

塩素固定化混和材および膨張材を混和したコンクリートの塩分拡散挙動

デンカ株式会社 青海工場 セメント・特混研究部

○伊藤慎也

保利彰宏

芝浦工業大学 大学院理工学研究科

中村絢也

芝浦工業大学 工学部 土木工学科

伊代田岳史

1. はじめに

日本は海洋からの飛来塩分が多く、また冬季の凍結防止剤散布などにより、全国的に塩害によるコンクリート構造物の劣化が報告されており、汎用的な材料面の対策として、高炉スラグ等の混和材が使用されている。また、近年ではカルシウムアルミネートの一種 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (以下 CA_2 と称す) をセメントに混和することで、セメント水和物である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (以下 CH と称す) と反応して、ハイドロカルマイト (以下 HC と称す) を生成し、その HC が塩化物イオンをフリーデル氏塩として化学的に固定化し、可溶性塩化物イオンを減少させるメカニズムを有する混和材が開発されている¹⁾。これら混和材は、いずれもコンクリートに添加することで塩化物イオンの浸透抑制効果を発揮するが、それぞれ反応機構や塩化物イオンの浸透抑制メカニズムが異なる。高炉スラグおよびフライアッシュについては既往の研究データが多く、耐久性照査に用いる塩化物イオンの拡散係数においても電気泳動試験で得られる実効拡散係数から見掛けの拡散係数へ換算する方法が示されているが、 CA_2 等の異なる混和材を用いる場合には換算の指標がない。そこで本研究では、各種混和材を用いたコンクリートについて、塩水浸漬試験と非定常電気泳動試験を行い、塩化物イオンの浸透挙動および両者の拡散係数の関係性について検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

本研究におけるセメントは、普通ポルトランドセメント (以下、 OPC) を用い、塩害対策の混和材として市販の高炉スラグ微粉末および CA_2 を用いた。なお、 CA_2 は、工業原料の炭酸カルシウムと酸化アルミニウムを用いて

$\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ モル比が 0.5 となるように焼成したクリンカーを粉砕して使用した。また、塩化物イオンの浸透経路となるひび割れを抑制する目的で、一部配合でエトリンガイト石灰複合系の膨張材 (以下、 Ex) との組み合わせも検討した。本試験におけるコンクリート配合を表-1に示す。細骨材には千葉県君津市法木産の山砂 (密度 2.62 g/cm^3) を、粗骨材には大分県津久見市青江湖麻柄山系の石灰石砕石 (密度 2.70 g/cm^3) を用いた。

2. 2 塩分拡散挙動の評価

塩分拡散挙動の評価として、塩水浸漬試験と非定常状態の電気泳動試験を行なった。塩水浸漬試験は、 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を材齢 28 日まで 20°C 水中養生した後、1 面曝露とした状態で 20°C 10% 濃度の NaCl 水溶液に 8 週間浸漬した。材齢毎に供試体を割裂し、割裂面に硝酸銀溶液 (0.1N) を噴霧することで、曝露表面から呈色部までの深さを測定した。非定常電気泳動試験は、既往の研究²⁾を参考に実施した。供試体は材齢 28 日まで水中養生を施した後、飽和水酸化カルシウムを用いて真空飽水处理を行ったものを使用した。試験装置の陽極側に NaOH 水溶液 (0.3N)、陰極側に NaCl 水溶液 (3%) を注入し、印加電圧は 30V 一定とした。所定の通電時間における塩化物イオン浸透深さの測定を行い、NT BUILD 492 に示される下式[1]により拡散係数を算出した。

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}} \right) \quad [1]$$

ここに、 D_{nssm} : 拡散係数 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)、 U : 印加電圧 (V)、 T : 温度 ($^\circ\text{C}$)、 L : 供試体厚さ (mm)、 X_d : 塩化物イオン浸透深さ (mm)、 t : 試験時間 (hr)

表-1 コンクリート配合

No.	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)						
		W	C	BFS	CA_2	Ex	S	G
N	55	170	309	-	-	-	871	968
N+ CA_2			289	-	20	-	870	968
N+ CA_2 +Ex					20	22	870	968
B50			155	155	-	-	865	962

3. 実験結果および考察

3. 1 塩分浸透性

図-1 に塩水浸漬試験、図-2 に非定常電気泳動試験における塩化物イオン浸透深さを示す。いずれの試験においても塩化物イオンの浸透深さは、N、N+CA₂、N+CA₂+Ex、B50 の順で小さくなっており順列に差異はない。一方で、浸漬材齢8週と通電終了時点で比較した場合、CA₂を配合したN+CA₂およびN+CA₂+Exにおいて浸漬法よりも非定常電気泳動における浸透深さが大きく、挙動が異なる傾向が認められた。これは、CA₂を混和材として用いたコンクリートの場合、電気を駆動力とする試験方法では固定化したイオンの移動が起こること、見掛け上塩化物イオンの浸透が大きくなるためと考えられる。すなわち、コンクリート標準示方書で示されている実効拡散係数から見掛けの拡散係数への変換に用いられる係数 $k_1 \cdot k_2$ がNおよびB50とは異なるものと考えられる。この係数 $k_1 \cdot k_2$ は、空隙構造や固定化、吸着能力により影響を受けるため、CA₂を混和したコンクリートにおけるこれらの特性については今後検証が必要である。

3. 2 拡散係数

図-3 に、塩水浸漬試験および非定常電気泳動試験で得られた拡散係数を示す。なお、塩水浸漬試験においては、浸漬深さが小さかったため、既往の研究³⁾を参考に、Fick の第二法則を近似した式[2]にて簡易的に算出した。本拡散係数を元に、非定常電気泳動試験で得られる拡散係数を浸漬法の拡散係数に換算する係数を算出したところ、Nで0.6、N+CA₂で0.36、N+CA₂+Exで0.21、B50で0.31となり、NおよびB50についてはコンクリート標準示方書で示される係数 $k_1 \cdot k_2$ とほぼ同程度であることが確認されたが、CA₂を用いた配合では異なる結果となった。

$$X = 4\sqrt{Dat} + k \quad [2]$$

ここに、Da：拡散係数 (m²/s)、X：浸透深さ (mm)、t：浸漬材齢 (日)、k：係数

4. まとめ

本研究の成果をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 浸漬法と非定常電気泳動法とで比較した場合、CA₂を用いた配合では塩化物イオンの浸透挙動が異なる傾向が認められた。
- (2) 浸漬法と非定常電気泳動法とで得られる拡散係数の関係性は、NおよびB50ではコンクリート標準示方書で示される係数 $k_1 \cdot k_2$ とほぼ同程度だが、CA₂を用いた配合では異なる傾向が認められた。

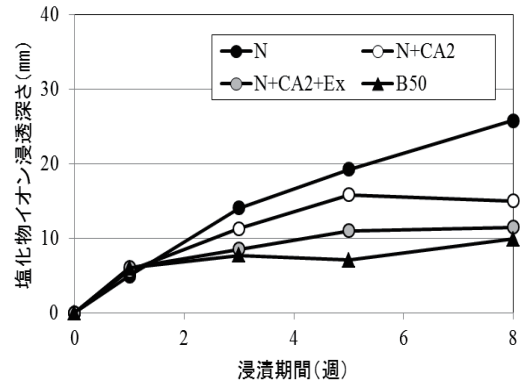


図-1 塩水浸漬試験

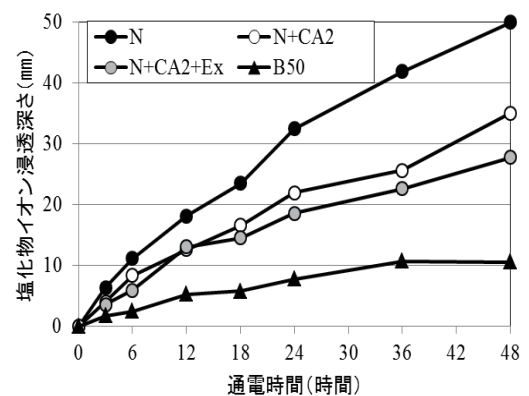


図-2 非定常電気泳動試験

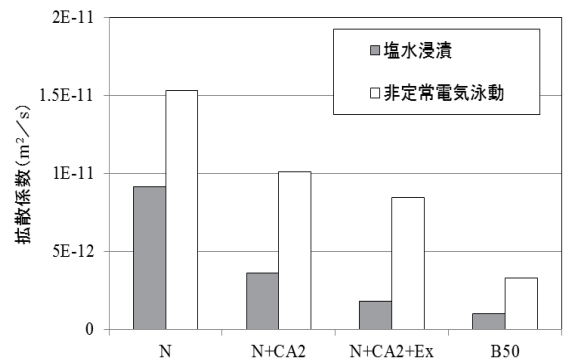


図-3 拡散係数

【参考文献】

- 1) 田原和人ほか：CaO・2Al₂O₃を混和したセメント硬化体の塩化物イオン固定化挙動、セメント・コンクリート論文集、No. 64, pp. 428-434(2010)
- 2) 伊代田岳史ほか：非定常状態電気泳動試験を用いた高炉コンクリートの養生影響評価、セメント・コンクリート論文集、No. 68, pp. 275-282(2014)
- 3) 大濱嘉彦ほか：ポリマーセメントモルタル及びコンクリートにおける塩化物イオン拡散性状、セメント技術年報、No.40, pp.87-90, 1986.