

論文 繊維種類やマトリクスがひび割れを有する繊維補強モルタルの力学特性や塩分浸透特性に及ぼす影響

渡邊 有寿*1・一宮 利通*2・藤原 浩巳*3

要旨: 本研究では、塩害環境における繊維補強モルタルの力学特性や塩分浸透特性を明らかにするために、ひび割れを有する場合に着目し、水セメント比、短繊維の種類および混入量が及ぼす影響について温海水乾湿繰返し試験による促進試験にて検討を行った。ひび割れ幅 0.1mm 程度では促進試験後も曲げタフネスの低下は小さく、塩化物イオン拡散係数に最も影響を与えるのは W/C およびひび割れ深さであることが分かった。一方、短繊維を混入しないものと同一のひび割れ幅まで開口した場合には、マトリクスや短繊維の界面にはより大きな応力が生じているため、塩化物イオンの拡散係数が大きくなっている可能性がある。

キーワード: 繊維補強コンクリート, ひび割れ, 温海水乾湿繰返し, 曲げタフネス, 塩分浸透特性

1. はじめに

コンクリートまたはモルタルに短繊維を混入させた繊維補強セメント複合材料 (以下, FRCC) は、様々な構造物で利用が進められている。その目的は、引張強度、曲げ強度およびせん断強度の改善、剥落防止など多種多様であるが、主としてセメント系材料の弱点である脆性的な挙動すなわちひび割れ発生後の力学特性を改善することにある。ただし、短繊維を混入することによるひび割れ分散や引張応力負担によるひび割れ開口幅の抑制が構造物の耐久性にも影響することは自明である一方、その採用理由に耐久性の向上を挙げる事例は少ない。

近年では、より高性能な FRCC として超高強度繊維補強コンクリート¹⁾ (以下, UFC) や複数ひび割れ型繊維補強セメント複合材料²⁾ (以下, HPRCC) が開発され、土木学会で設計・施工指針案としてその定義や耐久性に関する基本的な考え方が示されている。UFC については、マトリクスが非常に緻密であるとともに使用状態でひび割れが発生しない状態を想定しているために耐久性照査を省略できるとされ、HPRCC では使用状態でひび割れが発生する状態を想定しているが、そのマトリクスや短繊維の特殊性から、ひび割れが微細に分散することを考慮した耐久性評価となっている。これら UFC や HPRCC は材料、配合および適用範囲を限定した中で耐久性の思想が整理されている。一方、普通コンクリートと同様の圧縮強度領域かつ短繊維を多量に使用しない繊維補強コンクリート (以下, FRC) は、その種類が多岐にわたり、これまでも鋼繊維補強コンクリートを中心に耐久性に関する検討は行われているものの³⁾、条件を統一した知見は不足している。

このような背景のもと、土木学会コンクリート委員会

表-1 使用材料

材料	記号	諸元
水	W	上水道水
セメント	C	早強ポルトランドセメント(密度 3.14g/cm ³)
細骨材	S	S1:八王子美山産, 硬質砂岩(表乾密度 2.63g/cm ³ , F.M.3.02), S2:君津産, 山砂(表乾密度 2.62g/cm ³ , F.M.1.72), S1:S2=78:22(容積比)
短繊維	SF	鋼繊維(φ0.62mm, L30mm, 両端フック, 密度 7.85g/cm ³)
	PVA	PVA 繊維(φ0.66mm, L30mm, ストレート, 密度 1.30g/cm ³ , ガラス転移温度 87°C)
	AF	アラミド繊維(φ0.4mm, L30mm, 収束タイプ, 密度 1.39g/cm ³ , ガラス転移温度 300°C)
	PP	PP 繊維(φ0.5mm, L30mm, 波型, 密度 0.91g/cm ³ , ガラス転移温度 100°C)

(小委員会)⁴⁾ では、コンクリート構造物の耐久性に FRCC が与える影響を明らかにすべく、統一した条件でのデータ拡充が必要とまとめている。例えば佐々木らの研究では、コンクリートやモルタルの塩分浸透特性に与える短繊維の影響について検討している^{5) 6)}。一方で、ひび割れを生じさせていないマトリクスでの評価や、鋼繊維に対して酸素の供給が少ない塩水浸せき試験となっているため、異なるアプローチでの検討も必要である。

そこで本研究では、マトリクスであるモルタルの水セメント比 (以下, W/C)、短繊維の種類および混入率を水準に、ひび割れを導入した繊維補強モルタル (以下, FRM) について、温海水乾湿繰返し試験後の力学特性や塩分浸透特性の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料、表-2 に FRM の配合を示す。本研

*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 工修 (正会員)

*2 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木構造グループ 上席研究員 工修 (正会員)

*3 宇都宮大学 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科 教授 工博 (正会員)

表-3 検討ケース一覧

促進環境	温水乾燥湿練返し(60℃人工海水浸せき 3.5 日 + 送風乾燥 3.5 日) ×15 サイクル																			
FRCC の種類	FRM																	UFC		
結合材の種類	早強ポルトランドセメント																	専用品		
W/C (%)	40									55									15	
短繊維種類	-	SF		PVA		AF		PP		-	SF		PVA		AF		PP		SF	
混入率 (vol.%)	0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.75	
曲げ試験	ひび割れなし	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
	ひび割れ幅 0.1mm	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	○	○	○	○	○	○	-
EPMA 分析	○	-	○	-	○	-	○	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	○

表-2 配合

種類	配合条件			単体量 (kg/m ³)			短繊維	
	W/C (%)	s/m (%)	Air (%)	W	C	S	種類	混入率 (vol.%)
FRM	40	55	6.0	215	538	1451	-	0
							SF	1.0
							PVA	
							AF	
							PP	
	55	57	6.0	235	427	1495	-	0
							SF	1.0
							PVA	
							AF	
							PP	
UFC	15	35	2.0	195	1287	905	SF 専用品	1.75

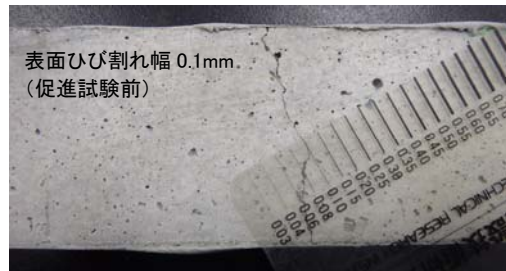


写真-1 供試体 (ひび割れ導入後)

究では、マトリクスに早強ポルトランドセメントを用いたモルタルを採用した。FRM 供試体は、同一のマトリクス (W/C=40%および 55%のモルタル) に対して各種短繊維 (SF: 鋼繊維, PVA: PVA 繊維, AF: 集束アラミド繊維, PP: ポリプロピレン繊維) を外割で 1.0vol.%および 2.0vol.%混入したものとした。練上がり直後の FRM のフレッシュ性状は、モルタルフロー (JIS R 5201, 15 打) が 150±25mm, 空気量 6.0±1.5%となるよう化学混和剤の使用量を調整した。なお、比較用にエトリンサイト生成系 UFC⁷⁾ を検討に加えた。

2.2 供試体の作製および検討ケース

本研究では、曲げ強度および塩分浸透特性の評価用に 40×40×160mm 供試体を作製し、材齢 1 日で脱型した後、材齢 28 日まで 20℃水中養生を行った。なお、比較用の UFC も同様の養生としている。養生後は、表-3 に示す検討ケースで評価を行った。詳細を以降に示す。

2.3 曲げ試験およびひび割れの導入

曲げ供試体は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準じ、切欠きのない 3 点曲げ試験を行った (支点間距離 120mm)。ひび割れ導入の際には、除荷後に表面のひび割れ幅が 0.1mm となるようにクラックスケールで観察をしながら管理した。なお、短繊維混入供試体はいずれも貫通ひび割れとはなっていない。一方、短繊維を混

入していないモルタルについてはひび割れ導入と同時に破断したため、貫通ひび割れを模擬して表面から深さ方向まで 0.1mm のひび割れとなるように破断面を貼り合わせ、固定した。ひび割れ導入後の供試体の状況を写真-1 に示す。UFC については、既報⁸⁾でひび割れ幅 0.1mm の検討をしているため、本研究では貫通ひび割れが生じるまで载荷を行った。なお、この際の表面のひび割れ幅は 0.35mm であった。

2.4 促進試験

供試体は、劣化促進試験として酸素、水および塩化物イオンの影響を考慮した温水乾燥湿練返し試験に供した。試験は「60℃人工海水浸せき 3.5 日 + 20℃送風乾燥 3.5 日」を 1 サイクルとし、計 15 サイクル行った¹⁾。なお、曲げ試験時に引張縁となる面を除く 5 面をエポキシでコーティングし、劣化因子の浸透はひび割れを有する 1 面のみとした。供試体はひび割れ導入面 (引張縁) が側面となるように立てた状態で試験槽内に設置した。

2.5 塩分浸透特性の評価

促進試験後の供試体の分析に際し、まず硝酸銀噴霧法⁹⁾によって塩化物イオンの浸透状況を簡易的に確認した。写真-2 に示すのは、短繊維を混入していない供試体の破断面に 0.1N の硝酸銀溶液を噴霧した後の様子である。写真のように暴露面から 20mm 程度までは白色化 (塩化銀が生成) していることを目視で確認したのち、JSCE-G574-2005「EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法 (案)」に準じて塩化物イオンの浸透状況を評価した。分析断面は 40×40mm であり、図-1 に示すよう

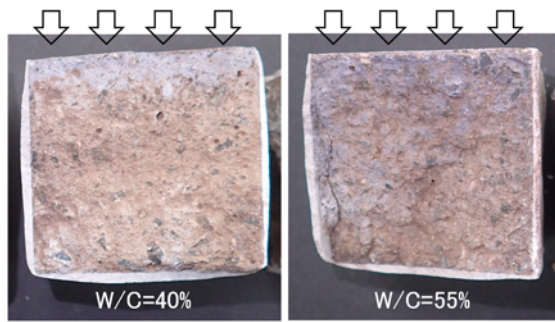


写真-2 硝酸銀溶液を噴霧した破断面（短繊維なし）

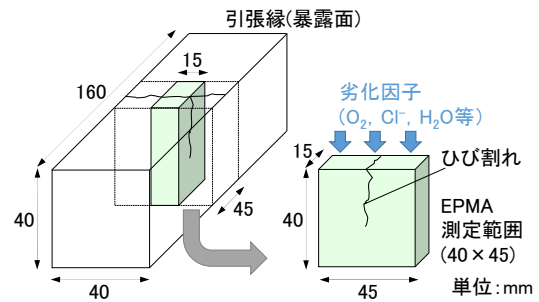


図-1 分析用試料の切出し

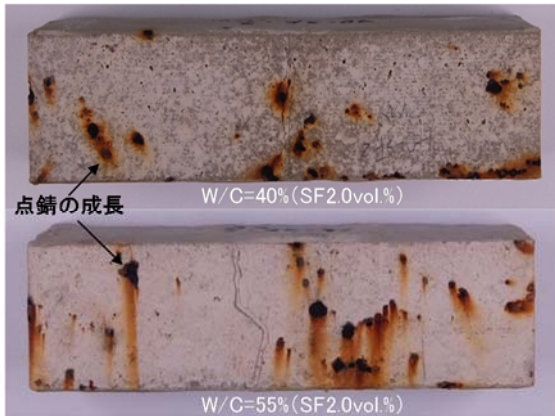
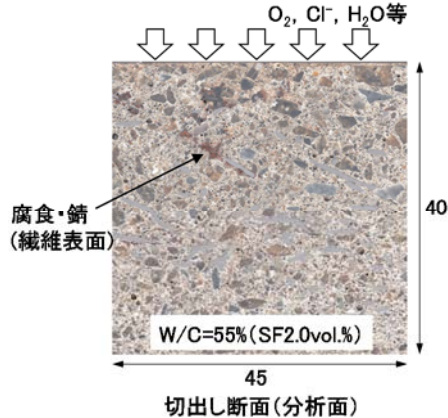


写真-3 促進試験後の供試体（鋼繊維混入）



に40×40×160mm 供試体のひび割れを跨ぐようにした。

3. 強度試験結果および考察

3.1 目視観察

促進試験後の供試体について、表面および内部の状況観察の一例として鋼繊維(SF)を用いたものを写真-3に示す。表面の点錆が成長しており、切出しによる確認では深さ約15mmの位置にある鋼繊維に腐食が見られたが、W/C=55%のマトリクスにおいても部分的なものであった。なお、いずれのケースにおいても促進試験後の供試体表面は促進試験前よりも全体的に白みがかっているとともに、マイクロクラックが発生し、その変化はW/C=40%よりも55%の方がより顕著であった。これは中性化や乾燥に伴う変状と考えられる。

3.2 曲げ強度試験

W/C=40%および55%における曲げ強度試験の結果として荷重-たわみ曲線をそれぞれ図-2 および図-3に示す。ここで、供試体のエポキシコーティングは曲げ強度に影響しないように除去している。結果は①促進前（ひび割れなし）、②促進後（ひび割れなし）、③促進後（ひび割れ幅0.1mm）として整理した。初期値である①促進前の曲げ強度およびタフネスは、W/Cや繊維混入率が同一の場合、概ねAF>SF>PP>PVAという順であった。なお、この結果は本研究で用いた短繊維の種類（引張強度、形状等）によるもので、これ以上の考察は割愛する。

①②促進前後（ひび割れなし）について、W/C、短繊維

の種類および混入率に関わらず初期ピークであるひび割れ発生強度は促進試験後に向上する傾向であった。これは、マトリクスの水和が進んだためと考えられる。ひび割れ発生以降のタフネスは全体的には促進試験後も変化は見られないが、PVAを2.0vol.%混入したものについて低下の傾向があった。ここで、既往の研究では本研究と同じ4種の素材からなる短繊維を2.0vol.%混入したFRMを100℃環境で長期暴露した際もPVAのみがタフネスが低下し、その影響はガラス転移温度によると考察されている¹⁰⁾。本研究での促進温度(60℃)はPVAのガラス転移温度87℃よりは低めであるが、親水基を有するPVA特有の性質と相まって、マトリクスと短繊維の付着界面に促進環境が影響を与えた可能性がある。今後詳細な組成分析が必要であるが、合成繊維を用いた場合には特に促進試験の温度設定に配慮が必要であると思われる。

次に、②③ひび割れの有無による結果についても、W/Cや短繊維の種類に関わらずタフネスが保持されている。ひび割れ導入時にマトリクスと短繊維の付着切れ（引抜け・滑り）が生じていると思われるが、ひび割れ幅0.1mm程度での载荷ではその影響は小さいものと考えられる。SFにおいても本研究の条件では、促進試験後もタフネスが保持されている。すなわち、酸素や水の供給により鋼材が腐食しやすい条件でも、ひび割れ幅0.1mm程度であればひび割れ部を架橋している箇所の鋼繊維が腐食せずに強度を保っている結果であった。

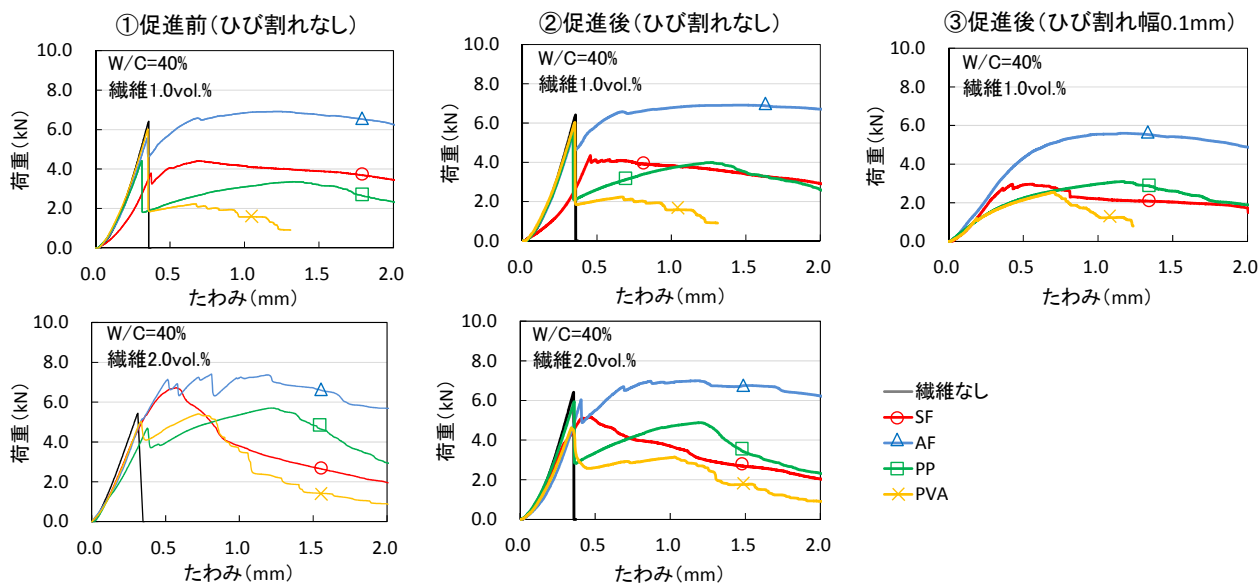


図-2 荷重-たわみ曲線 (W/C=40%)

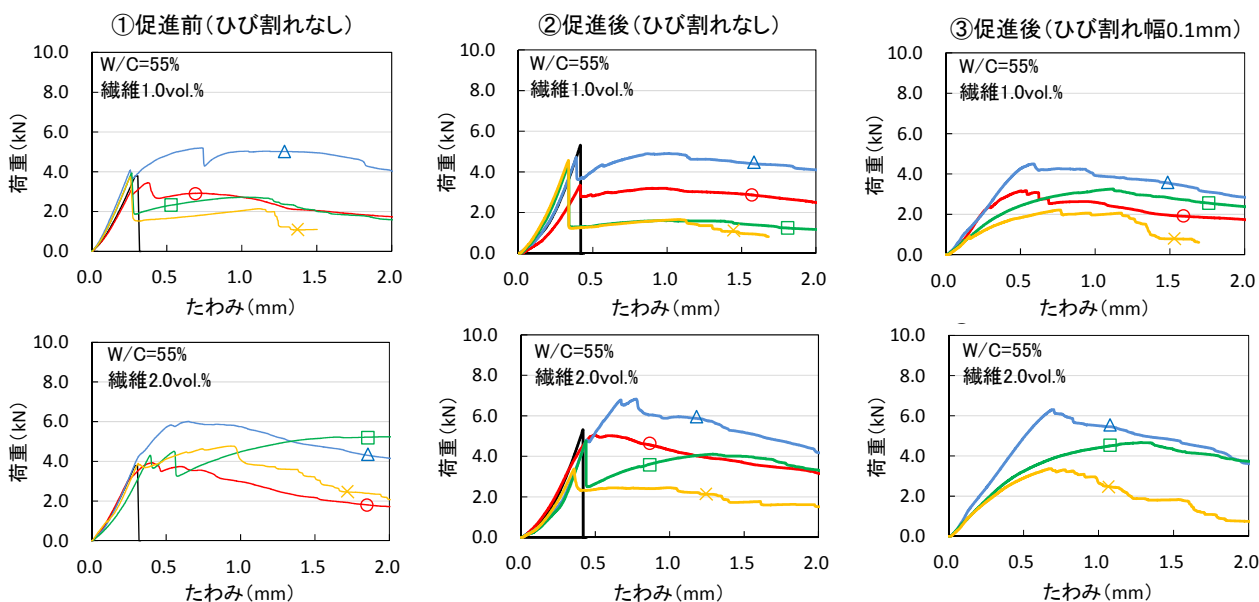


図-3 荷重-たわみ曲線 (W/C=55%)

4. 塩分浸透特性の評価および考察

4.1 塩化物イオンの浸透状況

促進試験後の供試体 (ひび割れ幅 0.1mm) について、EPMA による面分析の結果を表-4 に示す。ひび割れ深さは分析用に鏡面研磨した断面をマイクロSCOPEで観察し、ひび割れの先端位置から求めた。結果より、いずれのケースにおいても塩化物イオンはひび割れに沿って浸透の様子が確認された。これは既往の知見¹¹⁾ (表-4 中模式図) で示された浸透モデルと同様である。

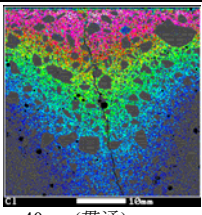
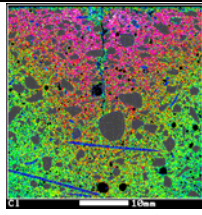
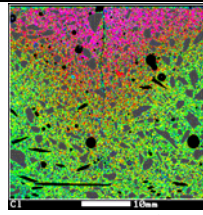
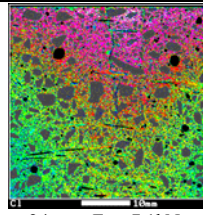
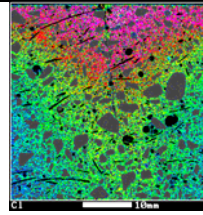
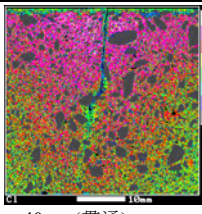
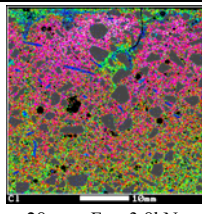
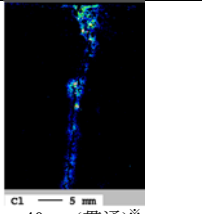
まず、短繊維混入なし (W/C=40%, 55%) および UFC (W/C=15%) のひび割れが貫通している条件に着目すると、W/C すなわちマトリクスの緻密さが塩化物イオンの浸透に大きく影響している。特に UFC はひび割れからマトリクス内部方向にも浸透していない。次に、W/C=40%

に着目すると、短繊維を用いた方がマトリクス内部へ浸透している。これは短繊維とマトリクスの界面が塩化物イオンの浸透経路となったと考えられ、既往のひび割れを導入していない FRM (塩水浸せき) の検討⁶⁾ と同じ傾向を示した。

4.2 塩化物イオン拡散係数の比較

EPMA 面分析による塩化物イオンの濃度分布から Fick の拡散方程式に基づく解析により見かけの拡散係数を算出した。なお、本研究では促進試験であることや分析面の大きさ (面積) による影響、ひび割れを介して 2 次元の現象を 1 次元の現象で取扱うことを考慮し、拡散係数の絶対値ではなく「短繊維混入なし」を基準とした比率で評価した。拡散係数の算出結果を図-4 に示す。W/C=40% の場合、短繊維の混入により拡散係数が 2~5

表-4 EPMA 面分析結果 (表面ひび割れ幅 b=0.1mm)

種類	W/C	短繊維なし	SF2.0vol.%	PVA2.0vol.%	AF2.0vol.%	PP2.0vol.%
FRM	40%	 a=40mm(貫通)	 a=31mm, Fcr=5.7kN	 a=24mm, Fcr=5.3kN	 a=24mm, Fcr=7.1kN	 a=22mm, Fcr=4.9kN
	55%	 a=40mm(貫通)	 a=28mm, Fcr=3.8kN	コンター図寸法: FRM 幅 45×深さ 40mm UFC 幅 30×深さ 40mm 劣化因子の浸透面: コンター図の上からのみ ここで, a : ひび割れ深さ b : 表面ひび割れ幅 (本研究では 0.1mm 一定) Fcr: 表面ひび割れ幅 b が 0.1mm となった際の荷重		
UFC	15%	 a=40mm(貫通)*	※貫通ひび割れ導入のため、表面ひび割れ幅 0.35mm まで載荷 (UFC のみ)			

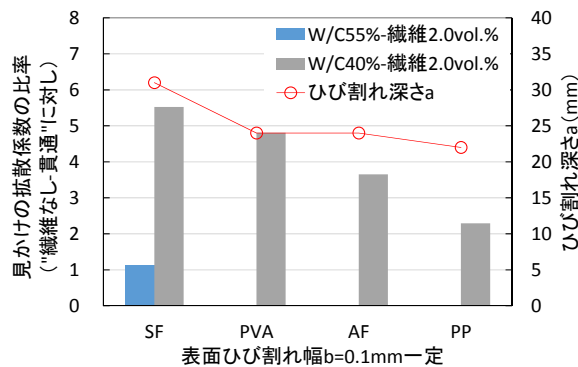
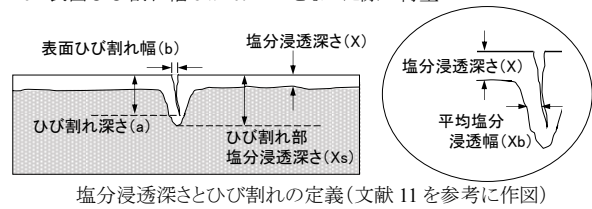


図-4 各種要因が拡散係数に与える影響その 1

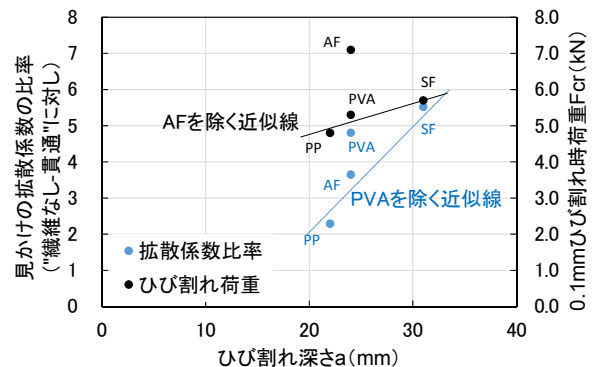


図-5 各種要因が拡散係数に与える影響その 2 (W/C=40%-繊維 2.0vol.%のみ)

倍程度まで大きくなる結果となり、ひび割れ深さとの関連性が見られた。これは一般的なコンクリートにおいては塩分浸透性に与える影響は表面のひび割れ幅よりも深さに依存するという既往の知見^{11) 12)}と同様である。

次に、短繊維の種類による影響を切り分けるために、0.1mm の表面ひび割れ幅を導入した時の載荷荷重 (Fcr) を加えて整理した結果を図-5 に示す。拡散係数の比率への着目では、ひび割れ深さと比例関係が見られる中で、PVA は塩分が浸透しやすい傾向が見られた。ひび割れや繊維が引き抜けた界面が塩化物イオンの浸透パスになると考えられるが、親水性を有する PVA の界面では、より水分と一緒に浸透しやすくなったものと推察される。

ひび割れ時の荷重への着目では、AF は同一のひび割れ幅に至るまでの荷重が他の繊維よりも大きい。これは、AF の繊維径が最も細く、同一の繊維混入率における本数が最も多いことや、収束時のより線加工がマトリクス

との機械的付着に寄与しているものと推察される。一方で、マトリクスとの付着特性が強いことは、同一ひび割れ条件において作用 (負担) する応力が大きく、マトリクスの付着界面を起点としたマイクロクラックが内部に発生している可能性もある。普通コンクリートにおける既往の知見^{13) 14)}では、凍結融解作用や乾燥によってマトリクス内部に微細なひび割れが発生すると拡散係数が数倍に大きくなるとしており、マクロ的視点のひび割れ深さだけでなく、今後はミクロ的視点での分析や考察も必要であると思われる。加えて、引張応力の負担により生じるマトリクスのひび割れのサイズ、短繊維との界面および相互の連結性は用いる短繊維の種類や混入率によって異なると考えられるため、それぞれの条件を整理する必要がある。

一方で、引張荷重下 (ひび割れ導入なし) における FRC

の検討では、本研究よりも繊維径が細いもの($\phi 0.04\text{mm}$)を用いた場合は、繊維長や混入量によっては拡散係数の変化率を抑制できるという報告もあり¹⁵⁾、今後のより詳細な検討やデータの拡充が必要であると思われる。

5. まとめ

本研究では、塩害環境における FRM の力学特性や塩分浸透特性を明らかにするために、特にひび割れを有する場合に着目し、W/C および短繊維をパラメータとした温海水乾湿繰返しによる促進試験によって各種検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ひび割れ幅 0.1mm 程度では、促進試験後も短繊維の種類によらず曲げタフネスが保持された。特に酸素や水といった鋼材が腐食しやすい条件でも、ひび割れを架橋する鋼繊維は健全であった。
- (2) PVA 繊維は促進試験によって曲げタフネスが低下する傾向であり、合成繊維のガラス転移温度などの化学的性質や温度設定にも配慮が必要である。
- (3) 塩化物イオンはひび割れに沿って浸透する様子が確認されたが、W/C すなわちマトリクスの緻密さによる影響が最も卓越する。
- (4) ひび割れを導入した条件では、短繊維を混入することでマトリクス内部方向に塩化物イオンが浸透しやすい結果となった。短繊維との界面の特性や荷重負担によるマトリクス内部へのマイクロクラックの影響と考えられる。

耐久性の観点で FRCC とする大きな目的や利点はひび割れ幅や深さの抑制によって主構造部材である鉄筋へ劣化因子が直接到達することを防ぐことであり、その効果から短繊維を混入することが塩化物イオンの浸透を助長する訳ではない。一方で、繊維を混入していないコンクリートと同等のひび割れ幅や深さになっている場合は、より大きな引張応力の負担がマトリクスや短繊維との界面に生じていることから、ひび割れ付近の拡散係数は大きくなっている可能性があることには思慮が必要であると思われる。

本研究で得られた知見は、ある促進条件や繊維条件によるものである。今後も FRCC の配合・種類は多岐に渡ると考えられ、耐久性に与える影響を明らかにすべく引き続き系統立てた条件による検討にてデータを蓄積していくことが望まれる。

参考文献

- 1) 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)、コンクリートライブラリー113, 2004
- 2) 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)、コンクリートライブラ

リー127, 2007

- 3) 例えば小林一輔, 星野富夫, 辻恒平：海洋環境下における鋼繊維補強コンクリートの鉄筋防食効果, 土木学会論文集, No.414/V-12, pp.195-203, 1990
- 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(第2期)委員会報告書, 2018.9
- 5) 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, pp.315-320, 2018
- 6) 佐々木亘, 恩田陽介, 谷口秀明：貧配合コンクリートの塩化物イオン拡散係数および中性化に与える短繊維の影響, 土木学会第73回年次学術講演会, pp.869-870, 2018
- 7) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書, 技術推進ライブラリー, No.3, 2006 (2011, 2016年に更新)
- 8) 渡邊有寿, 柳井修司, 宮口克一, 藤原浩巳：超高強度繊維補強コンクリートの海洋環境暴露後の疲労特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.217-222, 2017
- 9) Otsuki et al. : Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials, ACI Materials Journal, No.84, pp.587-592, Nov.1992
- 10) 岩井雅紀, 宮里心一：高温暴露が短繊維補強セメント系材料の力学的性質に及ぼす影響, 土木学会第70回年次学術講演会, pp.1261-1262, 2015
- 11) 伊代田岳史, 矢島哲司, 魚本健人：コンクリートのひび割れが塩分の浸透深さに及ぼす影響, 土木学会第53回年次学術講演会, pp.210-211, 1998
- 12) 齊藤準平, 柳沼善明：コンクリートの塩分浸透特性におよぼすひび割れ深さの影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.815-820, 2011
- 13) 竹田宣典, 十河茂幸：凍害あるいは中性化を受けたコンクリートの塩化物イオン浸透性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.797-802, 2003
- 14) 細谷多慶, 森脇拓也, 綾野克紀, 阪田憲次：コンクリート中の微細なひび割れが塩分浸透性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1011-1016, 2004
- 15) 迫井裕樹, 堀口敬, 志村和紀：引張荷重下における短繊維補強コンクリートの塩分浸透抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.947-952, 2006