

論文 HPFRCC を用いた部材の凍害と塩害に及ぼす凍結防止剤の影響

加藤 久也*1・浅野 幸男*2・小林 孝一*3・六郷 恵哲*4

要旨: 全断面に HPFRCC 等を用いた供試体（ひび割れ無し）と NC の上面を HPFRCC 等で 10mm 積層した供試体（ひび割れ有り）に、ASTM C 672 に準じた緩速凍結融解試験を行った。試験後に積層した供試体を割裂破壊し、破断面に硝酸銀発色試験を行った。次にはつり出した鉄筋表面の腐食面積率の算出を行った。その結果、凍結防止剤の種類に関わらず、HPFRCC は優れた耐スケーリング性、耐塩分浸透性を示した。一方、NC 層ではひび割れの両側に塩分の浸透が確認され、HPFRCC 層による下部の NC 層への物質透過抑制効果は確認されなかった。鉄筋の腐食は補修材ではなく、NC 層のひび割れ幅が支配的であることが確認された。

キーワード: 緩速凍結融解試験, 凍結防止剤, 硝酸銀発色試験, 腐食面積率, HPFRCC

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下 HPFRCC）は引張応力および曲げ応力作用下において、擬似ひずみ硬化挙動や複数微細ひび割れを形成する材料である。HPFRCC は、剛性の向上や疲労耐久性の向上を目的とした適用や、ひび割れ分散性や物質透過抑制を期待した適用が検討され、実施されている。

一方、凍害危険度が高い山間寒冷地等において、凍結防止剤の散布によってコンクリート橋脚や擁壁等に凍害および塩害による複合劣化が数多く確認され、ポリマーセメントモルタル（以下 PCM）等により補修が行われている。この様な複合劣化が生じている既設コンクリート構造物に対し HPFRCC を補修・補強材として適用する場合、凍害および塩害の複合劣化環境下における HPFRCC の効果を明らかにする必要がある。凍害あるいは塩害を受ける HPFRCC の補修・補強効果については研究されているが、これら 2 つの複合劣化環境下における補修・補強効果については十分には明らかにされていない¹⁾。

本研究では、全断面 HPFRCC の平板供試体（以下単一供試体）に NaCl 水溶液と CaCl₂ 水溶液を用いた緩速凍結融解試験を行い、凍結防止剤の差異が HPFRCC の耐凍害性に与える影響について検討した。続いて RC 母材に、厚さ 10mm の HPFRCC を積層させ、ひび割れを導入した平板供試体（以下積層供試体）に NaCl 水溶液を用いた緩速凍結融解試験を行った。続いて、割裂した供試体の割裂面に硝酸銀発色試験を行い、供試体内部の塩分浸透状況の確認を行った。その後、供試体からはつり出した腐食鉄筋の腐食状況および腐食面積率から、複数微細ひび割れを有した HPFRCC の補修・補強効果についての検

討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

各種供試体の概要を図-1 に示す。単一供試体は全断面を HPFRCC、PCM、普通コンクリート（以下 NC）、普通モルタル（以下 NM）で作製した梁供試体から、縦 50mm、横 100mm、幅 100mm の寸法で切り出して作製した。積層供試体は洗い出しにより表面処理した RC 梁供試体（鉄筋 D10 を 2 本配置）に、HPFRCC、PCM、NM を厚さ 10mm で積層後に引張荷重を行ってひび割れを導入し、縦 50mm、横 100mm、幅 100mm の寸法で切り出して作製した。各種材料の配合は、NC で水セメント比 55%、単位セメント量 318kg/m³、NM で水セメント比 55%、単位セメント量 273kg/m³、HPFRCC で水セメント比 30%、

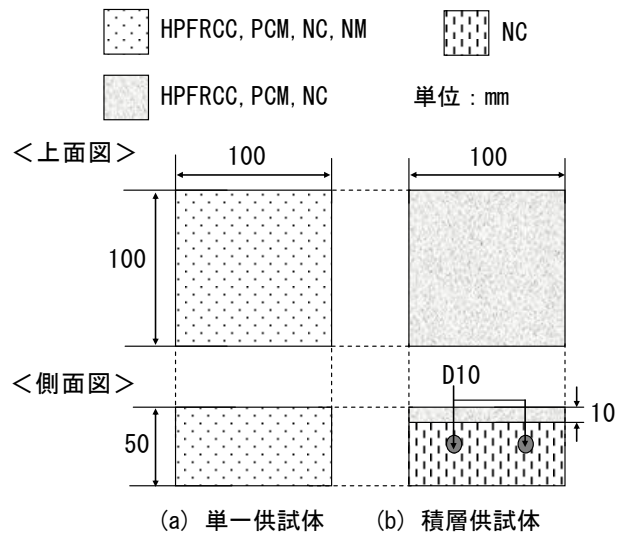


図-1 供試体概要

*1 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科准教授 博(工) (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

表-1 各種材料の物性値

	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	フロー値 (mm)		スランプ値 (cm)
			0打	15打	
HPFRCC	52.2	10.60	125.0	150.8	-
PCM	38.8	4.49	133.9	202.5	-
NM	44.6	2.90	109.9	200.0	-
NC	45.8	4.16	-	-	6.0

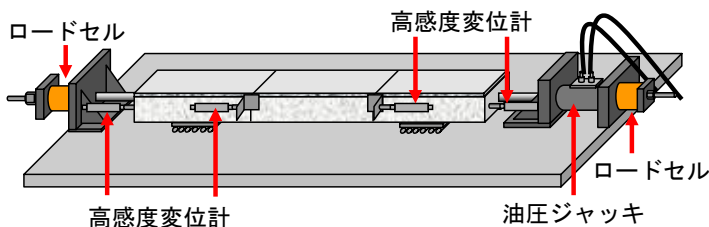


図-2 ひび割れ導入試験方法

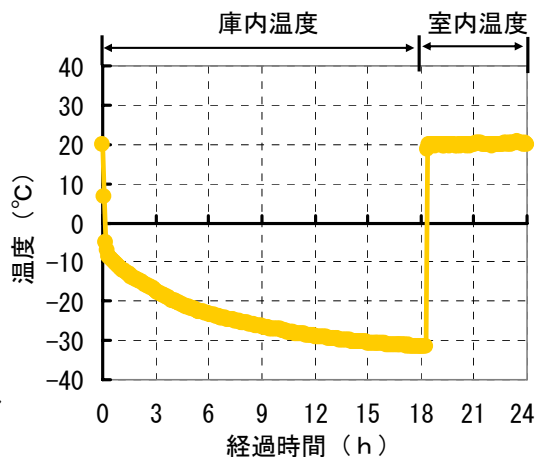


図-3 雰囲気温度の履歴

表-2 導入ひび割れ性状

導入ひび割れ水準	導入ひび割れ幅					
	HPFRCC		PCM		NM	
	補修材 (mm) 【本数 (本)】	母材 (mm) 【本数 (本)】	補修材 (mm) 【本数 (本)】	母材 (mm) 【本数 (本)】	補修材 (mm) 【本数 (本)】	母材 (mm) 【本数 (本)】
大	0.058 【15】	0.534 【1】	0.207 【1】	0.317 【1】	0.127 【1】	0.125 【1】
中	0.019 【12】	0.384 【1】	0.023 【1】	0.059 【2】	0.059 【1】	0.007 【1】
小	0.007 【2】	0.024 【2】	0.011 【1】	0.045 【1】	0.010 【1】	0.020 【1】

供試体名称 : 【例】 HPFRCC-小 (補修材: HPFRCC 導入ひび割れ水準: 小)

単位セメント量 1264kg/m³, PCM で粉体量に対する混和材量を 16%, 単位粉体量を 1905kg/m³ とした。HPFRCC には、長さ 9mm, 直径 0.012mm のポリエチレン繊維 (PE: 引張強度 2.6GPa, 弾性係数 88GPa, 密度 0.97g/cm³) を体積比で 1.5% 混入した。PCM には亜硝酸塩系防錆材入りの断面修復用 PCM を用いた。NM, NC には AE 減水剤 (ポゾリス No.70) を使用し、エントレンドエアを混入した。単一供試体, 積層供試体ともに脱型後 2 週間の湿潤養生を行った。また強度試験用として使用材料ごとに 100×100×400mm の角柱供試体, φ100×200mm の円柱供試体を作製した。供試体に用いた各種材料の物性値を表-1 に示す。

2.2 ひび割れ導入試験

ひび割れ導入試験方法²⁾を図-2 に示す。RC 梁供試体両端のネジ節鉄筋 D25 (供試体中で直径軸上に 2 本の鉄筋 D10 が溶接されている) にカプラーを用いて、ネジ節鉄筋 (D25) を継ぎ足した。床に固定した鋼製の反力板とセンターホール型油圧ジャッキを用いて、RC 梁供試体中の鉄筋 2D10 が降伏し徐荷後に残留ひび割れが残る程度まで引張荷重を行った。荷重を 2 個のロードセルにより計測し、供試体の全体変位と中央部 400mm 区間の変位を 4 個の高感度変位計により計測した。変位計を剛な床にマグネットスタンドにより固定し、変位計間の変

位の計測値の差から計測区間の変形を求め、載荷時の制御に用いた。導入ひび割れ幅は、載荷後に RC 梁供試体上面の中央長手方向をマイクロSCOPE (倍率 175 倍) で計測し、ひび割れ幅の検出を行った。その際、RC 梁供試体側面の積層部にマイクロSCOPE を用いて相対ズレの確認を行ったが、相対ズレは確認されなかった。補修材と母材とのひび割れ性状を表-2 に示す。複数のひび割れが生じている場合には、最大ひび割れ幅を代表値とした。

2.3 緩速凍結融解試験

本研究の緩速凍結融解試験は ASTM C 672 に示される温度履歴に準じ、凍結過程 20°C から -30°C, 融解過程 -30°C から 20°C を合わせて 24 時間とし、これを 1 サイクルとした (図-3 参照)。冷凍保存庫からの出し入れにより凍結融解過程を繰り返し、試験終了サイクルは 50 サイクルとした。試験水は、単一供試体では NaCl 3% 水溶液, CaCl₂ 3% 水溶液, 水道水 (以下 H₂O) とし、積層供試体では NaCl 3% 水溶液のみとした。NaCl, CaCl₂ は、一般に凍結防止剤として用いられる。供試体の一面から塩化物イオンを浸透させるため、全供試体の上面にシリコンで土手を作製した。また、融解過程における供試体の乾燥による塩化物イオンの引き込み防止および、ひび割れからの漏水防止を目的として、全供試体上面以外の 5

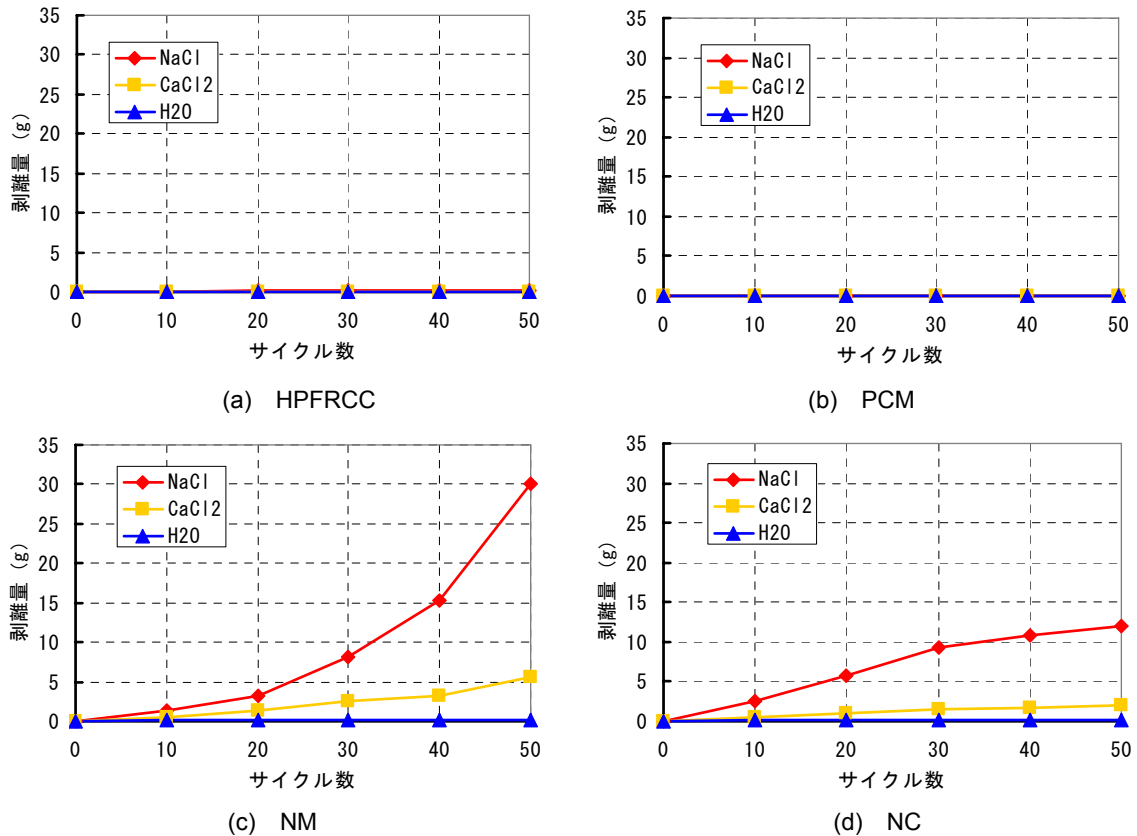


図-4 単一供試体における緩速凍結融解試験結果

面をシリコンでシーリングした。計測項目は剥離量とし、10 サイクル毎に採取した剥離物を炉内温度 105℃の乾燥炉内に入れ、乾燥後の定質量を剥離量として計測した。

2.3 硝酸銀発色試験

緩速凍結融解試験終了後、積層供試体断面の塩分浸透状況の確認を行うため、積層供試体を鉄筋の配筋方向に平行に割裂させた。割裂には、供試体の上面および下面の中心線に沿って鋼棒を配置し、圧縮する方法を用いた。その後、霧吹きで硝酸銀溶液を割裂面に散布し、供試体上面からの塩分浸透深さを中央と両端 15mm の計 3 点で計測した。計測箇所ではひび割れの両側に発色が確認され、計測が不可能だった場合は測定から除外した。割裂面全体の発色状況を確認することで、供試体内部への塩分浸透状況の確認を行った。

2.4 腐食面積率

硝酸銀発色試験終了後、チップングハンマーを用いて供試体を破碎し鉄筋をはつり出した。鉄筋の腐食面積率算出のために、はつり出した鉄筋に OHP 用紙をあてがって鉄筋の腐食箇所のトレースを行い、プランメーターを用いて鉄筋の腐食面積を計測した。得られた鉄筋の表面積と腐食面積より、鉄筋の腐食面積率を算出した。鉄筋の腐食面積率の算出式を、式(1)に示す。

$$\text{腐食面積率(\%)} = \frac{\text{腐食鉄筋表面積}}{\text{鉄筋表面積}} \times 100 \quad (1)$$

補修材料の違いによる鉄筋の腐食形態の差異、導入ひび割れ性状の違いによる鉄筋の腐食形態の差異を確認することを目的として、各補修材の鉄筋腐食形態の比較および腐食面積率の比較を行った。

3. 実験結果

3.1 緩速凍結融解試験

(1) 単一供試体

単一供試体の緩速凍結融解試験結果を図-4に示す。供試体別に着目して見ると、NM、NCでは試験開始僅か10 サイクルで顕著なスケールが確認され、試験終了時の供試体によっては上面が大きく抉れているものもあった。しかし、HPFRCC、PCMではスケールは全く確認されなかった。NM、NCに比べHPFRCC、PCMが優れた耐スケール性を示した原因として、見掛けの塩化物イオン拡散係数がNM、NCでは1.5cm²/年程度であるのに対し、HPFRCCでは0.5cm²/年程度、代表的なPCMでは0.4cm²/年程度(NaCl 10%水溶液、180日浸漬後)¹⁾であった。そのためNM、NCに比べHPFRCC、PCMでは供試体内に塩分が浸透しにくく、NM、NCに比べHPFRCC、PCMにおける塩分の濃度差による浸透圧が小

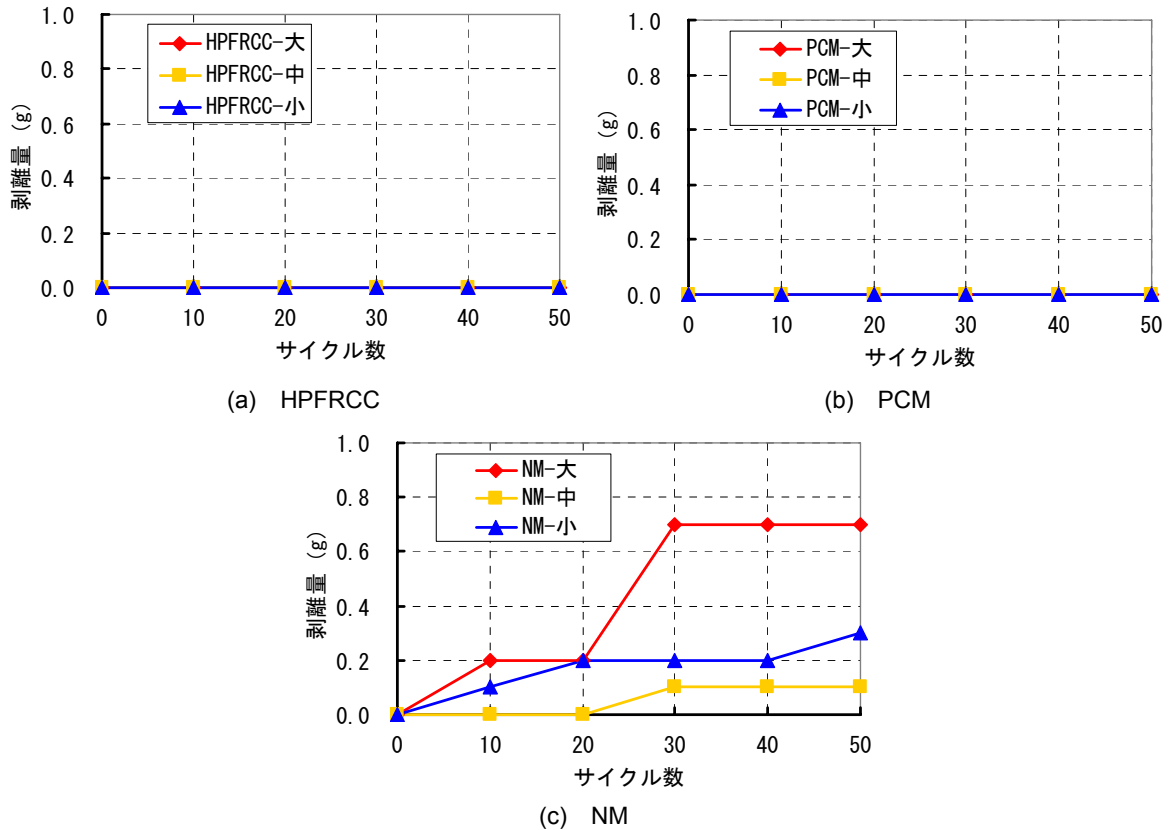


図-5 積層供試体における凍結融解試験結果

表-3 供試体上面からの平均塩分浸透深さ

		塩分浸透深さ (mm)						平均 (mm)
		No. 1			No. 2			
		左	中央	右	左	中央	右	
HPFRCC	大	2.5	2.0	2.0	-	-	3.0	2.2
	中	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	
	小	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	4.5	
PCM	大	-	-	4.0	6.0	-	5.0	5.1
	中	-	5.0	5.5	5.0	-	-	
	小	-	-	-	-	-	-	
NM	大	6.5	7.0	6.5	6.0	5.0	6.0	6.0
	中	5.0	6.0	5.0	7.0	7.0	5.0	
	小	6.5	7.0	6.0	6.0	6.0	5.0	

さくなくなったこと、HPFRCC、PCM が NM、NC と比べ、水セメント比が非常に小さく供試体内部が緻密であったこと、混入された繊維が供試体間を架橋することにより水分の膨張圧、塩分の浸透圧、結氷の氷圧に対して抵抗したことが考えられる。また、凍結防止剤の差異に着目してみると、スケールが確認された NM、NC では共に H₂O、CaCl₂ 水溶液、NaCl 水溶液の順にスケール量が大きくなった。特に NM、NC において CaCl₂ 水溶液を用いた供試体と比べ、NaCl 水溶液を用いた供試体では 50 サイクル終了時の剥離量が約 6 倍もの差となった。この様にスケール量に大きな違いが生じた原因として、原ら³⁾は、同一濃度の NaCl 水溶液、CaCl₂ 水溶液では結氷量が NaCl 水溶液の方が多く、CaCl₂ 水溶液

に比べ氷圧が大きくなった点と、供試体内部への塩分の浸透によって上面に向かって浸透圧が働き、NaCl 水溶液、CaCl₂ 水溶液の氷結時の濃度差によって浸透圧に違いが生じたことを挙げている。また、NC のスケール量が収束傾向にあるのに対し、NM のスケール量は加速的に大きくなった。その原因としては、NC 中に含まれる骨材が塩化物イオンの浸透を防ぎ浸透圧が NM に比べ小さくなった点と、凍結時における各種圧力に対して骨材が抵抗したためだと考えられる。

(2) 積層供試体

積層供試体の緩速凍結融解試験結果を図-5 に示す。凡例中の供試体名は、補修材の種類と導入ひび割れ水準を列挙した。HPFRCC 積層供試体と PCM 積層供試体では導入ひび割れ幅の大きさに関わらず剥離は確認されなかった。NM 積層供試体では導入ひび割れ幅の大きさによって僅かではあるが剥離量の違いが確認された。単一供試体の緩速凍結融解試験結果においては、NM で大きな剥離量が確認されたが、NM で積層した供試体では、剥離量は僅かであった。この違いの原因については今後検討したい。

3.2 硝酸銀発色試験

硝酸銀発色試験の結果を表-3 に示す。PCM-小供試体については供試体上面からの塩分浸透による変色が確認されなかったため、平均浸透深さ算出時の計算から

表-4 鉄筋表面の腐食面積率

		腐食面積 (cm ²)		平均腐食面積 (cm ²)	腐食面積率 (%)
		No. 1	No. 2		
HPFRCC	大	7.3	5.5	6.4	2.1
	中	5.5	4.3	4.9	1.6
	小	0	0	0	0.0
PCM	大	4	4.8	4.4	1.5
	中	3.3	0	1.65	0.6
	小	1.7	0	0.85	0.3
NM	大	3.2	4.7	3.95	1.3
	中	1.1	0	0.55	0.2
	小	0.7	0	0.35	0.1

除外した。50 サイクル終了時における NC, PCM の各供試体の浸透深さは約 5~6mm に対し HPFRCC では約 2mm であった。このことから補修材自体の耐塩分浸透性について HPFRCC は NC, PCM に比べ優れていると考えられる。また、割裂面全体では HPFRCC-小供試体以外の全ての供試体で導入ひび割れの両側に塩分による変色が確認された。特に HPFRCC-大供試体、HPFRCC-中供試体の割裂面における NC 層ではひび割れの両側に塩分の浸透が確認され、HPFRCC 層による下部の NC 層への物質透過抑制効果は本研究の範囲内では確認されなかった。3 種類の補修材とも、母材との界面に沿った塩分による変色を確認されなかったことから、本研究の範囲内において凍結融解作用による供試体界面への影響は小さかったと考えられる。

3.3 腐食面積率

鉄筋表面の腐食面積率の結果を表-4 に示す。補修材の種類、導入ひび割れ幅に関わらず腐食面積率に違いが確認された。特に HPFRCC-中の供試体では、PCM-中、NC-中供試体に比べ腐食面積率が大きな値を示した。そこで母材のひび割れ幅に着目して、腐食面積率と母材ひび割れ幅との関係を図-6 に示す。その結果、補修材の種類に関わらず、母材のひび割れ幅が 0.1mm 以下の供試体では腐食面積率に増加傾向が確認され、母材のひび割れ幅が 0.1mm 以上の供試体では腐食面積率の増加傾向が緩やかになった。このことから、母材に HPFRCC, PCM といった耐塩害性に優れた材料を補修材として積層した場合でも、鉄筋腐食は鉄筋が配筋されている母材のひび割れ性状が支配的であったといえる。ここで塚原ら⁴⁾により、普通コンクリートの場合、導入したひび割れ幅が 0.075mm 以下ではひび割れ幅の増大に伴い塩化物イオン拡散係数は増加し、0.075mm 以上では塩化物イオン拡散係数が一定になることが報告されている。塚原らの試験により得られた結果を縦軸に塩化物イオン拡散係数 (D_{cr}) cm²/sec の対数表示値を、横軸に供試体に導入したひび割れ幅として図-7 に示す。図-6、図-7 より腐

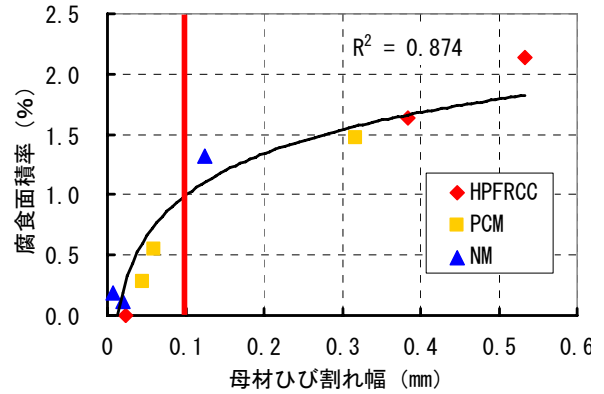


図-6 腐食面積率と母材ひび割れ幅の関係

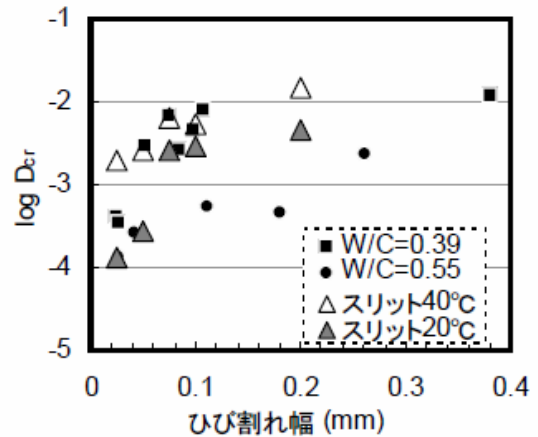


図-7 塩化物イオン拡散係数とひび割れ幅の関係(塚原らの実験⁴⁾より引用)

食面積率と母材のひび割れ幅、塩化物イオン拡散係数とひび割れ幅の関係と同じ傾向が見受けられたことと、塩化物イオン拡散係数は単位時間当たりに塩化物イオンが浸透する領域を示していることから、腐食面積率と塩化物イオン拡散係数には相関があると考えられる。本研究の結果および既往の研究⁵⁾を踏まえると、HPFRCC の防食を期待して HPFRCC を RC 構造物に用いる場合、鉄筋が HPFRCC 内に配置されることと HPFRCC 厚を十分大きくすることが望まれる。

4. まとめ

本研究では全断面 HPFRCC の単一供試体と、上面 10mm を HPFRCC で積層してひび割れを導入した積層供試体に ASTM C 672 に規準した緩速凍結融解試験を実施した。その後積層供試体について割裂試験を行い、割裂面に硝酸銀発色試験を行った。続いて鉄筋のはつり出しを行い、鉄筋の腐食面積率の算出を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 単一供試体の緩速凍結融解試験において、NM, NC では顕著な剥離量が確認されたが、HPFRCC, PCM では 50 サイクル終了時においても剥離量は殆ど確認

されなかった。また、NCの剥離量が50サイクル終了時において収束傾向を示したのに対し、NMでは加速的な増加傾向を示した。

- (2) 試験水にCaCl₂3%水溶液を用いたNM, NCの剥離量に比べNaCl3%水溶液を用いたNM, NCの剥離量が、50サイクル終了時において約6倍となった。
- (3) 積層供試体の緩速凍結融解試験において全供試体で剥離量は1.0g以下であり、導入ひび割れ幅の差異による剥離量の顕著な違いは確認されなかった。しかし、ひび割れが有る場合では無い場合に比べ剥離量が小さくなった。
- (4) HPFRCCの塩分浸透深さは上面から約2mmでありPCM, NMと比べ約1/3程度であった。しかし、ほぼ全ての供試体で導入ひび割れの両側に塩分による発色が確認され、本研究の範囲内ではHPFRCCの物質透過抑制効果は確認されなかった。
- (5) 導入した母材ひび割れ幅が0.01mm以下の供試体では鉄筋の腐食面積率は増加傾向を示し、0.01mm以上では腐食面積率の増加傾向が緩やかになった。

参考文献

- 1) 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，No.127，資料 pp.19-37，2008.3
- 2) 林承燦，閑田徹志，水野勇，六郷恵哲：ひずみ硬化型高靱性セメント複合材料で作製した部材の引張性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1525-1530，2004
- 3) 原忠勝，月永洋一，庄谷征美：凍結防止剤の種類がコンクリート中の温度変化とスケーリング量に及ぼす影響に関する実験的研究，日本コンクリート工学会，融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会 報告書・論文集，pp.177-182，1999.11
- 4) 塚原絵万，加藤佳孝，魚本健人：塩化物イオンの移動評価におけるひび割れのモデル化，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.573-578，2002
- 5) 久保田憲，林承燦，森山守，宮里心一：マルチプルクラックを有する複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の塩害に対する耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.429-434，2007