

電気泳動による短繊維補強セメントペーストの塩化物イオン浸透性評価

北海道大学工学院 ○学生員 白井 礼陽
太平洋セメント（株） 正会員 安田 瑛紀

北海道大学工学研究院 フェロー 横田 弘
太平洋セメント（株） 正会員 河野 克哉

1. はじめに

短繊維補強コンクリート（以下，SFRC）は，繊維による力学的性能の向上やひび割れ抑制による耐久性の向上が期待される．一方で，佐々木ら¹⁾は SFRC に対して塩水浸漬試験を実施し，セメントマトリクスと繊維の界面等において塩化物イオンが拡散しやすくなっていることが一つの要因となり，塩化物イオンの浸透抵抗性が低下する可能性を指摘している．そこで本研究では，SFRC の塩化物イオン浸透抵抗性を評価することを目的として短繊維を添加したセメントペーストに対して電気泳動試験を行った．

2. 試験概要

2.1 試験水準と試験体

試験水準とセメントペーストの配合を表-1 に示す．試験パラメータは，水セメント比（W/C）が 50%と 30%の 2 水準，短繊維混入率が 2Vol.%と添加なしの 2 水準，練混ぜ方法がシングルミキシング（以下，SM）とダブルミキシング（以下，DM）の 2 水準で，合計 6 水準の試験を行った．練混ぜ水には上水道水を，セメントには普通ポルトランドセメントを，短繊維にはポリビニルアルコール（以下，PVA）繊維を使用した．PVA 繊維は，電気泳動試験の試験体に使用するもののみ繊維長を 6mm とし，その他の試験の試験体には繊維長 15mm のものを使用した．練混ぜはホバートミキサにて行った．SM は，練混ぜ水の全量をセメントと練混ぜ，練混ぜ時間は 3 分間とした．DM は，練混ぜ水を 1 次水（W₁）と 2 次水（W₂）に分割し，1 次水とセメントの質量比（W₁/C）を文献²⁾を参考にブリーディング率が最も小さくなると仮定した 23%となるようにし，1 次水とセメントを 1 分間練混ぜた．その後残りの水量を 2 次水として使用し，さらに 2 分間練混ぜた．試験体は，材齢 1 日で脱型し，その後 40℃で 72 時間蒸気養生を行った．

2.2 電気泳動試験

電気泳動試験は JSCE-G 571-2003³⁾ を参考にして行った．電気泳動試験装置の概要を図-1 に示す．電気泳動

表-1 セメントペーストの配合

名称	W/C	繊維混入率	単位量 (kg/m ³)			練混ぜ方法
			W	C	PVA	
50-NF-SM	50%	なし	600	1200	0	シングルミキシング
50-PVA-SM		2Vol.%	600	1200	26	
50-NF-DM		なし	600	1200	0	ダブルミキシング
50-PVA-DM		2Vol.%	600	1200	26	
30-NF-SM	30%	なし	475	1584	0	シングルミキシング
30-PVA-SM		2Vol.%	475	1584	26	

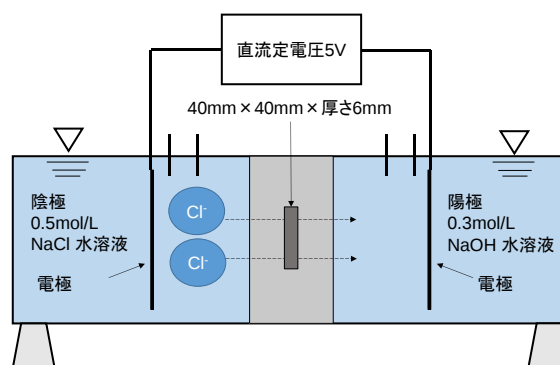


図-1 電気泳動試験装置

試験用の試験体は 40mm×40mm×厚さ 6mm の薄板状とした．角柱試験体をカッターで切断する際に懸念される切断面の凹凸の影響を避けるために，スリット型の型枠を作製し，そこにセメントペーストを直接打ち込むことにより試験体を作製した．

電気泳動試験では，コンクリートの細孔溶液中を電場と仮定し，電圧を印加することによって，塩化物イオンを陽極側へ連続的に移動させる．陰極側から陽極側への塩化物イオンの移動流束が一定に達したとき，塩化物イオンの移動が定常状態に達したとみなし，この時の移動流束を用いて，拡散係数を算出した．

定常状態における塩化物イオンの流速，実効拡散係数の算出には，それぞれ式(1)，式(2)を用いた．

$$J_{cl} = \frac{v_{cl} \Delta C_{cl}}{A \Delta t} \quad (1)$$

$$D_e = \frac{J_{cl} R T L}{|Z_{cl}| F C_{cl} (\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (2)$$

ここで， J_{cl} ：塩化物イオンの定常状態における流束

(mol/cm²/year), V^H : 陽極側の溶液体積(L), A : 試験体断面面積(cm²), $\Delta C_{cl}^H/\Delta t$: 陽極側塩化物イオン濃度の増加割合(mol/L/year), D_e : 実効拡散係数(cm²/year), R : (8.31J/mol/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(96500C/mol), C_{cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度測定値(mol/L), $\Delta E - \Delta E_e$: 試験体表面間の測定電位(V), L : 試験体厚さ(mm)である。

3. 試験結果と考察

フレッシュ時と硬化後のセメントペーストの性状を表-2に示す。フロー値はW/C50%よりW/C30%が小さく, また, 短繊維の添加によって減少した。ブリーディング率は, W/C50%で10%以上の高い値を示した。これはW/C30%と比較して凝結始発時間が長く, また練混ぜ水が多かったためセメント粒子が沈降しやすかったことが原因であると考えられる。圧縮強度は短繊維の添加により低下したが, 曲げ強度は増加した。しかし, 両強度とも練混ぜ方法による差はほとんど見られなかった。曲げ応力と中央変位の関係を図-2に示す。

電気泳動試験から得られた実効拡散係数を図-3に示す。実効拡散係数はW/Cが小さくなると低下した。また, SMよりDMの方がわずかに低下した。これは, W/Cが小さくなったことでマトリクスが緻密になったこと, また, DMによりブリーディング率が減少したことによるものと考えられる。さらに, 短繊維の添加によってわずかに実効拡散係数が増加した。これは, 短繊維の添加によりブリーディング率が増加し, 塩化物イオンが浸透しやすくなったためであると考えられる。また, 既往の研究¹⁾では, 短繊維の添加によりマトリクスと繊維の界面を通じて塩化物イオンが拡散しやすくなる可能性が示唆されている。しかし, 短繊維の添加が実効拡散係数にほとんど影響しないという報告⁴⁾もあり, 今後, より詳細な検討が求められる。さらに, PVAは親水性が大きく, マトリクス中の水分を吸着しやすいとされており, 試験体内に拡散した水分が電界作用でイオンに解離してキャリアになるために高分子材料の中でも比較的導電性に富むと考えられているため, 塩化物イオンの移動が促進され, 実効拡散係数が大きな値となったことが考えられる。

4. まとめ

本研究において, 以下のような主要な結論を得た。

- 1) 短繊維の添加により塩化物イオンの実効拡散係数

表-2 セメントペーストの性状

水準	フレッシュ性状					蒸気養生直後の強度(N/mm ²)	
	温度(°C)	フロー試験		ブリーディング率	始発時間	圧縮強度	曲げ強度
		0打	15打				
50-NF-SM	23.9	267mm	なし	11.40%	5h25min	49.8	2.4
50-PVA-SM	22.4	236mm	なし	17.50%	5h25min	41.8	4.8
50-NF-DM	23.2	251mm	なし	5.35%	5h20min	48.1	2.4
50-PVA-DM	22.9	194mm	なし	9.60%	5h20min	39.4	5.1
30-NF-SM	22.8	107mm	195mm	0.16%	3h10min	84.0	2.0
30-PVA-SM	22.4	104mm	194mm	0.22%	3h10min	71.0	10.8

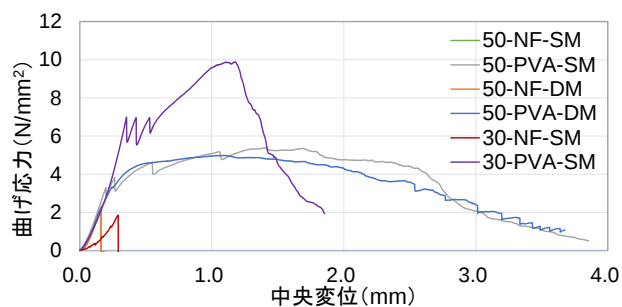


図-2 曲げ応力-中央変位関係

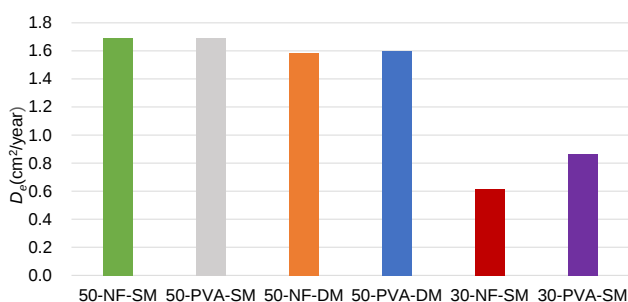


図-3 実効拡散係数

は増加する。

- 2) ダブルミキシングによりブリーディング率は減少し, 実効拡散係数も低下する。

参考文献

- 1) 佐々木亘, 石澤正大, 恩田陽介, 竹山忠臣, 谷口秀明: コンクリートの塩化物イオン浸透性に与える鋼繊維の寸法および混入率の影響, 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16巻, 2016.
- 2) 田澤栄一: 練混ぜ方法とセメント初期水和, コンクリート工学, 第46巻, 第4号, pp.3-8, 2008.
- 3) 土木学会規準「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 (JSCE-G 571-2013)」, 2013.
- 4) 佐々木亘, 恩田陽介, 梶貢一, 谷口秀明: 早強ポルトランドセメントを用いたモルタルの物質透過性に与える短繊維および水セメント比の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, 2018.