

電気泳動試験を用いたセメント硬化体の塩化物イオン浸透性に及ぼす硫酸イオンの影響

東京理科大学 学生会員 ○米田 研一 東京理科大学大学院 学生会員 直町 聡子
東京理科大学大学院 学生会員 堀 圭悟 東京理科大学 正会員 加藤 佳孝

1. はじめに

海水には塩化物イオンの他に硫酸イオンなどの様々な種類のイオンが含まれており、既往の研究¹⁾では、硫酸塩溶液に浸せきさせることで硫酸イオンとセメント水和物が反応し空隙構造が変化することで、塩化物イオンの浸透に影響を及ぼすと指摘されている。このような現象を解明するために、浸せき試験が一般的に用いられるが、海水中の硫酸塩濃度は低いため非常に長期間の時間を要する。ここで、塩化物イオンの浸透性を短期間で把握する試験として電気泳動試験が活用されているが、浸せき試験と電気泳動試験の駆動力の違いを理解し、電気泳動試験の結果を活用すれば、海水の作用を受けるコンクリート中の塩化物イオンの浸透性状を早期に理解することが可能ではないかと考えられる。そこで本研究では、硫酸イオンによる変質がコンクリート中への塩化物イオンの浸透に及ぼす影響を電気泳動試験によって検討した。なお、硫酸イオンとセメント水和物が反応し、セメント水和物が変化することを本研究では、変質と定義する。

2. 実験概要

(1)供試体概要

使用したセメントは、普通ポルトランドセメントである。モルタル供試体の示方配合を表-1に示す。作成した供試体の寸法はφ10×20cmである。水中養生28日後に供試体の両端面から2.5cmを除き、残った部分から厚さ5cmに切断し、電気泳動試験用の供試体(φ10×5cm)とした。

(2)電気泳動試験の試験概要

表-2に示すように、シリーズ毎に陰極側の溶液種類を変えた。シリーズ1は塩化物イオンのみ、シリーズ2は硫酸イオンによる変質と塩化物イオンの泳動、シリーズ3は硫酸イオンによる変質を検討するために設定した。JSCE-G571-2003に準じて実効拡散係数 D_e を式(1)より算出した。

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

ここで、 D_e ：実効拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 R ：気体定数($=8.31(\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K}))$)、 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($=96500(\text{C}/\text{mol})$)、 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。

また、シリーズ3では、電気泳動試験終了後、図-1のように、供試体をイオンの浸透方向に1cm毎に切断し、供試体内部の水酸化カルシウム(CH)量を熱重量示差熱分析(TG-DTA)で測定した。

表-1 示方配合

略称	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)		
		水	セメント	細骨材
OPC50	50	152	334	1415

表-2 電気泳動試験 条件

実験	溶液種類	溶液濃度
シリーズ1	NaCl	0.5mol/l
シリーズ2	NaCl	0.5mol/l)+Na ₂ SO ₄ (0.03mol/l)
シリーズ3	Na ₂ SO ₄	0.03mol/l

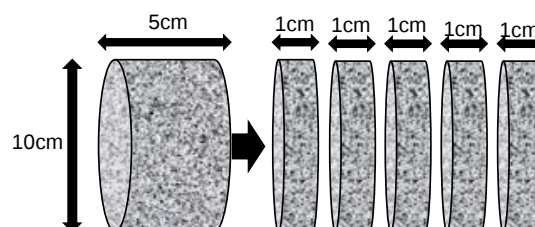


図-1 供試体の切断方法

キーワード 塩化物イオン、硫酸イオン、変質、実効拡散係数

連絡先 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 TEL04-7124-1501

3. 実験結果

(1) NaCl と Na_2SO_4 の混合溶液を用いた電気泳動試験

図-2 に、シリーズ 1、シリーズ 2 の陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化を示す。図-2 よりシリーズ 1 とシリーズ 2 を比較すると、シリーズ 2 では塩化物イオンの増加割合が 15 日ごろから変化していることが分かる。

(2) 実効拡散係数の算出結果

表-3 に実効拡散係数 D_e の算出結果を示す。シリーズ 2 の塩化物イオン濃度の増加割合が変化するため、試験開始から 5～15 日を初期、20～27 日を後期とし、それぞれの期間の D_e を求めた。表-3 より、シリーズ 1 とシリーズ 2 の初期では D_e が同程度のため、硫酸イオンにより変質されていないと考えられる。また、シリーズ 2 の初期と後期を比較すると、後期のほうが D_e は小さい。

(3) 硫酸イオンによるセメント硬化体の変質

水中養生 28 日後の CH 量に対する、14 日間硫酸イオンを電気泳動したときの CH 量の比率を用いて、モルタル供試体の CH 量の減少を評価した(図-3)。図-3 より、陰極側から 1cm の場所で少し CH 量は減少していることが確認できた。これは、供試体内部に硫酸イオンが浸透することで、硫酸イオンと CH が反応し、二水セッコウやエトリンガイトが生成されたためであると考えられる。このことから、二水セッコウやエトリンガイトの生成により空隙が緻密化され、図-2 のシリーズ 2 に示したように、15 日後の塩化物イオンの増加割合が小さくなり、表-3 に示したように実効拡散係数は小さくなったと考えられる。また既往の研究³⁾では、6 ヶ月間硫酸塩溶液に浸せきさせると、二水セッコウやエトリンガイトといった硫酸イオンとの反応生成物によるひび割れが発生すると指摘されている。よって今回の電気泳動試験でも、より長期に渡り実施すると、ひび割れにより塩化物イオンの移動経路が大きくなることから、実効拡散係数は大きくなる可能性が考えられる。

4. まとめ

硫酸イオンと CH との反応生成物により空隙が緻密化され実効拡散係数が小さくなることが確認できた。また電気泳動試験を用いて、硫酸イオンによるセメント硬化体の変質を再現することができる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 堀圭悟，加藤佳孝： Mg^{2+} ， SO_4^{2-} がコンクリートの塩分浸透性に及ぼす影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 14 巻，2014。
- 2) 山地伸弥，河合研至，新見龍男：硫酸によるコンクリートの劣化に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1125-1130，2004。
- 3) 吉田夏樹，中山健一：硫酸および硫酸塩によるコンクリートの化学的侵食に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.715-720，2013。

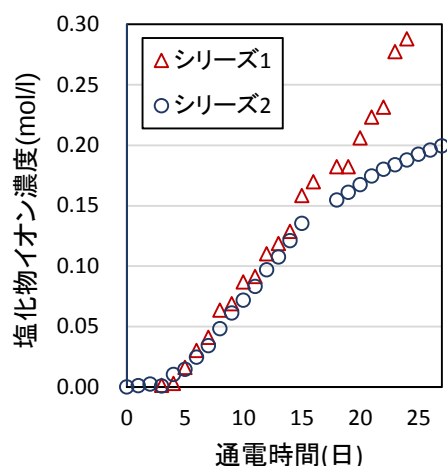


図-2 陽極側塩化物イオン濃度経時変化

表-3 実効拡散係数 D_e

	$D_e(\text{cm}^2/\text{年})$
シリーズ 1	1.26
シリーズ 2 初期	1.14
シリーズ 2 後期	0.42

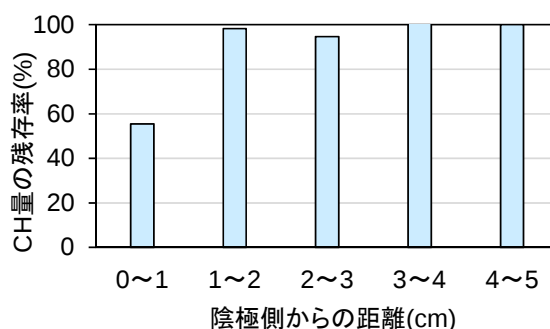


図-3 シリーズ 3 変質 14 日後 CH 量