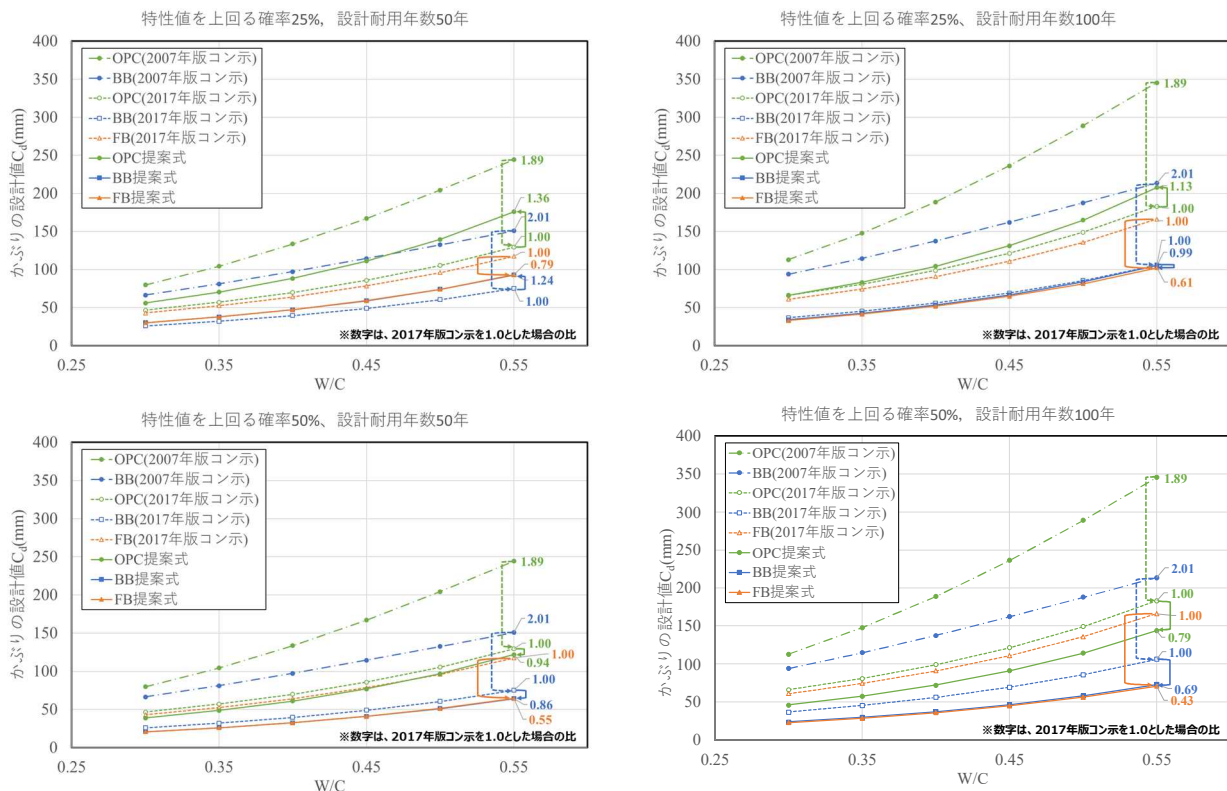


図-5 特性値を上回る確率を25%、50%とした場合の必要かぶり量の試算値の比較

で線形に回帰した直線の傾き値を用いて切片の値のみを変数として近似し算出している。特性値を上回る確率を25%とした場合、特性値を上回る確率が50%で回帰した場合の予測式の切片の差が0.32(=1.31-0.99)であった。10の0.32乗は約2.1であることから、特性値を上回る確率を25%とする場合には、特性値の設定に関する安全係数 $\gamma$ を2.1とすれば良いことになる。

特性値を上回る確率を25%および50%にした場合のかぶりの試算値を図-5に示す。かぶりの試算にあたっての条件は、後述する5.の条件と同一である。また、図には、2007年版コンシ式、2017年版コンシ式で算出したかぶりの設計値も合わせて示す。また、W/C=55%のプロットには2017年版示方書式でのかぶりの算出値を1.0とした場合の比も示す。

普通ポルトランドセメント(OPC)の場合、設計耐用年数100年の結果で見ると、特性値を上回る確率を50%とすると、提案式では2017年版コンシ式の0.79倍と2割程度小さい値となるが、特性値を上回る確率を25%とすると2017年版示方書式のかぶりの1.13倍となる。一方で、2007年版示方書式のかぶり(1.89倍)よりも小さい値となっていることから、OPCについては、2007年版と2017年版の間の値となっている。

高炉セメントB種相当(BB)の場合、特性値を上回る確率を25%とすると、設計耐用年数50年では1.24倍と高いが、設計耐用年数100年では0.99倍とほぼ同程度であることから、実務上は2017年版コンシと同様な設計

が行えると考える。フライアッシュセメントB種相当(FB)については、2017年版コンシ式と比較すると小さいかぶり値となっているが、高炉セメントB種相当(BB)とほぼ同程度の値となっていることから、混和材を適切に添加された状態であれば、フライアッシュについても高炉スラグ微粉末と同程度の塩害抵抗性があることが反映されていると考えられる。

#### 4. 浸せき法、電気泳動法により拡散係数の特性値を算出する場合の検討

浸せき法や電気泳動法で得られた拡散係数を実環境暴露のデータと比較すると図-6(a)、図-7(a)ようになる。ここで用いた実環境暴露のデータおよび浸せき法のデータは図-1で用いたものと同様のもの、電気泳動試験のデータは2017年版コンシの元データである。各試験法のデータの中央値には差異があるため、その違いを考慮して拡散係数の特性値を設定する必要がある。いずれのデータも、塩化物イオンに晒されていた期間に違いがあるため、各試験片の拡散係数の実測値を、各試験片の浸せき期間(あるいは暴露期間) $t$ の $k_D$ 乗で除して参照見掛けの拡散係数 $k_D$ を算出して比較することとした。

図-6(b)に浸せき法と実環境暴露の参照見掛けの拡散係数とW/Cの関係を示す。ここで、浸せき法については、過去の普通ポルトランドセメントを使用した場合の浸せき法による見掛けの拡散係数について $k_D$ の平均値が0.70であったことから $k_D$ を0.70に、実環境暴露のデ

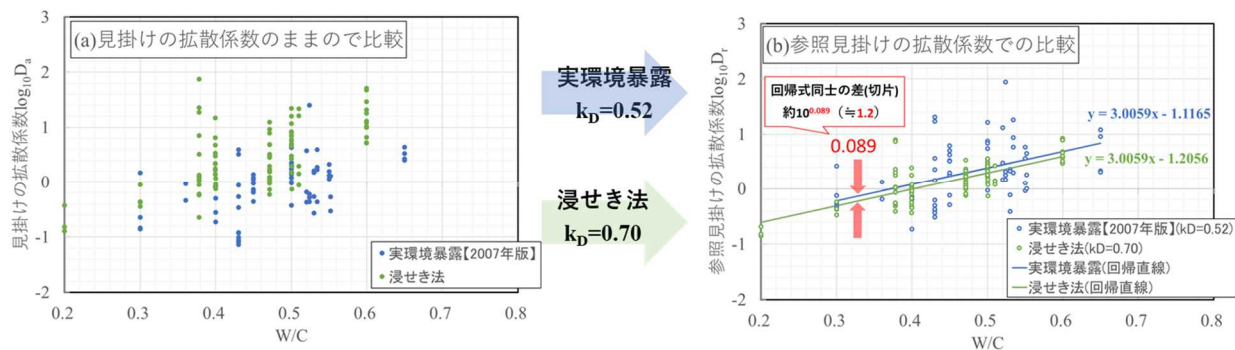


図-6 実環境暴露と浸せき法による拡散係数の比較

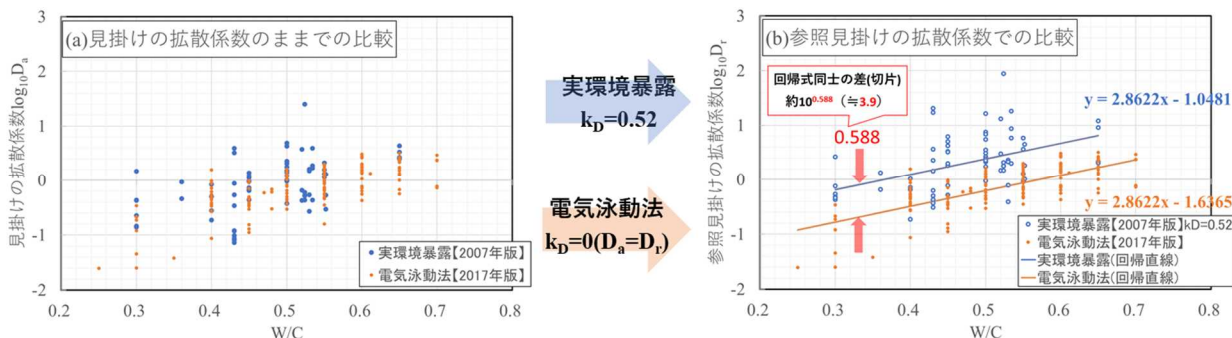


図-7 実環境暴露と電気泳動法による拡散係数の比較

ータについては2.1の検討により0.52が妥当であると推測されたことから $k_D$ を0.52として $D_r$ を求めた。図より両者の回帰式には、10の0.089乗(≒1.2)の差があったことから、浸せき法により得られた拡散係数の予測値 $D_p$ から拡散係数の特性値 $D_k$ を算出する際には、材料物性の予測値の精度を考慮する安全係数 $\gamma_p$ を1.2とすると良いと考えられる。

図-7(b)に電気泳動法と実環境暴露の参照見掛けの拡散係数とW/Cの関係を示す。実環境暴露のデータは前述と同様に $k_D=0.52$ で、電気泳動法による試験結果は、経年の影響を考慮することができないため、そのまま参照見掛けの拡散係数として取扱った。図より、両者の回帰式には10の0.59乗(≒3.9)の差があった。電気泳動法の試験結果の場合は、それぞれの母集団の違いにより、母集団の中央値と照査で与えるべき予測値の間に大きな相違があるので、安全係数 $\gamma_p$ とは別に材料修正係数等を3.9とすることで考慮すると良いと考える。

### 5. かぶりの設計値の試算

以上で検討してきた、式(2)および(7)~(9)により求まる拡散係数の特性値の妥当性を検証するため、かぶりの設計値 $C_d$ を、セメント種類、設計耐用年数ごとに算出し、2007年版コン示式、2017年版コン示式で求まる値と比較した。試算にあたっては以下の条件を設定した。

- ・ 構造物係数： $\gamma=1.0$
- ・ 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値のばらつ

きを考慮した安全係数： $\gamma_c=1.3$

- ・ 初期塩化物イオン濃度： $C_i=0.30$  (kg/m<sup>3</sup>)
- ・ 表面塩化物イオン濃度： $C_o=9.0$  (kg/m<sup>3</sup>)
- ・ 設計耐用年数： $t=50, 100$  (年)
- ・ コンクリートの材料係数： $\gamma=1.0$  (2007年版, 2017年版),  $\gamma_c=1.3$  (本検討での提案式)
- ・ ひび割れの影響： $w/l=0.000$  (ひび割れなし)

図-8に、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種相当、フライアッシュセメントB種相当を使用して設計耐用年数を50年および100年とした場合のかぶりの設計値の試算結果を示す。

いずれの設計耐用年数でも、普通ポルトランドセメントについては、提案する計算値が2007年版コン示よりも小さく、2017年版コン示よりも大きい値となった。また、設計耐用年数が大きいほど提案する計算値が2017年版による計算値に近づくものとなっている。高炉セメントB種相当については、設計耐用年数を50年とした場合に2017年版コン示よりわずかに大きい値であり、設計耐用年数を100年とした場合に2017年版コン示の値とほぼ変わらない値となっている。フライアッシュセメントB種相当については、2007年版コン示ならびに2017年版コン示よりも小さい値となっているが、高炉セメントB種相当と同程度の値となっている。これはフライアッシュについても適切な混和量を添加することで高炉スラグ微粉末と同等の耐塩害性能を付与することが可能であることを示している。

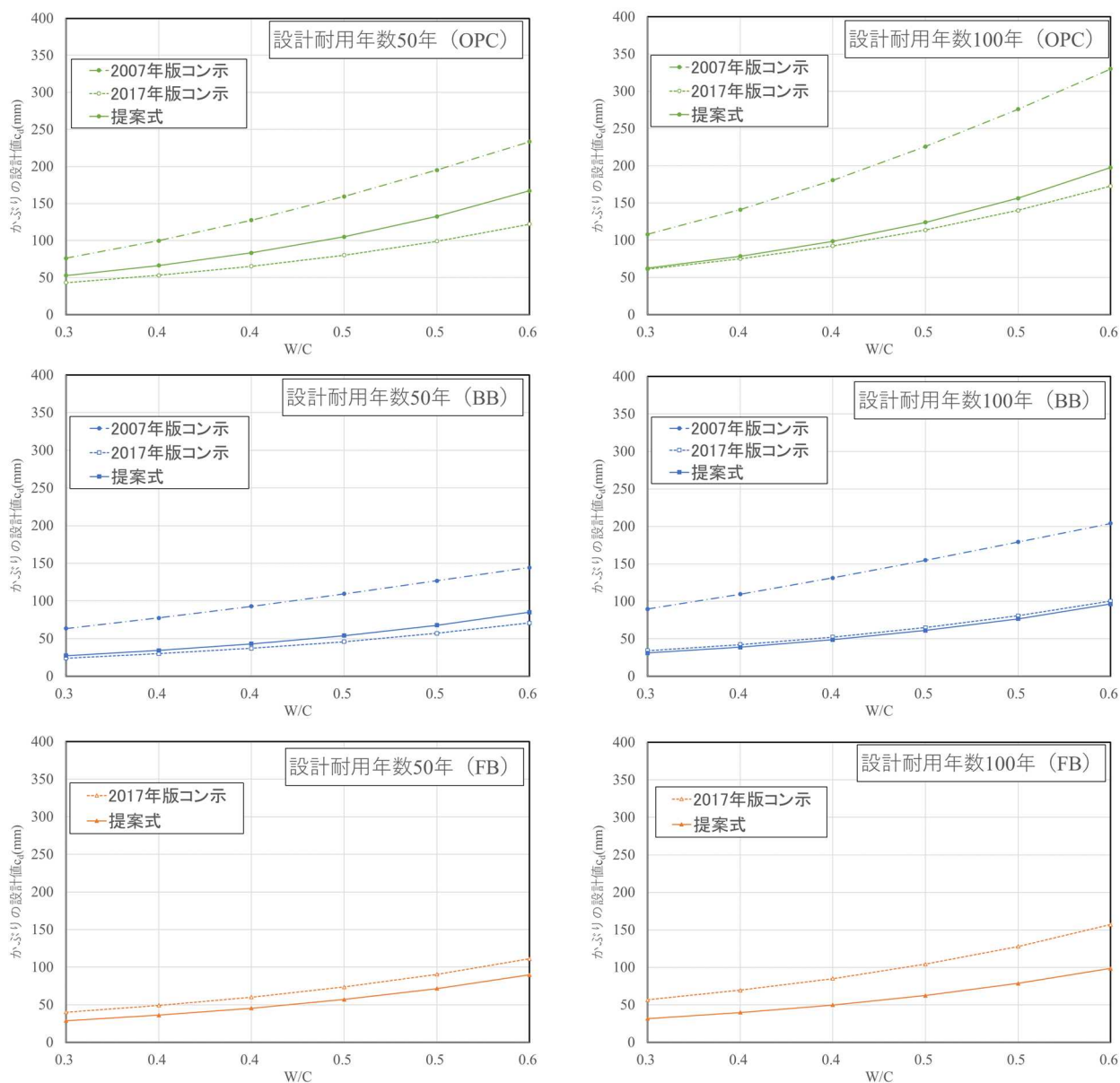


図-8 かぶりの設計値  $C_d$  の試算

## 6. おわりに

コンクリートの塩化物イオン拡散係数の特性値の設定に際し、安全係数 $\gamma_c$ および材料物性の予測値の精度を考慮する安全係数 $\gamma_p$ を導入することで、適切に設定できる方法を提案した。また、この安全係数 $\gamma_p$ 等の設定により実環境暴露、浸せき法による試験、および電気泳動法により導出される拡散係数の中央値の差異についても考慮可能だと考える。今後、試験データの拡充により精度の向上を図るとともに、各種経年構造物の試験データなどをもとに検証を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.55，2012
- 2) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.162-163，2017
- 3) 鎌田 和久：コンクリート中の塩分浸透の停滞現象とその支配機構に関する包括的研究，東京大学博士論文，2016
- 4) 武若 耕司，松本 進：海洋環境下におけるコンクリート中の塩分浸透量推定に関する数値解析結果，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集，第V部，pp.482-483，1987
- 5) 井口 重信，岸 利治：塩分浸透停滞現象の表現を可能とする拡散係数経時変化モデル，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.538-543，2021
- 6) fib：Model Code for Service Life Design bulletin 34，pp.59-61，2006
- 7) 小柳 翔平，高橋 佑弥，石田 哲也：高炉スラグ微粉末及びフライアッシュを混和したセメント硬化体の材料物性・塩分浸透性状の経時変化に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，2015