

コンクリートの塩化物イオン拡散係数の測定方法

オリエンタル白石(株) 技術研究所 正会員 工修 ○俵 道和
オリエンタル白石(株) 技術研究所 正会員 工博 吳 承寧

1. はじめに

コンクリートの塩化物イオン浸透に対するパラメーターとして塩化物イオンの拡散係数が用いられる。自然界での塩化物イオンは、コンクリートの細孔溶液中に固定化をとめないながら濃度勾配を駆動力として移動する。塩化物イオンを対象として拡散の速さは規定されており、係数として塩化物イオンの見掛けの拡散係数が用いられる。この見掛けの拡散係数を直接求める試験方法として、「土木学会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)」がある。この試験方法は、コンクリート供試体を塩水に浸せきさせ、その後、供試体をスライスして深さごとにコンクリート中の塩化物イオン濃度を求めて、その分布から拡散係数を算出する方法である。直接、見掛けの拡散係数を求めることができるが、試験期間が数ヶ月かかり、特に40%以下の低水結合材比のコンクリートでは試験期間が1年を超える場合もある。

浸せき法に比べ短時間で拡散係数を求める試験方法として、「土木学会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)」がある。電気泳動による方法は、コンクリートに直流定電圧を印加することによって、強制的に塩化物イオンを移動させ、その移動速度から拡散係数を求めるものである。試験は1ヶ月程度で終了し、浸せきによる方法では試験が長期化する低水結合材比のコンクリートにおける拡散係数の測定に威力を発揮する。ここで求まる拡散係数は、「見掛けの」拡散係数ではなく、コンクリートの細孔溶液中における塩化物イオンの移動のし易さを表す「実効」拡散係数を測定するものである。得られた実効拡散係数は、そのままコンクリート標準示方書の照査に用いることはできないが、土木学会では実効拡散係数から見掛けの拡散係数に変換する方法が提示されているため、実効拡散係数から見掛けの拡散係数を推定することが可能である。

本研究では、下部工、PC橋梁上部工およびプレキャスト製品に使用するコンクリートを対象とし、さらに、塩化物イオン浸透に対する耐久性の向上を目指した数種類の混和材を添加したコンクリートについて、短時間で拡散係数の判定が可能な電気泳動法により実効拡散係数を算出した。さらに、土木学会標準示方書に示されている方法により実効拡散係数から見掛けの拡散係数を推定した。

2. 実験概要

2.1 試験体の種類

試験体の配合を表-1に示す。試験体の配合種類として、コンクリートの用途に応じて4種類、施工目的に応じて3種類、合計7種類の配合について検討を行なった。下部工、橋梁上部工の地覆および壁高欄部を対象とする、設計基準強度 24N/mm^2 の高炉セメントB種を用いたコンクリートは膨張材の有無によって、配合BB-EとBBの2種類とした。橋梁上部工の場所打ち部を対象とした、設計基準強度 30N/mm^2 の普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートは膨張材の有無によって、配合N-EとNの2種類とした。一般地域にある橋梁上部工主桁部を対象とした、設計基準強度 40N/mm^2 の早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートは配合H、塩害地域にあるプレキャストプレテンションPC桁を対象とした、設計基準強度 60N/mm^2 の早強ポルトランドセメントに混和材として高炉スラグ微粉末6000を用いたコンクリートは配合BSPCとした。プレキャスト製品を対象物とした、設計基準強度 100N/mm^2 の中庸熟ポルトランドセメントに混和材としてシリカフェームを用いたコンクリートは配合M-SFとした。

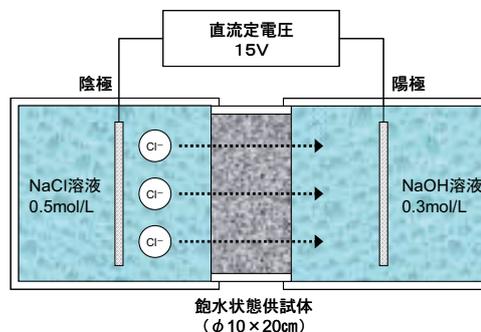
表－1 試験体の配合種類

配合番号	対照物	セメント種類	混和材種類 および 添加量	水結合材比 W/B (%)	材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm ²)
BB	下部工および 壁高欄・地覆	高炉 B 種	—	55.0	38.0
BB-E	下部工および 壁高欄・地覆 (収縮補償)		膨張材 セメントを 20kg/m ³ 置換	55.0	40.1
N	上部工主桁	普通ポルトランド セメント	—	55.0	38.9
N-E	上部工主桁 (収縮補償)		膨張材 セメントを 20kg/m ³ 置換	55.0	36.2
H	上部工主桁	早強ポルトランド セメント	—	49.0	41.1
BSPC	上部工主桁 (塩害対策)		高炉スラグ微粉末 セメントを 50%置換	31.9	68.1
M-SF	プレキャスト 製品	中庸熱ポルトラン ドセメント	シリカフェーム セメントを 8%置換	20.0	126.5

2.2 電気泳動による実効拡散係数の算定

本研究では、塩分浸透性能試験として、比較的短期間で塩分浸透性能の評価が可能となる電気泳動による試験を行い、実効拡散係数を算定した。試験は土木学会 JSCE-G571-2007 に準拠して行った。試験に用いた供試体は、セメントの水和のばらつきを小さくするために材齢 28 日まで水中養生を行い、φ100×200mm の円柱供試体を厚さ 50mm の円盤状に切断したものをを用いた。

図－1 に塩分浸透試験装置の概要図を示す。陰極側セルに 0.5mol/L の NaCl 溶液を、陽極側セルに 0.3mol/L の NaOH 溶液を入れ、電極間の電位差が 15V になるように電圧を制御し、陽極側の塩化物イオン量の経時変化を測定した。塩化物イオンの拡散係数は、塩化物イオン濃度が試験日数の増加とともに増加し、経過日数に対する塩化物イオン濃度の増加割合が一定に達した時点をも、コンクリート中の塩化物イオンの移動が定常状態に達したと判断して、その時の塩化物イオンの泳動速度から流束を求め、電気化学法則より計算できる。本試験では、式(1)により塩化物イオン実効拡散係数 D_e を算定した。



図－1 電気泳動試験装置概要図

$$D_e = \frac{J_{cl}RTL}{|Z_{cl}|FC_{cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (1)$$

ここに、

- D_e : 実効拡散係数 ($cm^2 / 年$)
- J_{cl} : 塩化物イオンの定常状態における流束 ($mol / (cm^2 \cdot 年)$)
- R : 気体定数 ($8.31J / (mol \cdot K)$)
- T : 絶対温度測定値 (K)
- Z_{cl} : 塩化物イオンの電荷 ($= -1$)
- F : ファラデー定数 ($96,500C / mol$)
- C_{cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度測定値 (mol / l)
- $\Delta E - \Delta E_c$: 供試体表面間の測定電位 (V)
- L : 供試体の厚さ (mm)

3. 試験結果

3.1 塩化物イオン濃度の経時変化

図－2 に、電気泳動により通過した陽極側セルにおける塩化物イオン濃度の経時変化を示す。これより、配合 N, N-E および H は同程度の塩化物イオンの移動速度を示したことがわかる。配合 BB および BB-E は水結合材比および実強度が配合 N, N-E, H と同程度であるが、塩化物イオンの移動速度が配合 N, N-E, H に比べ緩やかになっている。混和材として高炉スラグ微粉末を混入した BSPC およびシリカフェームを混入した高強度の M-SF については、W/C と混和材の影響で、塩化物イオンの移動速度が極端に小さく、移動速度が定常状態と見なせるまでに 3～5 ヶ月必要であった。

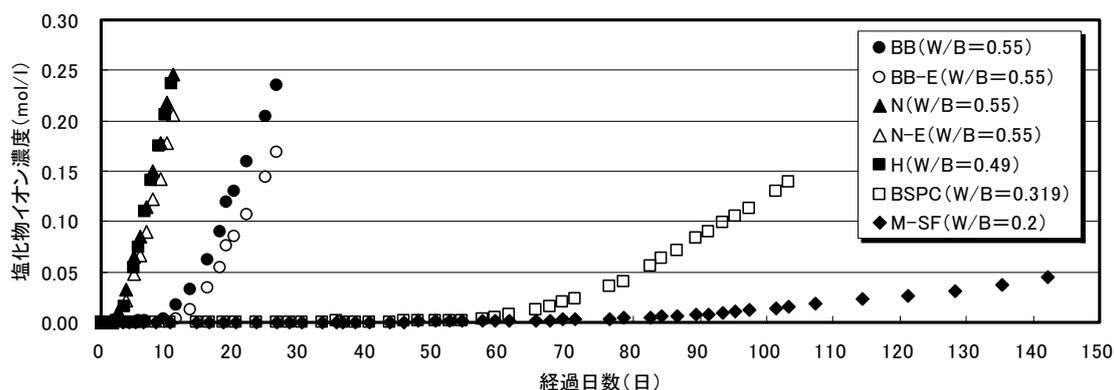


図-2 陽極側セルにおける塩化物イオン濃度の経時変化

3.2 塩化物イオンの実効拡散係数

図-3に、電気泳動により求めた各種コンクリートの水結合材比と塩化物イオン実効拡散係数の関係を示す。配合N、N-EおよびHについて、実効拡散係数はほぼ同程度であった。水結合材比は上記と同等であり、結合材として高炉B種を用いた配合BおよびBB-Eについて実効拡散係数は約1/2となった。また、膨張材を混入した配合N-EおよびBB-Eは膨張材を混入することにより、実効拡散係数が小さくなり塩化物イオン浸透性に対する抵抗性を向上させることが確認された。混和材として高炉スラグ微粉末を混入したBSPCおよびシリカフュームを混入した高強度のM-SFについては水セメント比55%のものとは比べ実効拡散係数は約1/10であり、更に塩化物イオン浸透に対する耐久性の向上が確認された。

3.3 実効拡散係数から推定した見掛けの拡散係数

見掛けの拡散係数は、電気泳動法により求められた実効拡散係数 D_e を用いて、式(2)より算定が可能である。式(2)に示した換算係数 $k_1 \cdot k_2$ は、土木学会コンクリート標準示方書[規準編]土木学会規準および関連規準2007の附属書、電気泳動試験による実効拡散係数を用いた見掛けの拡散係数計算方法に示されている図-4より算定することができる。換算係数 $k_1 \cdot k_2$ は、普通ポルトランドセメント、高炉B種および低熱ポルトランドセメントの3種類のセメントについて提案されている。今回、検討を行なった早強ポルトランドセメントを用いた配合Hについては普通ポルトランドセメントの換算係数 $k_1 \cdot k_2$ を適用し、配合BSPCについては高炉スラグ微粉末を50%置換していることから高炉B種の換算係数 $k_1 \cdot k_2$ を適用した。また、中庸熱ポルトランドセメントベースでシリカフュームを添加した配合M-SFについては、セメントとしては性能が低熱ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントの間であり、シリカフュームを添加していることにより、コンクリートが緻密になり塩分浸透性は小さくなると考えられるため、換算係数 $k_1 \cdot k_2$ は低熱と高炉B種の間位置する普通ポルトランドセメントの係数 $k_1 \cdot k_2$ を適用した。図-4より求めた配合ご

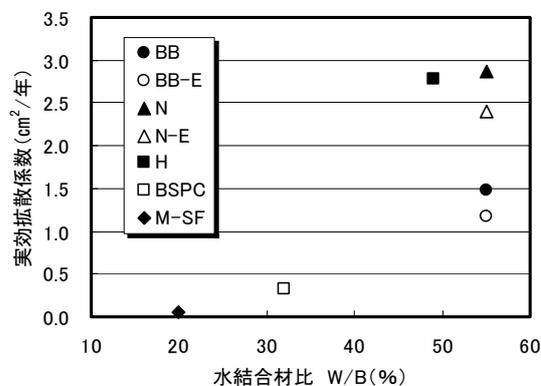


図-3 水結合材比と実効拡散係数の関係

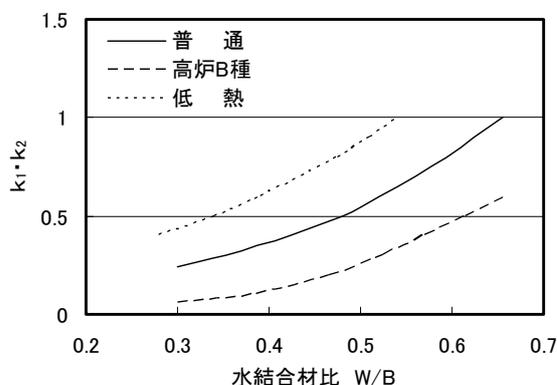


図-4 水結合材比と換算係数 $k_1 \cdot k_2$ の関係

との換算係数 $k_1 \cdot k_2$ および式 (2) から算出された見掛けの拡散係数を表-2に示す。

3.4 実験値から推察した見掛けの拡散係数と予測値の整合性

塩化物イオンに対する拡散係数の照査に用いる、コンクリートの見掛けの拡散係数の予測値の算定方法について、土木学会標準示方書[施工編]では、普通ポルトランドセメントを用いる場合と高炉セメントやシリカフェームを使用する場合について式 (3), (4) の回帰式が提案されている。また、国土交通省土木研究所からは早強セメントを用いた場合の見掛けの拡散係数の予測値として式 (5) が提案されている。上記の式より算定されたコンクリートの見掛けの拡散係数の予測値と電気泳動によって求められた実験値の実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数との比較を図-5に示す。その結果、配合 BB, BB-E, N, N-E, H について、ほぼ予測値と実験値は一致しているが、高炉スラグ微粉末を混入した BSPC やシリカフェームを混和した M-SF については、電気泳動試験により推定された見掛けの拡散係数は予測値より小さな値を示した。この原因は、予測値の推定には混和材の影響は考慮されておらず、実験値から推察された見掛けの拡散係数は混和材の影響により小さくなったものと考えられる。

4. まとめ

電気泳動法によりコンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数を求め、土木学会から提案されている計算式より実効拡散係数から見掛けの拡散係数を算出し、求められた見掛けの拡散係数の実験値と土木学会および土木研究所から提案されている拡散係数の予測値との比較を行った。その結果、高炉B種、高炉B種+膨張材、普通セメント、普通セメント+膨張材および早強セメントを用いた配合については、予測値と同程度となった。塩化物イオンの浸透性に対する抵抗性向上が期待できる、高炉スラグ微粉末を早強セメントに混合した配合および中庸熱セメントにシリカフェームを混入した高強度コンクリートは、混和材の影響により実験値は予測値より小さな値となった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・規準編，土木学会規準および関連規準，2007
- 2) 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 (III)，2001.3

表-2 電気泳動による拡散係数

配合番号	水結合材比 W/B	換算係数 $k_1 \cdot k_2$	実効拡散係数 D_e (cm ² /年)	見掛けの拡散係数 D_{ae} (cm ² /年)
BB	0.55	0.35	1.48	0.518
BB-E	0.55	0.35	1.17	0.410
N	0.55	0.67	2.86	1.916
N-E	0.55	0.67	2.40	1.608
H	0.49	0.54	2.77	1.496
BSPC	0.319	0.065	0.33	0.021
M-SF	0.20	0.18	0.054	0.010

$$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad (2)$$

ここに、

D_{ae} : 見掛けの拡散係数 (cm²/年)

D_e : 実効拡散係数 (cm²/年)

k_1 : コンクリート側、陰極側溶液側それぞれの塩化物イオン濃度の釣り合いにかかわる係数

k_2 : セメント水和物中への塩化物イオン固定化現象にかかわる係数

$$\log_{10} D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (3)$$

$$\log_{10} D_p = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad (4)$$

$$D_c = (5 \times 10^{-7}) \cdot e^{-1.6(C/W)} \quad (5)$$

ここに、

D_p : 拡散係数の予測値 (cm²/年)

D_c : コンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm²/sec)

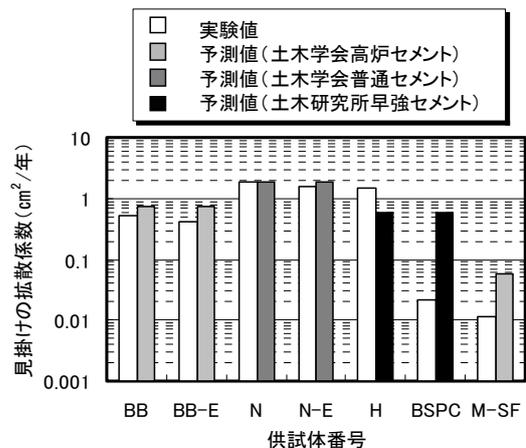


図-5 拡散係数の予測値と実験値との比較