

各種方法で求めたコンクリートの塩化物イオン拡散係数の比較

長岡技術科学大学 大学院 学生会員 ○小倉 孝道

長岡技術科学大学 大学院 学生会員 池津 和弘

長岡技術科学大学 正会員 下村 匠

1. はじめに

コンクリートの塩化物イオン拡散係数は、構造物の塩害に対する抵抗性の照査における重要な指標値である。したがって、構造物の耐久性照査の一般化のためには、設定したコンクリートの使用材料、配合から、あるいは簡単な試験を行うことにより、得られるコンクリートの塩化物イオン拡散係数の値を簡便かつ正確に予測する方法が望まれる。その代表的な方法として、コンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁾に示された予測式がある。試験により求める方法としては、2003年に土木学会で制定された電気泳動による方法（JSCE-G571-2003）²⁾がある。

一方、著者らはコンクリートの乾燥収縮に関する系統的实验に基づき、コンクリートの細孔構造モデルを介して、コンクリート中の水分拡散係数を、コンクリートの配合、養生条件から予測する方法を提案している³⁾。コンクリート中の水分移動と塩化物イオンの移動は、当然同じ現象ではなく、メカニズムも異なる。しかしながら、いずれもコンクリート細孔組織中のイオンや分子レベルの物質の移動という点では共通性があるので、水分拡散係数と塩化物イオン拡散係数も相関関係があると予想される。

2. 各法の概要

(1) 示方書による予測式

土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁾には、実コンクリート構造物中の塩化物量分布調査結果に対し、線形拡散移動メカニズムを仮定して塩化物イオン拡散係数を求め、これをコンクリートの水セメント比の関数として表した予測式が掲載されている。普通セメントの場合、

$$\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (1)$$

ここに、 D_p ：コンクリートの塩化物イオン拡散係数 (cm^2/year) である。式(1)で評価される拡散係数は、実構造物の実測結果に基づくものであるため、コンクリートの養生条件の影響、日射や乾湿の繰返しなどの環境条件の影響、コンクリート中の塩分の濃縮や固定の影響などがすべて含まれているといえる。

(2) 電気泳動法による塩化物イオン拡散係数の測定²⁾

図-1に電気泳動試験の概要を示す。本試験は、試験体コンクリート中の塩化物イオンの移動が定常状態となった後の測定結果から、式(2)を用いて塩化物イオン拡散係数を求める方法である。

$$D_e = \frac{J_{cl}RTL}{|Z_{cl}|FC_{cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 D_e ：実効拡散係数 [cm^2/year]、 J_{cl} ：塩化物イオンの定常状態における流束 [$\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{year})$]、 R ：気体定数 [$8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$]、 T ：絶対温度[K]、 Z_{cl} ：塩化物イオンの電荷 [= -1]、 F ：ファラデー定数 [$96500\text{C}/\text{mol}$]、 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 ：供試体厚さ [mm]である。本法で得られる拡散係数は、コンクリート細孔中が液状水で満たされた状態における自由塩化物イオンの拡散移動に対するものであり、塩分の固定化の影響は含まない。

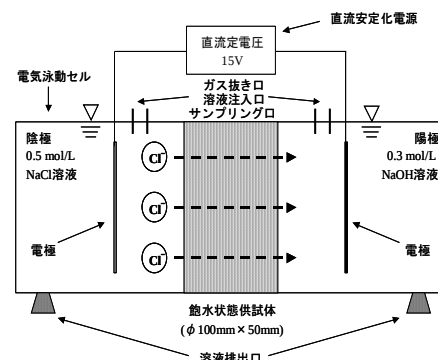


図-1 電気泳動試験

キーワード：塩化物イオン拡散係数、水分拡散係数、電気泳動法、細孔構造

連絡先：〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1, TEL：0258-47-9603, FAX：0258-47-9600

表-1に配合を示す W/C45, 55, 65%のコンクリートを試験し、拡散係数を求めた。養生日数は7日とした。

(3) 細孔構造モデルによる塩化物イオン拡散係数の推定

著者らが開発したコンクリートの細孔構造に基づく水分移動モデル³⁾を基本として、以下の仮定を置くことにより塩化物イオン拡散係数を求める。

- 1) 細孔組織中の塩化物イオンの拡散係数 D_{cl} は、水蒸気移動の場合と同様に、自由な空間における塩化物イオン拡散係数（物質定数） D_c に、拡散に有効な空間率 V_{eff} と、細孔組織の屈曲や閉塞による移動抵抗を表す係数 k_{cl} を乗じることにより評価できるとする。（ $D_C = k_{cl} \cdot V_{eff} \cdot D_c$ ）
- 2) 塩化物イオンの移動に及ぼす細孔組織の抵抗は、水蒸気の移動に対する影響と同一あるとする。（ $k_{cl} = k_v$ ）
- 3) コンクリート細孔中の液状水に満たされた部分すべてが塩化物イオンの拡散に有効であるとする。いま、簡単のため飽水状態を考える。（ $V_{eff} = V_o$ ）

計算に必要な各種材料パラメータは、種々の条件下のモルタルおよびコンクリートを用いた系統的な乾燥収縮試験結果を逆解析した結果に基づき推定式が定式化されている³⁾。

$$B = (1880 + 2680 \ln t_d) (W/C)^{-1.2} \quad (3)$$

$$k_v = 40 B^{-0.69} \quad (4)$$

$$V_o = (W - \omega C) / \rho_l \quad (5)$$

$$\omega = (0.061 + 0.054 \ln t_d) (W/C)^{0.5} \quad (6)$$

ここに、 B ：細孔径分布を表現するパラメータ、 t_d ：養生日数[day]、 W ：単位水量[kg/m³]、 C ：単位セメント量[kg/m³]、 V_o ：空隙率（＝単位体積中の総細孔容積）、 ω ：セメントの重量結合水率、 ρ_l ：液状水の密度[kg/m³]である。

3. 結果

図-2に電気泳動試験結果を示す。いずれの水セメント比の供試体も、約3日程度から塩化物イオン濃度の変化割合が定常状態となった。この結果から塩化物イオンの移動流束を求め、式(2)により塩化物イオン拡散係数を算出した。

各方法により求めた塩化物イオン拡散係数の値の比較を図-3に示す。示方書式により求めた拡散係数と電気泳動法により求めた拡散係数は、いずれの水セメント比の場合もほぼ同じ値となった。細孔構造モデルにより推定した拡散係数は、水セメント比による感度は他二者と多少異なったが、拡散係数の絶対値は近い値となった。物質移動の予測精度の観点からは、拡散係数がオーダー的に一致すれば十分と思われる。したがって、本検討結果より、水分拡散係数に準じた方法で、細孔構造モデルにより実用上十分な精度で塩化物イオン拡散係数を推定することが可能であるといえる。

参考文献

- 1) 2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕、土木学会、2002
- 2) 杉山隆文：コンクリートの塩化物イオン拡散係数を算定するための電気的手法を用いた新しい促進試験方法、コンクリート工学、Vol.35, No.5, pp.29-32, 1997
- 3) 下村 匠：細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル、東京大学博士論文、1993

表-1 実験に用いたコンクリートの配合

セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
普通	45	37.5	136	301	721	1216
普通	55	37.5	147	267	721	1216
普通	65	37.5	155	239	721	1216

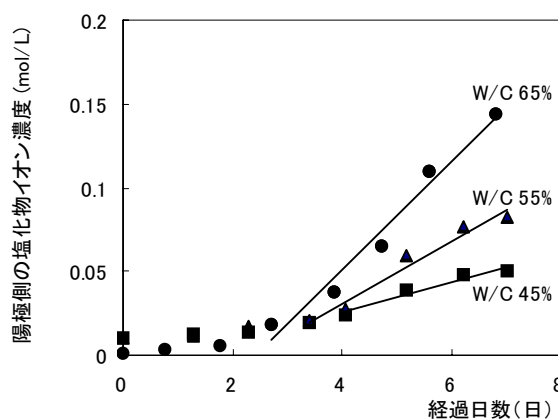


図-2 電気泳動試験結果

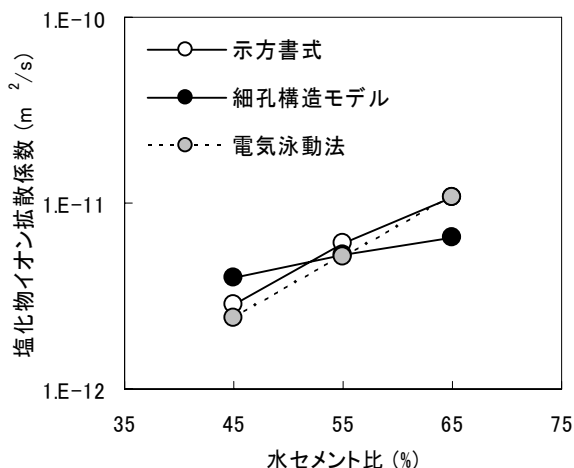


図-3 各法により求めた拡散係数の比較