

論文 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

佐々木 亘^{*1}・恩田 陽介^{*2}・梶 貢一^{*3}・谷口 秀明^{*4}

要旨: 早強ポルトランドセメントを用いて、水セメント比および短繊維の種類を変化させた繊維補強モルタルの物質透過性について塩水浸せき試験、表層透気試験および表面吸水試験により検討を行なった。その結果、浸せき溶液の濃度が塩化物イオンの拡散係数に与える影響は小さいこと、短繊維の混入により物質透過に対する抵抗性が低下する可能性があるがモルタルではその程度は小さく、水セメント比の低減によっても影響は小さくなること、供試体による測定では表面吸水試験における 10 分後の吸水速度から塩水浸せき試験による見掛けの拡散係数が予測できる可能性があることなどがわかった。

キーワード: 短繊維補強コンクリート, 塩化物イオン, 透気試験, 吸水試験, 細孔径分布

1. はじめに

繊維補強セメント複合材料 (以下, FRCC) の大きな特徴は、セメント系材料の弱点であるひび割れ発生後の力学特性を大きく改善することにある。短繊維をコンクリートやモルタルといったセメント系材料に均一に分散させることで、ひび割れ幅の抑制、じん性や耐衝撃性の向上、引張強度、曲げ強度やせん断強度の改善などを測ることができる。セメント系材料への短繊維補強の適用については、古くは 20 世紀初頭から検討が行なわれてきた。我が国では 1970 年代あたりから精力的に研究が行なわれ、土木学会をはじめとする種々の機関で鋼繊維補強コンクリートの設計施工に関する指針類¹⁾が整備された。近年では、超高強度繊維補強コンクリート²⁾(以下, UFC) や複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料³⁾(以下, SHCC) といったより高性能な FRCC が開発され、それぞれに特化した設計施工指針案が取り纏められるとともに、実構造物への適用も進められている⁴⁾。

一方、実際に構造部材への FRCC の適用を検討する場合には、初期の耐荷性能だけでなく、耐久性への影響を考慮する必要があることは言うまでもない。構造物の耐久性に影響を与える様々な要因のうち、ひび割れ発生以前における FRCC 自体の物質透過性について着目すると、上述の UFC については、マトリクス自体が非常に緻密であるため物質透過性が非常に小さく、中性化や塩化物イオン浸透については照査不要としている。UFC を除く FRCC については、これまでも耐久性に関わる検討は行なわれているものの、それぞれの検討によって条件が様々であり、特に、マトリクス中に短繊維が分散していることによる物質透過性への影響については明らかにな

っているとは言い難いのが現状である。

このような背景のもと、筆者らはコンクリートの物質透過性に与える短繊維の種類および混入率を検討している⁵⁾。本稿では、水セメント比 (以下, W/C) および短繊維の種類を変化させた、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の検討について報告する。なお本実験では、粗骨材および粗骨材と短繊維の相互作用の影響を取り除くため、モルタルによる実験を行なった。

2. 実験概要

2.1 実験要因およびモルタルの配合

表-1 に実験要因および水準を示す。W/C は 55, 40, 30%の 3 水準、短繊維の種類は鋼繊維 2 種類、合成繊維 1 種類の 3 水準とした。既報⁵⁾において塩化物イオン浸透性に与える短繊維混入率の影響は小さかったため、本実験では、短繊維の種類毎に短繊維混入率は 1 水準とした。SFA および PVA の短繊維混入率を短繊維かさ容積⁶⁾も同程度となる 1.5%とした。SFB の短繊維混入率は、貧配合なコンクリートで SFA および PVA の 1.5%と同程度のスランプが得られた⁵⁾0.5%に設定した。

表-2 に使用材料、表-3 にモルタルの配合を示す。実験要因とした W/C および短繊維以外の影響を極力取

表-1 実験要因および水準

要因	水準
水セメント比	55, 40, 30 [%]
短繊維の種類	鋼繊維 A, 鋼繊維 B, PVA 繊維

*1 三井住友建設(株) 技術本部技術研究所建設材料グループ主任研究員 博(工) (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術本部技術研究所建設材料グループ 修(工) (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術本部技術研究所建設材料グループ

*4 三井住友建設(株) 技術本部技術研究所建設材料グループ長 博(工) (正会員)

表-2 使用材料

材料	種類, 物性など	記号
水	上水道水	W
セメント	早強ポルトランドセメント (密度 3.13 g/cm ³ , 比表面積 4720 cm ² /g)	C
細骨材	砕砂 (佐野産, 石灰石, 表乾密度 2.70 g/cm ³ , 吸水率 1.19%, FM2.9)	S
短繊維	鋼繊維 (密度 7.85 g/cm ³ , 繊維径 0.62 mm, 繊維長 30 mm, 両端フック)	SFA
	鋼繊維 (密度 7.85 g/cm ³ , 繊維径 0.20 mm, 繊維長 22 mm)	SFB
	PVA 繊維 (密度 1.30 g/cm ³ , 繊維径 0.66 mm, 繊維長 30 mm)	PVA
化学混和剤	AE 減水剤 (標準形(I種), リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体)	WR
	高性能 AE 減水剤 (標準形(I種), ポリカルボン酸エーテル系化合物)	SP
	AE 剤 (I種, 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)	AE
	消泡剤 (ポリアルキレングリコール誘導体)	DF

表-3 モルタルの配合

配合指標					単位量 [kg/m ³]			化学混和剤の使用量				練上がり直後のフレッシュ性状	
W/C [%]	モルタル細骨材容積比 s/mor [%]	空気量 [%]	短繊維の種類	短繊維混入率 Vf [%]	W	C	S	WR [C×%]	SP [C×%]	AE [C×%]	DF [C×%]	スランプ [cm]	空気量 [%]
55			なし	0	269	489	1416	0.06	-	0.0012	0.0000	16.0	5.4
			SFA	1.5				0.10	-	0.0020	0.0160	15.0	6.7
			SFB	0.5				0.10	-	0.0020	0.0100	13.5	6.1
			PVA	1.5				0.10	-	0.0020	0.0100	14.0	5.7
40	54.7	6.0	なし	0	237	593	1414	-	0.50	0.0010	0.0100	14.5	5.9
			SFA	1.5				-	0.60	0.0010	0.0240	17.0	6.0
			SFB	0.5				-	0.60	0.0010	0.0220	15.0	5.9
			PVA	1.5				-	0.60	0.0010	0.0240	18.0	5.0
30			なし	0	206	687	1416	-	1.50	0.0020	0.0100	23.5	5.3
			SFA	1.5				-	1.50	0.0020	0.0300	20.0	4.5
			SFB	0.5				-	1.50	0.0020	0.0200	20.5	4.6
			PVA	1.5				-	1.50	0.0020	0.0170	20.0	4.1

り除く目的で、粗骨材を除くモルタルとしたことに加えて、各配合のモルタル細骨材容積比を一定とした。モルタルの練混ぜには公称容量 55 リットルの強制二軸ミキサを使用した。短繊維を除いたモルタル練りを W/C=55% では 120 秒, W/C=40 および 30% では 180 秒行なった後、ミキサは回転させたまま短繊維を投入し、投入完了から 60 秒間の練混ぜを行なった。配合計算上の空気量は 6.0% とし、練上り直後のスランプおよび空気量は、同じ W/C の配合では性状に大きな差が生じないように化学混和剤の使用量により調整した。

練上がったモルタルはφ100×200 mm の型枠に打込み、材齢 1 日で脱型した後、材齢 28 日まで 20℃で水中養生を行なった。

2.2 測定項目

(1) 塩水浸せき試験

材齢 28 日から JSCE-G 572 に準じて塩水浸せき試験を行ない、浸せき開始から 91 日後に深さ方向の各点において全塩化物イオン量の測定を行なった。全塩化物イオン量の測定にあたっては、供試体を暴露面から深さ 10 mm 毎にスライスし、それぞれ中心付近から微粉碎試料を採取した。採取した微粉碎試料を用いて、炭酸塩と電量滴定式塩分計による全塩化物イオン量の測定⁷⁾を行なった。浸せき溶液の濃度は定法の 10%に加えて、3%でも実験を行なった。本測定においては、側面のシールなどの準備作業は材齢 28 日以前に行なった。

(2) 細孔径分布

水中養生を終了した供試体から、塩水浸せき試験にお

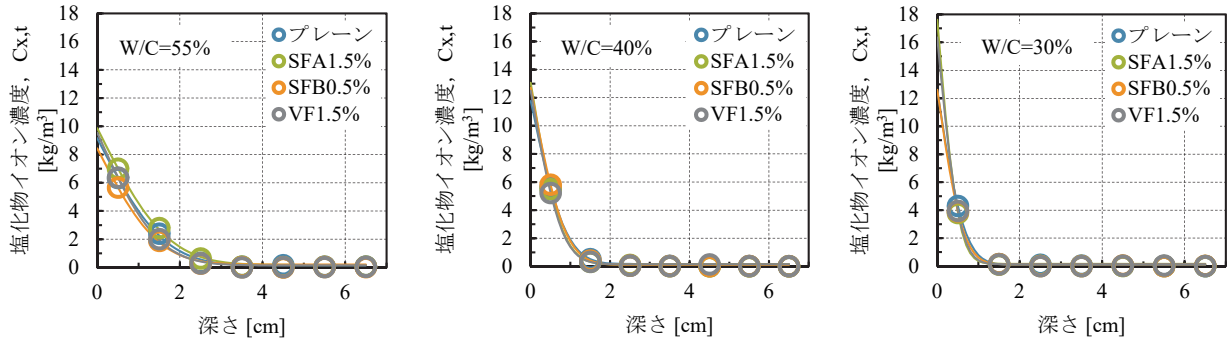


図-1 塩化物イオン濃度分布（10%溶液）

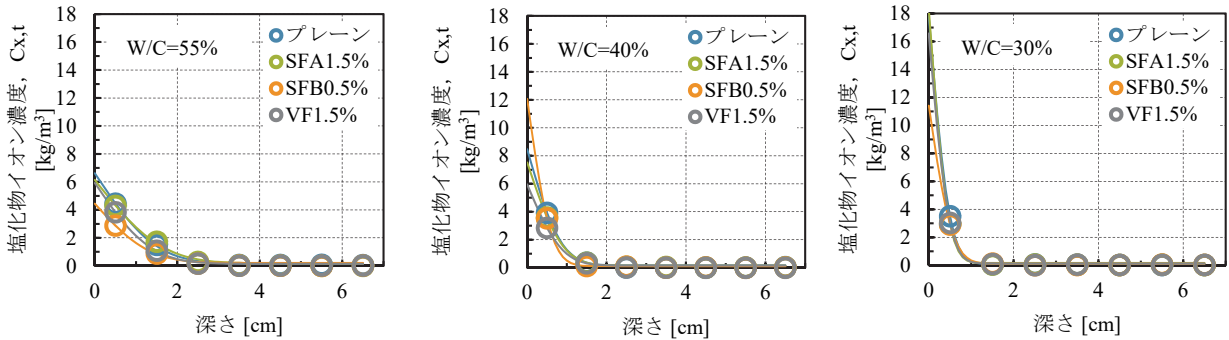


図-2 塩化物イオン濃度分布（3%溶液）

いて暴露面となる位置付近より試料を採取し、水銀圧入法による細孔径分布の測定を行なった。

(3) 透気・吸水試験

塩水浸せき試験において暴露面となる面に対して、Torrent 法による表層透気試験⁸⁾および SWAT 法による表面吸水試験⁹⁾を行なった。試験は、水中養生を終えた供試体を塩水浸せき供試体と同様に端部をカットしたうえで側面をアルミテープによりシールし、材齢 56 日まで 20°C60%RH の恒温恒湿室に存置した後に行ない、透気試験、吸水試験の順に実施した。

表層透気試験および表面吸水試験は、一般には構造物表面の物質透過性の評価を目的とした試験であるが、本実験では、既往の文献¹⁰⁾を参考に、供試体の物質透過性を相対的に評価する目的で実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 塩化物イオン濃度分布および見掛けの拡散係数

図-1 および図-2 に塩化物イオン濃度分布の測定結果を示す。また、以下に示す Fick の拡散方程式の解析解で回帰することにより求めた見かけの拡散係数を図-3 に示す。なお、本稿では、表面塩化物イオン量についても式(1)の回帰により求めた。

$$C_{x,t} = C_{0,t} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right] + C_0 \quad (1)$$

ここに、 $C_{x,t}$: 時刻 t [year]、深さ x [cm] における塩化物イ

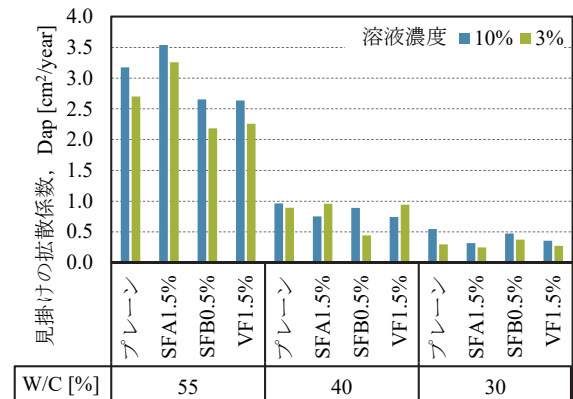


図-3 見掛けの拡散係数

オン濃度 [kg/m³]、 $C_{0,t}$: 時刻 t における表面塩化物イオン濃度 [kg/m³]、 C_0 : 初期塩化物イオン濃度 [kg/m³]、 D_{ap} : 見掛けの拡散係数 [cm²/year]、 erf : 誤差関数

これらの図より、本実験の範囲では、見かけの拡散係数の値やその傾向に溶液濃度が与える影響は小さいこと、W/C が小さくなるほど見掛けの拡散係数が小さくなること、W/C=40および30では、短繊維が見掛けの拡散係数に与える影響も小さくなるのが分かる。W/C=55では SFA を用いた場合に見掛けの拡散係数がプレーンに比べて大きくなった。既報⁵⁾では、鋼繊維を混入させた場合に、鋼繊維の種類によらずプレーンコンクリートと比べて塩化物イオンが浸透しやすくなる状況が観察さ

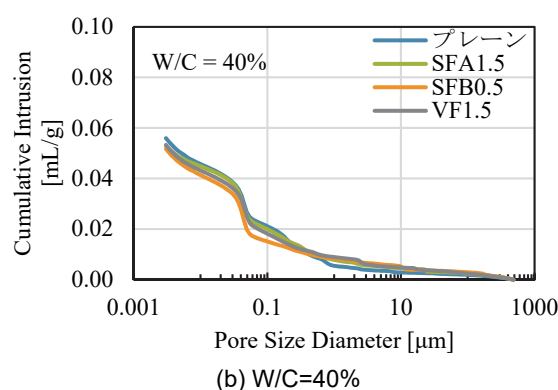
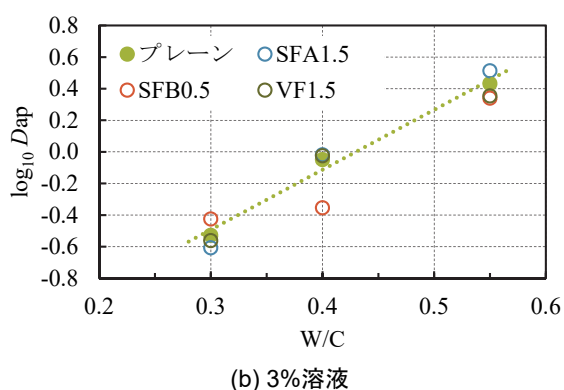
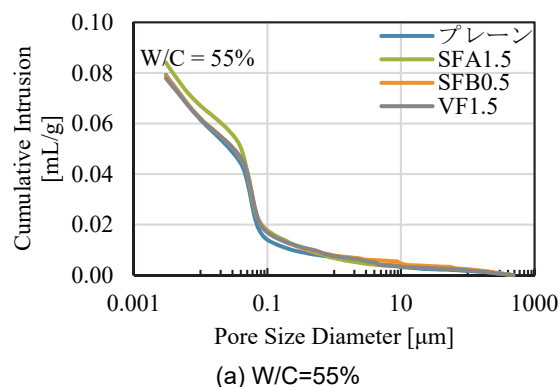
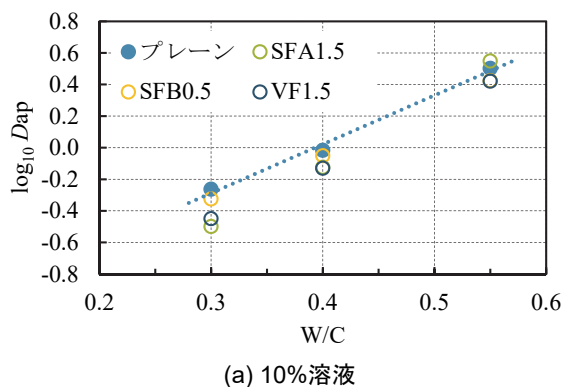


図-4 W/C と見掛けの拡散係数の関係

れたが、本実験では図-1および図-2に示したように、W/C=55%であっても必ずしも短繊維の影響は明確では無く、算出された見掛けの拡散係数においてはW/C=55%のSFAのみプレーンより大きくなる結果であった。短繊維の混入によって塩化物イオン浸透抵抗性が低下する原因として、短繊維とマトリクス界面に遷移帯が形成されて脆弱層となったことの可能性が考えられるが、本実験と既報の差異は、粗骨材の有無によって、脆弱層の量および連続性が異なったことによるものである可能性が考えられる。

図-4にW/Cと見掛けの拡散係数の関係を示す。見掛けの拡散係数を対数で表すと、両者は直線関係を示し、その傾きはコンクリート標準示方書¹¹⁾に示される普通ポルトランドセメントや低熱ポルトランドセメントの場合と概ね同程度の値であった。

3.2 細孔径分布

図-5に各配合の水銀圧入時の圧入曲線を示す。各W/Cにおいて、短繊維の混入による圧入曲線の大きな変化は見られないものの、見かけの拡散係数が大きかったW/C=55%で鋼繊維SFAを用いたものは、若干ではあるが、0.08~0.03 μm付近で急増する水銀圧入量がプレーンおよび他の短繊維に比べて増加しており、総細孔量も多くなっていることが分かる。

また、W/C=55%と40%では図-3に示した通り、塩化

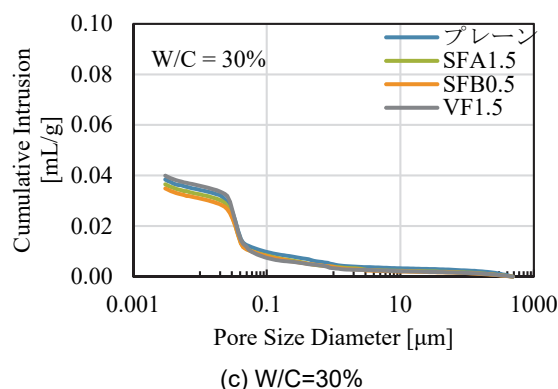


図-5 水銀圧入曲線

物イオンの見かけの拡散係数は明らかに異なるが、水銀圧入では0.1 μm程度以上の圧入曲線に大きな違いは無く、むしろW/C=40%のほうが細孔量が多い結果となっている。一方、0.1 μm程度以下に着目すると、いずれの配合においても水銀圧入量が急増する細孔径が存在することが認められるが、この急増点の現れる細孔径はW/Cが小さくなるほど小さくなっており、また、急増後の圧入量もW/Cが小さくなるほど少なくなっていることが確認できる。このようなW/Cの変化に伴う水銀圧入曲線の変化と見掛けの拡散係数の変化が対応していると考え、W/C=55%における鋼繊維SFAを混入させた場合に塩化物イオンの見かけの拡散係数も大きくなったのは、水銀圧入における急増後の圧入量がプレーンおよび他の

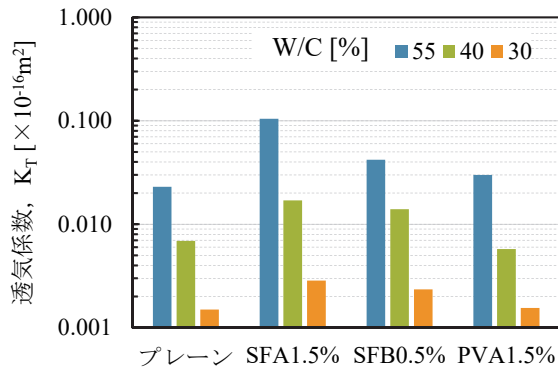


図-6 透気係数

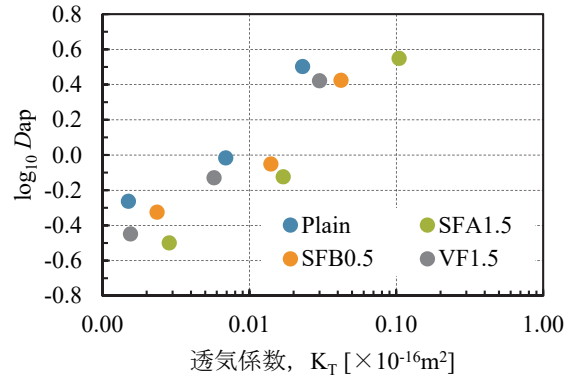


図-8 透気係数と見掛けの拡散係数の関係

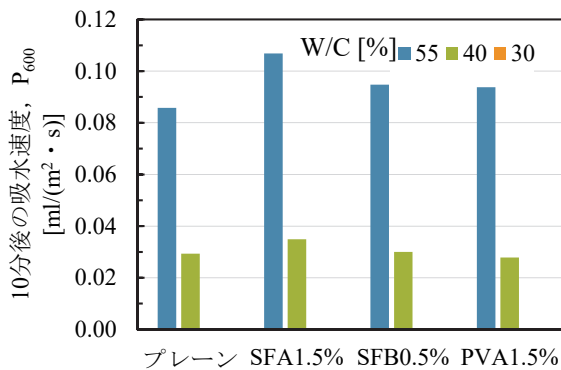


図-7 10分後の吸水速度

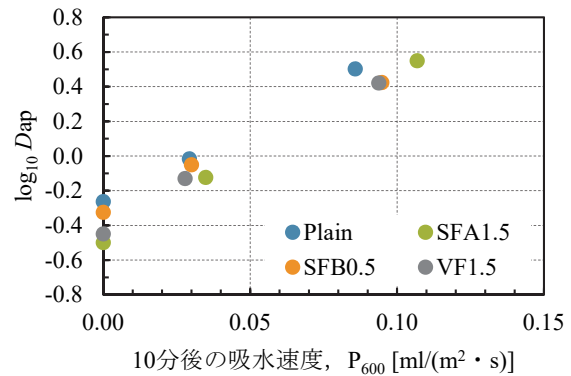


図-9 10分後の吸水速度と見掛けの拡散係数の関係

短繊維と比べて多くなっていることが原因であると推察される。

3.3 表層透気係数および表面吸水速度

図-6 に表層透気試験で測定された透気係数を示す。W/C=55%では短繊維の混入により透気係数が大きくなる傾向がみられ、特に鋼繊維 SFA を用いたもので大きい。W/C=40%および 30%でも同様の傾向がみられるものの、値そのものが小さく、短繊維の影響は相対的に小さくなっている。

図-7 は表面吸水試験で測定された、測定開始から 10 分後の吸水速度である。全体的な傾向は透気係数と同様であるが、W/C=40%では短繊維の影響は相当に小さくなっており、W/C=30%では、いずれの配合でも測定限界以下であった。

図-8 に透気係数と見掛けの拡散係数の関係、図-9 に 10 分後の吸水速度と見掛けの拡散係数の関係を示す。いずれも、W/C と見掛けの拡散係数の場合と同様に、見かけの拡散係数は対数で整理した。

図-8 に示したように、透気係数による評価では、見かけの拡散係数との関係は直線関係とみられるものの、短繊維の有無および種類によって、切片の異なる直線関係となった。一方、図-9 に示した 10 分後の吸水速度と見かけの拡散係数との関係は、図-8 と比べて短繊維の

有無および種類による差異が小さく、それぞれ同一の直線で表現可能であると考えられる。吸水試験では測定面からの吸水であり、塩化物イオンの浸入方向と同様であるのに対し、透気試験では測定面に設置したチャンバーを減圧した後の圧力変化を測定するため、空気の移動方向が塩化物イオンの浸入方向とは異なると考えられる。この方向の差異が、拡散係数との関係における差異の原因となっている可能性が考えられる。

上記の結果から、供試体を用いて 10 分後の吸水速度を測定することで、塩水浸せき試験による塩化物イオンの見掛けの拡散係数をおおよそ予測できる可能性があると言える。しかし、表層透気試験および表面吸水速度は、測定対象の含水率の影響を大きく受けるため、再現性や試験条件の検証等を行なっていく必要があると考えられる。

4. まとめ

モルタル細骨材容積比を一定とし、W/C および短繊維の種類を変化させた繊維補強モルタルの物質透過性について検討を行なった結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 塩水浸せき試験において、浸せき溶液の濃度が塩化物イオンの見かけの拡散係数に与える影響は小さい。

- (2) 短繊維の混入により物質透過に対する抵抗性が低下する可能性があるが、粗骨材を除いたモルタルではその程度は小さく、また、水セメント比の低減によっても短繊維の影響は小さくなる。
- (3) 供試体による測定では、表面吸水試験における 10 分後の吸水速度と塩水浸せき試験で測定された見掛けの拡散係数の対数の間には良好な線形関係が認められる。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案），1983. 3
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004. 9
- 3) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計施工指針（案），2007. 3
- 4) 土木学会：繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書，2015. 8
- 5) 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，pp. 609-614, 2016. 10
- 6) 佐々木亘，谷口英明，樋口正典，宮川豊章：短繊維のかさ容積による高強度繊維補強コンクリートの流動性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37, No. 1, pp. 307-312, 2015. 7
- 7) 後藤年芳，野島昭二：硬化コンクリート中の全塩化物イオン濃度迅速測定法の適用，土木学会第 65 回年次学術講演会，V-194, pp. 387-388, 2010. 9
- 8) Torrent, J. R. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol. 25, pp. 358-365, 1992.
- 9) 林和彦，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2, Vol. 69, No. 1, pp. 82-97, 2013.
- 10) 酒井雄也，岸利治：臨界浸透確率に基づく閾細孔径の抽出とコンクリート中の液状水移動の定量評価，土木学会論文集 E2, Vol. 72, No. 2, pp. 83-96, 2016.
- 11) (公社)土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2013. 3