

論文 繊維混入率が HPFRCC の塩分透過抑制機能に及ぼす影響

倉知 星人^{*1}・加藤 善史^{*2}・小林 孝一^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：繊維混入率が 1.5, 1.0, 0.75% の複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下 HPFRCC）とポリマーセメントモルタル（以下 PCM）を補修材として用いた供試体を作製した。供試体に塩水散布を行った後、硝酸銀発色試験、供試体内部の鉄筋の腐食度調査により、補修材としての HPFRCC の鉄筋防食性能の検討を行った。また、表面被覆と断面修復を想定した供試体を作製した。その結果、HPFRCC は PCM に比べ優れた耐塩分浸透性を示し、鉄筋を HPFRCC 内に配置することによって、HPFRCC のひび割れ分散性がより発揮されるため、HPFRCC は断面修復材として用いた場合に特に鉄筋防食性が高いことが明らかとなった。

キーワード：HPFRCC, 繊維混入率, 塩分透過抑制機能, 鉄筋腐食

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、引張応力下において、複数微細ひび割れを形成し、擬似ひずみ硬化挙動を示す材料である。HPFRCC は、疲労耐久性の向上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。このように優れた材料性質を有する HPFRCC の利用を拡大するには、上記のような性能を確保したうえでの施工性の向上が重要である。

この点に着目し、繊維混入率を小さくし施工性向上を図るといった研究は以前から行われている。一般に、HPFRCC には、高強度ポリエチレン（PE）繊維や高強度ビニロン（PVA）繊維が体積比で 1.5～2.0% 程度用いられるが、繊維混入率を小さくした HPFRCC が示す引張ひずみ硬化性状ならびに複数微細ひび割れ発生状況を、確認した研究は報告されている¹⁾。しかし、繊維混入率を小さくした場合の複数微細ひび割れ発生状況が、塩化物イオンの透過抑制機能に与える影響については明らかにされていない。

そこで本研究では、繊維混入率を 1.5, 1.0, 0.75% と変化させた HPFRCC を補修材として用いた供試体を作製し、ひび割れを導入した。そして、供試体に塩水散布を行なう劣化促進環境においた後、硝酸銀発色試験によ

る供試体内部の塩分浸透状況、供試体内部の鉄筋の腐食度調査を実施することにより、複数微細ひび割れを有した HPFRCC の補修材としての鉄筋防食性能についての検討を行った。また、表面被覆と断面修復を想定し、HPFRCC をかぶりコンクリート上に積層したものと、鉄筋背面まで充填したものを作製した。なお、補修材としてポリマーセメントモルタル（以下 PCM）を用いた供試体、普通コンクリート（以下 NC）を全断面に用いた供試体を作製し、比較検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

材料は母材に NC (W/C=55%)、補修材には HPFRCC, PCM を用いた。

NC, HPFRCC の配合を表-1 に示す。NC に用いた粗骨材の最大寸法は 15mm, NC, HPFRCC には早強ポルトランドセメントを使用した。HPFRCC には $\phi 0.012 \times 12\text{mm}$ の高強度ポリエチレン繊維を使用し、細骨材には 7号珪砂を使用した。また、混和剤として高性能 AE 減水剤と増粘剤を使用した。PCM は補修用（低収縮タイプ）のプレミックスのものを使用した。

2.2 供試体概要

供試体概要を図-1 に示す。単一供試体は HPFRCC,

表-1 各種材料の配合表

材料	繊維種類	繊維混入率 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)								
				W	C	7号珪砂	S	G	Ad ₁	Ad ₂	増粘剤	繊維
NC	-	0	55	180	327	-	810	920	0.8175	-	-	-
HPFRCC	PE	1.5	30	342	1264	395	-	-	-	37.9	0.9	14.6
HPFRCC	PE	1.0	30	342	1264	395	-	-	-	37.9	0.9	9.7
HPFRCC	PE	0.75	30	342	1264	395	-	-	-	37.9	0.9	7.3

※W/C は水セメント比, W は水, C はセメント, S は細骨材, G は粗骨材, Ad₁ は AE 減水剤, Ad₂ は高性能 AE 減水剤である。

*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

*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)

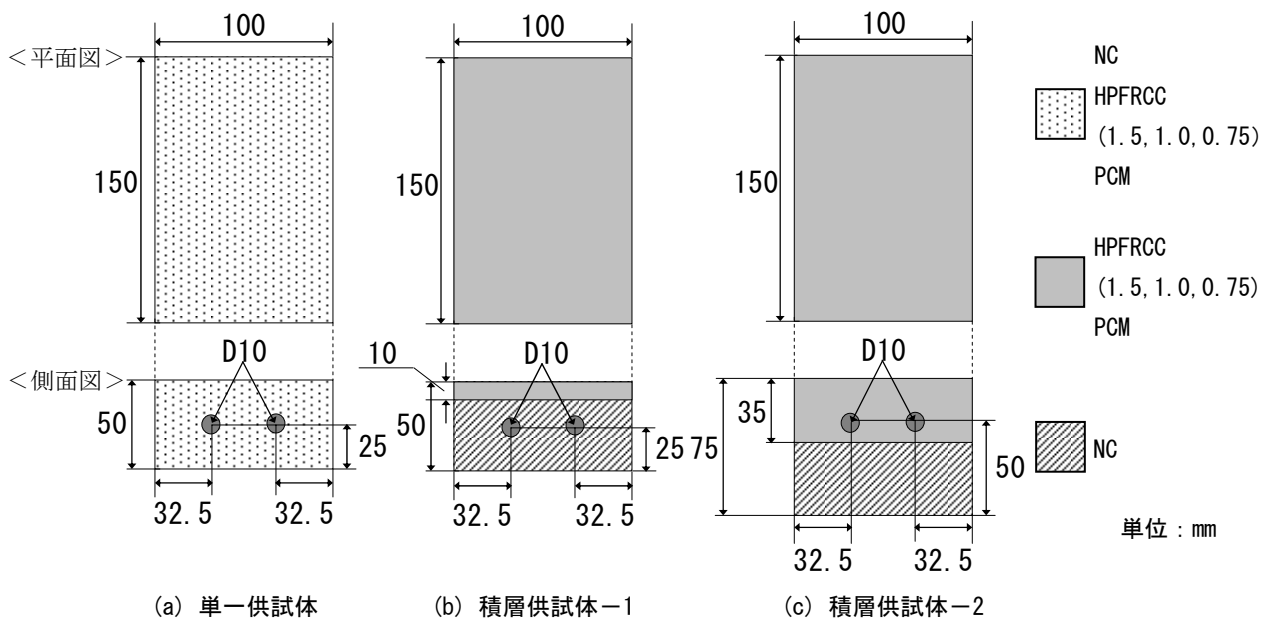


図-1 供試体概要

表-2 各種材料の物性値

供試体名	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	空気量 (%)	フロー値 (mm)		スランプ値 (cm)
				0打	15打	
HPFRCC (1.5%)	35.8	9.4	15.7	135.5	162.0	—
HPFRCC (1.0%)	56.4	7.1	15.3	156.0	185.0	—
HPFRCC (0.75%)	65.0	7.0	12.0	183.5	205.0	—
PCM	35.9	6.3	—	—	—	—
NC	47.1	1.4	3.9	—	—	5.8

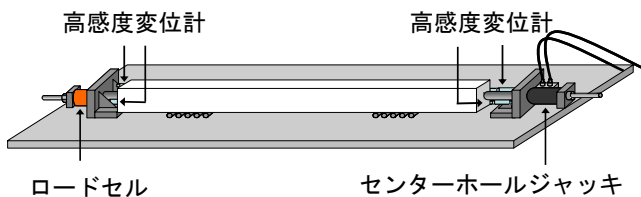


図-2 ひび割れ導入方法

PCM, NC を用いて、断面が 50mm×100mm、全長 1800mm の梁供試体を作製し、ひび割れを導入した後、長さ 150mm の寸法で切り出して作製した。NC を用いた単一供試体はひび割れを導入しないものも作製した。積層供試体-1 は表面被覆を想定した供試体であり、洗い出しにより表面処理した断面が 40mm×100mm、全長 1800mm の RC 梁供試体に、HPFRCC, PCM を厚さ 10mm で積層した。その後ひび割れを導入し、長さ 150mm の寸法で切り出して作製した。積層供試体-2 は断面修復を想定した供試体であり、洗い出しにより表面処理した断面が 40mm×100mm、全長 1800mm の NC 梁供試体に、HPFRCC, PCM を厚さ 35mm で積層した。その後ひび割れを導入し、長さ 150mm の寸法で切り出して作製した。全ての供試体において、長さ方向に D10 をかぶり 20mm で配置した。各供試体とも脱型後 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毎に 100×100×400mm の角柱供試体を 3 体、φ100×200mm の円柱供試体を 3 体作製した。

各種材料の物性値を表-2 に示す。この表に示すように、繊維混入率が小さな HPFRCC は、フロー値が大きく、施工性に優れると考えられる。

2.3 ひび割れ導入

ひび割れ導入方法を図-2 に示す。RC 梁供試体両端のネジ筋鉄筋 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、ネジ筋鉄筋（D25）を継ぎ足した。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一軸引張载荷を行った。

NC 単一供試体については、ひび割れ幅が 0.4mm に達するまで、積層供試体では NC 母材側でひび割れ幅が 0.4mm に達するまで、引張り载荷を行った。HPFRCC および PCM の単一供試体では、同じ材料の積層供試体で NC 母材側においてひび割れ幅が 0.4mm となった時点での積層材側のひび割れ幅を目標に、引張り载荷を行った。荷重をロードセルにより計測し、供試体全体の伸びと中央部 400mm 区間の伸びを 4 個の高感度変位計により計測し载荷の制御に用いた。

ひび割れ導入後に梁供試体の上面、下面をマイクロスコープ（倍率175倍）で計測し、ひび割れ幅の測定を行った。補修材、母材のひび割れ性状を表-3に示す。なお、供試体1体につき母材側のひび割れは1本であり、補修材側には多数のひび割れが発生しているが、表-3に示したひび割れ幅は、このうち、母材側のひび割れに直

結している補修材側のひび割れの幅である。また、表-3中の補修材側のひび割れ幅の鉄筋1, 鉄筋2は, 供試体に鉄筋が平行に2本, 配置してあるため, ひび割れ幅を2本の鉄筋上で測定したものである。

2.4 劣化促進環境 (塩水散布)

劣化を促進させるため, 塩化ナトリウム水溶液 (3%) を6時間毎に5分間, 供試体に散布した。散布期間は60日に設定し, 定期的に供試体の状況の観察を行った。ま

た, 供試体上面のみから塩化物イオンを浸透させるため, 上面以外の5面はシリコンでシーリングした。

2.5 硝酸銀発色試験

塩水散布終了後, 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, 載荷する方法を用いた。その後, 霧吹きで硝酸銀溶液 (0.1mol/l) を割裂面に散布し, 供試体上面からの塩分浸透深さを計測した。割裂面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。

2.6 腐食面積率算出方法

硝酸銀発色試験終了後, 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 用フィルムをあてがって鉄筋の腐食箇所のトレースを行い, プラニメーターを用いて鉄筋の腐食面積を計測した。得られた鉄筋の腐食面積と表面積より, 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。

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

2.7 腐食鉄筋の最小断面積算出方法

腐食面積計測後, 非接触式レーザー3D スキャナーを用いて, 腐食箇所を長さ方向に0.6mmピッチ, 円周方向に0.18°ピッチでスキャンし, 鉄筋の表面形状を測定した上でこの区間での最小断面積を求めた。

3. 実験結果

3.1 硝酸銀発色試験

硝酸銀発色試験の結果, 発色状況の一例を図-3, 写

表-3 導入ひび割れ性状

供試体名	ひび割れ幅 (mm)	
	母材側	補修材側 (鉄筋1) (鉄筋2)
HP1.5-単-①	—	0.04 0.03
HP1.5-単-②	—	0.02 0.03
HP1.5-積1-①	0.38	0.03 0.04
HP1.5-積1-②	0.41	0.02 0.06
HP1.5-積2-①	0.32	0.02 0.02
HP1.5-積2-②	0.51	0.12 0.05
HP1.0-単-①	—	0.04 0.03
HP1.0-単-②	—	0.03 0.04
HP1.0-積1-①	0.40	0.02 0.05
HP1.0-積1-②	0.39	0.03 0.04
HP1.0-積2-①	0.39	0.03 0.03
HP1.0-積2-②	0.40	0.06 0.05
HP0.75-単-①	—	0.11 0.11
HP0.75-単-②	—	0.05 0.08
HP0.75-積1-①	0.40	0.06 0.06
HP0.75-積1-②	0.37	0.03 0.03
HP0.75-積2-①	0.40	0.01 0.02
HP0.75-積2-②	0.40	0.04 0.01
PCM-単-①	—	0.25 0.33
PCM-単-②	—	0.69 0.53
PCM-積1-①	0.41	0.65 0.57
PCM-積1-②	0.40	0.52 0.56
PCM-積2-①	0.62	0.43 0.43
PCM-積2-②	0.36	0.38 0.36
NC-単-①	0.43	0.36 0.47
NC-単-②	0.42	0.63 0.65
NC-ひび割れ無し-単-①	—	—
NC-ひび割れ無し-単-②	—	—

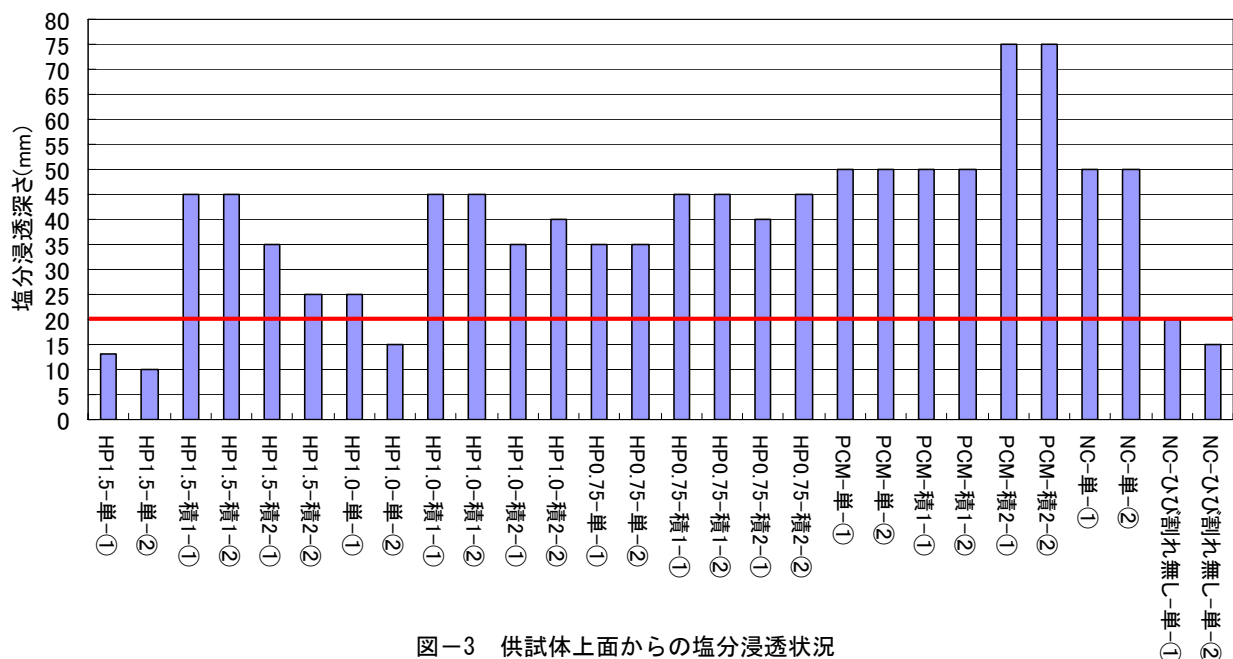


図-3 供試体上面からの塩分浸透状況

真-1 に示す。図-3 中の赤線は供試体上面からの鉄筋の位置を示す。また、HPFRCC については、繊維混入率毎の平均値、供試体形状毎の平均値を図-4、表-4 に示す。本実験での塩分浸透深さは、ひび割れ位置で計測したものである。

PCM を用いた供試体は、単一供試体、積層供試体-1、積層供試体-2 の3種類のすべての供試体で、塩分は上面から下面までに達していた。また、NC を用いた供試体ではひび割れを有するものは PCM と同様の結果になり、ひび割れの無いものについては、ひび割れが無いにも関わらず、供試体 2 体中の 1 体が 20mm、もう 1 体も 15mm とほぼ鉄筋位置まで塩分が浸透した。

HPFRCC は単一供試体、積層供試体-2 で NC、PCM に比べて、明らかに塩分浸透深さは浅くなり、積層供試体-1 でもわずかであるが塩分浸透深さは浅くなった。これらは、HPFRCC は繊維が架橋し、引張力を分担することにより NC、PCM に比べひび割れが緻密に入り、かつひび割れ幅が非常に小さいことが要因であると考えられる。これらから、HPFRCC は NC、PCM に比べ優れた耐塩分浸透性を有していると考えられる。

HPFRCC を用いた供試体を繊維混入率で比較すると、繊維混入率が低くなるにつれて、塩分浸透深さが深くなった。これは、本実験では母材側のひび割れ幅を統一しており、補修材側のひび割れ幅は使用した材料の物性に依存するため、HPFRCC の繊維混入率を小さくすると、ひび割れ幅が大きくなることが要因であると考えられる¹⁾。このことは、本実験でも表-3 のひび割れ性状から確認できる。

同じ繊維混入率で積層方法の違うものを比較すると、すべての繊維混入率の HPFRCC で、単一供試体、積層供試体-2、積層供試体-1 の順に塩分浸透深さが深くなった。これは、単一供試体、積層供試体-2 は鉄筋が HPFRCC 内に配置されているため、HPFRCC と鉄筋との付着力によりひび割れが局所化することなく、鉄筋近傍のひび割れ幅が、積層供試体-1 に比べて小さいためだと考えられる。

3.2 腐食面積率

鉄筋表面の腐食面積率の結果を表-5 に示す。補修材の種類で比較すると、PCM、ひび割れ導入した NC はすべての鉄筋で腐食が確認された。一方、HPFRCC を用いた供試体は、積層供試体-1 では腐食が確認されたが、単一供試体、積層供試体-2 では大きな腐食は確認されなかった。これは、3.1 節で述べたと同様に、単一供試体、積層供試体-2 は鉄筋が HPFRCC 内に配置されているため、鉄筋近傍のひび割れ幅が、積層供試体-1 に比べて小さいためだと考えられる。

HPFRCC を用いた供試体を繊維混入率で比較すると、

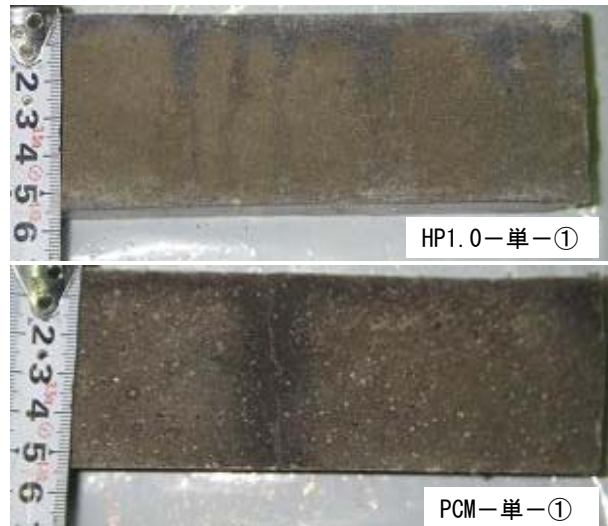


写真-1 発色状況



図-4 塩分浸透状況（繊維混入率毎の平均値）

表-4 塩分浸透状況（供試体形状毎の平均値）

供試体シリーズ	平均塩分浸透深さ (mm)
HP1.5-単	11.5
HP1.5-積1	45
HP1.5-積2	30
HP1.0-単	20
HP1.0-積1	45
HP1.0-積2	37.5
HP0.75-単	35
HP0.75-積1	45
HP0.75-積2	42.5

本研究の範囲内では大きな差は確認されなかった。しかし、3.1節の硝酸銀発色試験では、繊維混入率が低くなるにつれて、塩分浸透深さが深くなったことから、この点については、今後、長期間の試験による検討が必要であると考えられる。

本研究の結果および既往の研究²⁾を踏まえると、HPFRCCの耐塩害性を期待してHPFRCCをRC構造物に用いる場合、鉄筋をHPFRCC内に配置することによって、HPFRCCのひび割れ分散性がより発揮されるため、HPFRCCに鉄筋防食性能を期待する場合には、鉄筋背面までHPFRCCを充填して鉄筋と一体化させることによ

って、さらに優れた耐久性を期待できるといえる。

3.3 最小断面積

腐食鉄筋の最小断面積の計測結果を表-6 に示す。ここで非接触式レーザー3D スキャナーを用いて、算出した健全鉄筋の最小断面積は 64.83mm² であり、腐食していない鉄筋については断面積の計測を行っていないため斜線で表記する。また、使用材料毎の平均値を図-5 に示す。ここで単一供試体、積層供試体-2 は腐食しているものが少ないため、積層供試体-1 のみの平均値である。

鉄筋が腐食した際に、力学的な弱点となるのは、局所的に腐食し最も断面積が小さくなった部分である³⁾。本実験で使用した材料で比較すると、HPFRCC、PCM、NC の順に断面積が小さくなったことから、HPFRCCはNC、PCM に比べ耐塩害性に優れていると考えられる。また、HPFRCC を用いた供試体を繊維混入率で比較すると、本研究の範囲内では大きな差は確認されなかった。しかし、3.2 節で述べた鉄筋の腐食面積と同様に、この点については、今後検討が必要であると考えられる。

表-5 鉄筋表面の腐食面積率

供試体名	腐食面積 (cm ²)		腐食面積率 (%)	
	鉄筋1	鉄筋2	鉄筋1	鉄筋2
HP1.5-単-①	0	0	0	0
HP1.5-単-②	0	0.2	0	0.4
HP1.5-積1-①	3.7	3.3	8.2	7.3
HP1.5-積1-②	1.1	0	2.4	0
HP1.5-積2-①	0	0	0	0
HP1.5-積2-②	0	0	0	0
HP1.0-単-①	0	0.2	0	0.4
HP1.0-単-②	0	0	0	0
HP1.0-積1-①	4.7	4.5	10.4	10
HP1.0-積1-②	3.1	3.2	6.9	7.1
HP1.0-積2-①	0.1	0	0.2	0
HP1.0-積2-②	0	0	0	0
HPO.75-単-①	0	0	0	0
HPO.75-単-②	0	0	0	0
HPO.75-積1-①	3.7	4.2	8.2	9.3
HPO.75-積1-②	0	2.6	0	5.8
HPO.75-積2-①	0	0	0	0
HPO.75-積2-②	0	0	0	0
PCM-単-①	2	1.6	4.6	3.7
PCM-単-②	2.9	2.2	6.6	5
PCM-積1-①	3.4	4.8	7.8	11
PCM-積1-②	4.1	2.5	8.9	5.4
PCM-積2-①	2.8	4	6.2	8.9
PCM-積2-②	0	0.4	0	0.9
NC-単-①	5.5	7.8	12.2	17.3
NC-単-②	5	5.4	11.1	12
NC-ひび割れ無し-単-①	0.2	0.3	0.4	0.7
NC-ひび割れ無し-単-②	0	0	0	0

4. まとめ

本研究では、鉄筋のかぶりを 20mm として、HPFRCC を全断面に用いた単一供試体と、RC に補修材として厚さ 10mm の HPFRCC を積層させた積層供試体-1、NC に厚さ 35mm の HPFRCC を積層させた積層供試体-2 を、HPFRCC の繊維混入率を 1.5、1.0、0.75% の 3 種類で作製

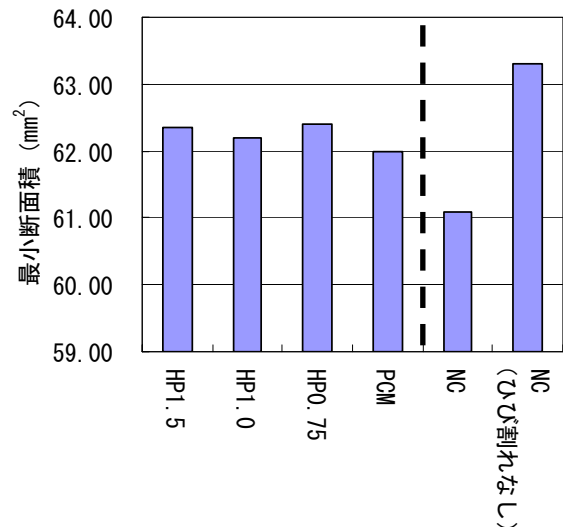


図-5 腐食鉄筋の最小断面積
(材料毎の平均値, HP, PCM は積層供試体-1 のみ)

表-6 腐食鉄筋の最小断面積

供試体名	最小断面積 (mm ²)	
	鉄筋1	鉄筋2
HP1.5-単-①	/	/
HP1.5-単-②	/	63.20
HP1.5-積1-①	62.38	62.74
HP1.5-積1-②	61.97	/
HP1.5-積2-①	/	/
HP1.5-積2-②	/	/
HP1.0-単-①	/	62.73
HP1.0-単-②	/	/
HP1.0-積1-①	61.56	62.51
HP1.0-積1-②	61.48	63.25
HP1.0-積2-①	63.39	/
HP1.0-積2-②	/	/
HPO.75-単-①	/	/
HPO.75-単-②	/	/
HPO.75-積1-①	62.25	62.43
HPO.75-積1-②	/	62.52
HPO.75-積2-①	/	/
HPO.75-積2-②	/	/
PCM-単-①	63.90	62.80
PCM-単-②	61.98	62.01
PCM-積1-①	61.77	60.64
PCM-積1-②	61.67	62.00
PCM-積2-①	60.87	61.72
PCM-積2-②	/	62.57
NC-単-①	60.66	61.50
NC-単-②	60.79	61.38
NC-ひび割れ無し-単-①	63.40	63.21
NC-ひび割れ無し-単-②	/	/

し、塩水散布により塩害劣化を促進させた。その後、供試体の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、腐食面積率と最小断面積の算出を行った。これらの試験から得られた結果をまとめ以下に示す。

- (1) HPFRCC を用いた供試体は、NC、PCM を用いた供試体に比べて、塩分浸透深さは浅くなった。
- (2) HPFRCC を用いた供試体は、繊維混入率が低くなる

につれて、塩分浸透深さが深くなった。

- (3) 同じ繊維混入率で積層方法の違うものでは、すべての繊維混入率の HPFRCC で、単一供試体、積層供試体-2、積層供試体-1 の順に塩分浸透深さが深くなった。
- (4) PCM を用いた供試体、ひび割れ導入した NC を用いた供試体においては、すべての鉄筋で腐食が確認された。一方、HPFRCC を用いた供試体は、積層供試体-1 のみで腐食が確認され、単一供試体、積層供試体-2 では大きな腐食は確認されなかった。
- (5) HPFRCC を用いた供試体は、PCM, NC を用いた供試体に比べて、腐食による鉄筋の断面減少が小さかった。

参考文献

- 1) 飯塚貴洋・水田武利・高田浩夫・六郷恵哲：PE 繊維の性能ならびに混入率が HPFRCC のひび割れ性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.267-272，2008
- 2) 久保田憲，林承燦，森山守，宮里心一：マルチブ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
- 3) 小林孝一，松岡慎一郎：鉄筋の塩害による腐食が力学的性状に与える影響，コンクリート工学論文集，Vol.19，No.3，pp.31-40，2008