

論文 HPFRCC の鉄筋防食性能に与えるセメント量と繊維混入率の影響

LE Anh-Dung^{*1}・六郷 恵哲^{*2}・小林 孝一^{*3}

要旨：本研究では、引張じん性の確保と施工性の向上の両立を目指して、セメントの一部を石灰石粉で置換し繊維混入率を減少させた配合の HPFRCC 供試体を作製した。引張性能を確認し、鉄筋防食性能を検討することにより、補修後にひび割れが発生した場合にも高い鉄筋防食性能を有する HPFRCC を開発した。その結果、繊維混入率を小さくすると、引張終局ひずみは明確に低下したが、引張強度と終局時の平均ひび割れ幅に与える影響が殆どないことが確認された。HPFRCC の耐塩分浸透性は優れており、本研究の範囲では、繊維混入率を 0.75%とし、石灰石粉を用いた HPFRCC でも優れた鉄筋防食性能を有することが明らかとなった。

キーワード：HPFRCC, 繊維混入率, 鉄筋防食, 補修

1. はじめ

鉄筋コンクリート（以下 RC）は、コンクリートと鉄筋の複合材料であり、鉄筋が部材の力学的性質を補い、コンクリートが腐食しやすい鉄筋を保護する。しかし、コンクリートにひび割れが発生した場合、劣化因子の浸透によって鉄筋が腐食し、かぶりの剥離・剥落が生じる。

本研究では、引張応力下において擬似ひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ挙動を示す特徴がある複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下 HPFRCC）¹⁾を用いた断面修復工法を提案する。

HPFRCC は、微細なひび割れが分散して複数発生することによって、高い鉄筋防食性能を持つことが明らかにされている²⁾。また、鉄筋が配置された RC 部材に対して HPFRCC を断面修復材として用いる場合には、それほど高い引張じん性は求められないと考えられる。

そこで本研究では、最低限の引張じん性の確保と施工性の向上の両立を目指して、セメントの一部を石灰石粉で置換し、繊維混入率を減少させた配合の HPFRCC 供試体を作製した。一軸引張試験により引張性能を確認し、鉄筋防食性能を検討することにより、補修後にひび割れが発生した場合にも高い鉄筋防食性能を有する HPFRCC を開発することを目的として検討を実施した。

2. HPFRCC の力学性能

2.1 使用材料及び配合

HPFRCC の配合を表-1 に示す。繊維は長さ 12mm、直径 0.012mm、密度 0.97g/cm³、引張強度 2.6GPa、弾性係数 88GPa の高強度ポリエチレン（PE）繊維を用い、繊維混入率を体積比で 0.75%、1.0%と 1.5%とした。セメントは早強ポルトランドセメントとし、細骨材は 7 号珪砂を使用した。混和剤として高性能 AE 減水剤と増粘剤を

使用した。標準配合である A 配合を基にして、B 配合は繊維混入率を小さくした。C 配合と D 配合においては、単位水量と単位セメント量の低減、ひび割れ発生強度の抑制のため、セメントの 25%を石灰石粉で置換した。E 配合は市販のプレパックド材料であり、結合材の一部としてフライアッシュを含み、PE 繊維とポリビニルアルコール（PVA）繊維が混合使用されている。

2.2 一軸引張試験

HPFRCC の一軸引張試験を行った¹⁾。一軸引張試験の前に、供試体の検長区間（中央部分 80mm）に中心線を引き、紙製のスケールを貼付した。試験終了後に、マイクロスコープ（倍率 50 倍）を移動させ、この区間に発生したひび割れ本数を数え、ひび割れ発生箇所でのひび割れ幅を計測した。本研究ではひび割れ幅の計測は、1 配合あたり 5 体の供試体の中で終局ひずみが平均値にもっとも近い 1 体の供試体についてのみ行った。なお、ひび割れ幅の統計量（平均、最小、最大）には、局所ひび割れは含めない。

2.3 実験結果

(1) HPFRCC 性能

HPFRCC のフロー値と力学的性能を表-2 に示す。繊維混入率を 0.75%に減らした B 配合は、繊維を 1.5%混入した A 配合と比較すると、フロー値が大きくなり、流動性の向上が認められた。

石灰石粉でセメントの一部を置換した C 配合及び D 配合は置換しなかった A 配合と B 配合より、圧縮強度が小さかった。繊維の混入率は圧縮強度に与える影響は殆どなかった。

一軸引張試験の結果より、全ての供試体において一本目のひび割れ発生時に破断することはなく、HPFRCC の特徴である擬似ひずみ硬化と複数微細ひび割れ特性を確

*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 教授 工博（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）

表－1 HPFRCC の配合

配合	水セメント 比(%)	単位量(kg/m ³)						
		水	セメント	石灰石粉	珪砂	高性能 AE 減水剤	増粘剤	PE 繊維
A	30	380	1264	—	395	18.96	0.90	14.6(1.5vol%)
B	30	385	1280	—	400	19.20	0.91	7.3(0.75vol%)
C	40	360	900	300	462	13.50	0.63	9.7(1.0vol%)
D	40	340	850	283	595	12.75	0.60	7.3(0.75vol%)

配合	水結合材比(%)	単位量(kg/m ³)*			
		水	結合材	珪砂	繊維(1.9vol%)
E	28.5	328	1149	367	21.8

*E 配合はこの他に再乳化粉末樹脂と粉末分散剤を含む

表－2 HPFRCC のフロー値と力学的性能

配合	フロー値(mm)		力学的性能							
			圧縮強度 (N/mm ²)	一軸引張試験			ひび割れ計測			
	0 打	15 打		ひび割れ発生 強度(N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張終局 ひずみ(%)	ひび割れ 本数(本)	ひび割れ幅(mm)		
A	132	158	80.5	5.11	8.37	3.46	65	0.025	0.014	0.046
B	168	191	83.0	4.52	5.96	0.50	5	0.027	0.014	0.042
C	149	178	63.4	4.20	5.86	0.91	12	0.023	0.014	0.041
D	154	184	68.8	4.17	6.09	0.24	3	0.022	0.014	0.026
E	133	170	52.2	4.91	6.65	5.28	60	0.020	0.012	0.051

認することができた。しかし、繊維混入率が 0.75%と小さい配合 B と配合 D は、HPFRCC の引張終局ひずみが低くなった。

(2) ひび割れ性状

表－2 に一軸引張試験終了後のひび割れ本数とひび割れ幅を示す。繊維の混入率はひび割れ本数に与える影響が大きいことが確認され、例えば繊維混入率が少ない B 配合と D 配合の方はひび割れ本数が少なくなった。図－1 に引張終局ひずみとひび割れ本数との関係を示す。図からわかるように、両者の間に強い相関が認められた。

ひび割れ幅の平均値の範囲は 0.020～0.027mm であり、水セメント比や繊維混入率の影響は殆ど見られなかった。E 配合ではひび割れ幅は他の配合より若干小さく、0.02

～0.03mm の範囲に 60%のひび割れが含まれた。

3. HPFRCC の塩化物イオン浸透抵抗性および鉄筋防食性能

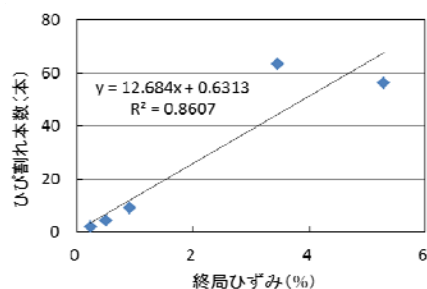
3.1 使用材料と配合

普通コンクリート（以下 NC）、および前章と同じ 5 種類の HPFRCC を用いた。NC の配合は表－3 に示す。粗骨材の最大寸法は 15mm、混和剤として AE 減水剤を用いた。NC の材齢 28 日での圧縮強度は 46.9N/mm²、スランプは 16cm、空気量は 4.7%であった。

3.2 供試体概要

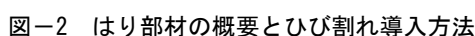
全断面を HPFRCC で作製した単一供試体と、NC の母材を HPFRCC により断面修復したことを模擬した積層供試体の、2 種類を作製した。供試体は図－2 に示す長さ 1700mm、幅 100mm のはり部材から切り出して作製した。はり部材は両端に D25（ネジ節鉄筋）を配置し、その両側に 1500mm の D10 を 2 本溶接により固定した。

単一供試体用のはり部材は高さ 50mm とした。HPFRCC による補修を模擬した積層供試体は、母材の NC 部分を高さ 40mm の断面で作製した後、鉄筋を配置し、HPFRCC を厚さ 40mm で積層した。なお、打設面の表面処理は、母材コンクリート打設時にコンクリート表面に遅延剤を散布しておき、翌日に高圧洗浄水で未硬化



図－1 終局ひずみとひび割れ本数の関係

	水セメント 比(%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
NC	55	180	327	810	920	0.82



劣化を促進させるため、供試体は塩水散布装置に設置し、3 時間ごとに 5 分間の 3%NaCl 溶液の噴霧を繰り返した。塩水散布装置内の温度は岐阜の外気温（期間中の最高値：37.8℃，最低値：- 4.7℃）である。散布時間は 150 日に設定し、定期的に供試体の状況の観察を行い、

150 日経過後に各試験を行った。

塩水散布終了後、供試体内部の塩分浸透状況を確認するため、供試体を鉄筋の配筋方向に平行に割裂した。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、硝酸銀水溶液（0.1mol/l）を霧吹きで割裂面に散布し、供試体の上面からの塩分浸透深さ（もっとも大きな塩分浸透深さ）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。

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 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算した。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計算した。

3.4 実験結果

(1) ひび割れ性状

補修材、母材のひび割れ幅とひび割れ本数を表-4 に示す。なお、積層供試体の場合では、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。また表-4 に示すひび割れ本数は HPFRCC 側のひび割れ本数である。HPFRCC のひび割れ幅の平均値の範囲は 0.020～0.033mm である。HPFRCC の単一供試体は複数の微細なひび割れを発生したが、NC の単一供試体は大きなひび割れを発生した。積層供試体

表-4 ひび割れ性状と塩分浸透深さ

供試体名	ひび割れ幅(mm)				ひび割れ 本数 (本)	塩分浸 透深さ (mm)
	母材側	HPFRCC側				
		平均値	合計値	最大値		
単一供試体						
A - 単 - 1	—	0.020	0.326	0.032	16	13
A - 単 - 2	—	0.032	0.664	0.055	21	25
B - 単 - 1	—	0.028	0.611	0.051	22	16
B - 単 - 2	—	0.020	0.139	0.031	7	8
C - 単 - 1	—	0.033	0.394	0.104	12	23
C - 単 - 2	—	0.023	0.346	0.041	15	16
D - 単 - 1	—	0.025	0.300	0.037	12	11
D - 単 - 2	—	0.023	0.114	0.032	5	24
E - 単 - 1	—	0.024	0.120	0.041	5	4
E - 単 - 2	—	0.022	0.179	0.031	8	11
NC - 単 - 1	0.249	—	—	0.496	3	50
NC - 単 - 2	0.196	—	—	0.523	3	50
積層供試体						
A - 積 - 1	0.880	0.021	0.063	0.023	3	9
A - 積 - 2	0.308	0.000	0.000	0	0	8
B - 積 - 1	0.037	0.031	0.153	0.041	5	10
B - 積 - 2	0.113	0.018	0.054	0.02	3	10
C - 積 - 1	0.645	0.020	0.102	0.031	5	12
C - 積 - 2	0.502	0.028	0.085	0.031	3	19
D - 積 - 1	0.262	0.027	0.080	0.037	3	20
D - 積 - 2	0.420	0.024	0.094	0.031	4	22
E - 積 - 1	0.379	0.031	0.031	0.031	1	7
E - 積 - 2	0.563	0.019	0.037	0.023	2	7

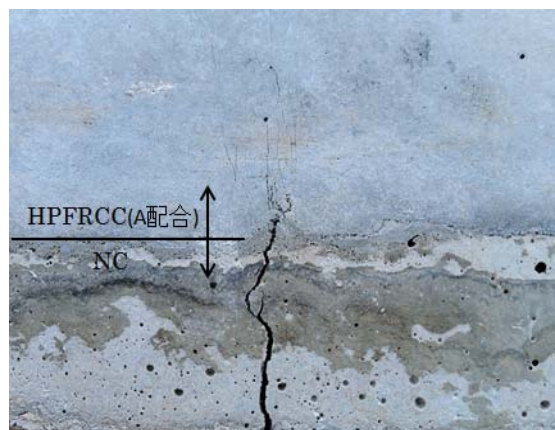
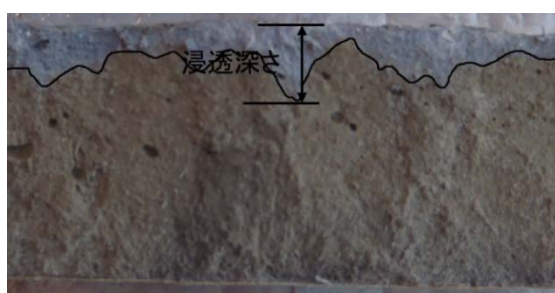
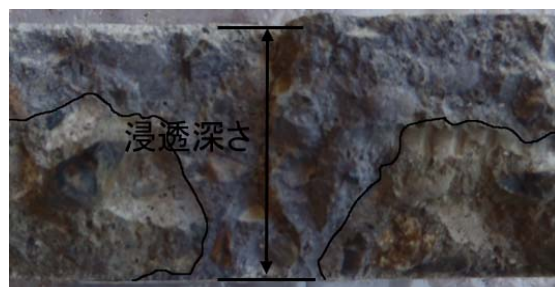


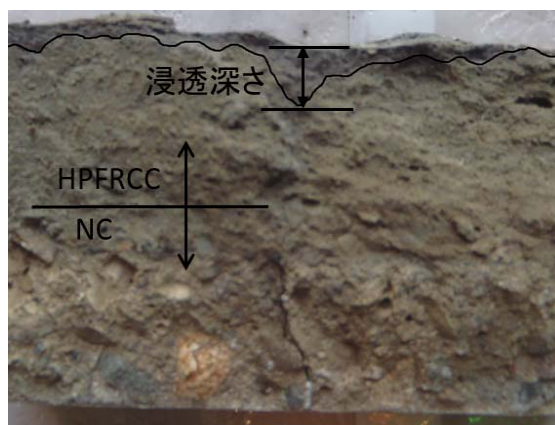
図-4 積層供試体のひび割れの一部



(a) A - 単 - 1

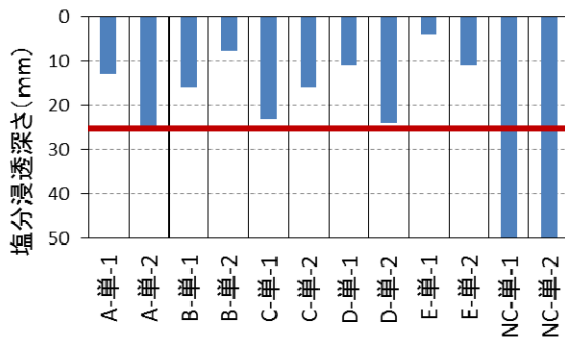


(b) NC - 単 - 1

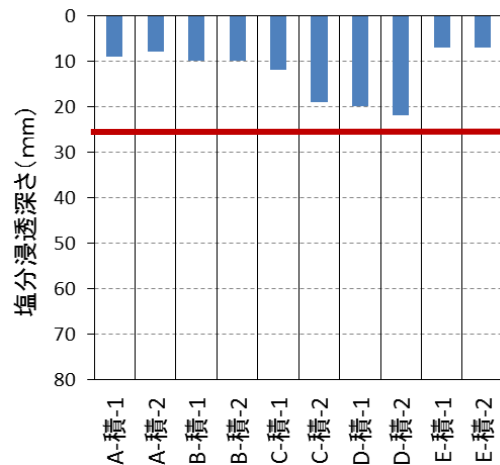


(c) A - 積 - 1

図-5 硝酸銀発色試験の一部



(a) 単一供試体



(b) 積層供試体

図-6 供試体上面からの塩分浸透状況

の場合では、図-4のようにNC母材内には大きいひび割れが1本だけ発生した。同時に、HPFRCCとNC母材との界面とNC母材に発生したひび割れとの交点から、HPFRCC側に向かって複数の微細なひび割れが分散して発達したことが、全て積層供試体で認められた。このようなひび割れが形成されたのは、HPFRCCとNCとの付着が良好であるためであると考えられる。繊維混入率はひび割れ状況に与える影響が殆どなかった。

(2) 塩分浸透深さ

図-5に硝酸銀発色試験の一例を示す。図-6に塩分浸透深さを示す。図-6の中の赤線は供試体上面からのかぶりを示す。

図-5(b)に示すように、NCを用いた単一供試体で、塩分はひび割れを通じて供試体内に浸透し、上面から下面までに達していた。しかし、HPFRCCを用いた単一供試体で、塩分浸透深さが小さくなり、A-単-2以外は鉄筋の位置まで塩分が浸透しなかった。NCの場合には、ひび割れ幅がほぼ0.2mmであったのに対し、HPFRCC配合の平均ひび割れ幅は全て0.033mm以下であるので、塩化物イオンの浸透速度が極めて小さくなったものと考えられる³⁾。このことから、HPFRCCは補修材としての耐塩分浸透性がNCに比べ優れていると考えられる。

積層供試体では、塩分が上面からHPFRCCとNCとの界面まで浸透しなかった。これらと単一供試体の塩分浸透深さの結果から、40mmのHPFRCCは補修材として塩分浸透を妨げることができたと認められる。AとB配合はCとD配合に比べて塩分浸透深さが小さくなった。これらは、AとB配合は水セメント比が小さいことが要因と考えられる。

一方、繊維混入率は塩分浸透深さに与える影響が殆どなかった。

図-7にひび割れ幅の統計値と塩分浸透深さとの関係を示す。図からわかるように、マトリックスの水セメン

ト比が同一の場合には、ひび割れ幅最大値、合計値が塩分浸透深さに与える影響は同じ傾向にあり、例えばA配合とB配合の単一供試体において、ひび割れ幅と塩分浸透深さの間により相関がみられた。特に、LiらはSHCCの塩分浸透深さがひび割れ本数とよい相関にあることを指摘している⁴⁾が、ここではひび割れ幅の合計値と塩分浸透深さの間に強い相関関係が見られる。一方、積層供試体ではひび割れ幅と塩分浸透深さの間には明瞭な関係が認められなかった。これは、積層供試体でのひび割れ本数が少ないためであると考えられる。C配合とD配合の場合には、同程度のひび割れ幅を持つA配合、B配合とE配合よりも塩分浸透深さが大きい。これは、C配合

表-5 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
単一供試体				
A-単-1	—	—	—	—
A-単-2	—	—	—	—
B-単-1	—	—	—	—
B-単-2	—	—	—	—
C-単-1	—	—	—	—
C-単-2	—	—	—	—
D-単-1	—	—	—	—
D-単-2	—	—	—	—
E-単-1	—	—	—	—
E-単-2	—	—	—	—
NC-単-1	16.6	16.6	35.3	35.3
NC-単-2	15.8	14.8	33.5	31.5
積層供試体				
A-積-1	—	—	—	—
A-積-2	—	—	—	—
B-積-1	—	—	—	—
B-積-2	—	—	—	—
C-積-1	—	—	—	—
C-積-2	—	—	—	—
D-積-1	—	—	—	—
D-積-2	—	—	—	—
E-積-1	15.6	—	33.2	—
E-積-2	—	—	—	—

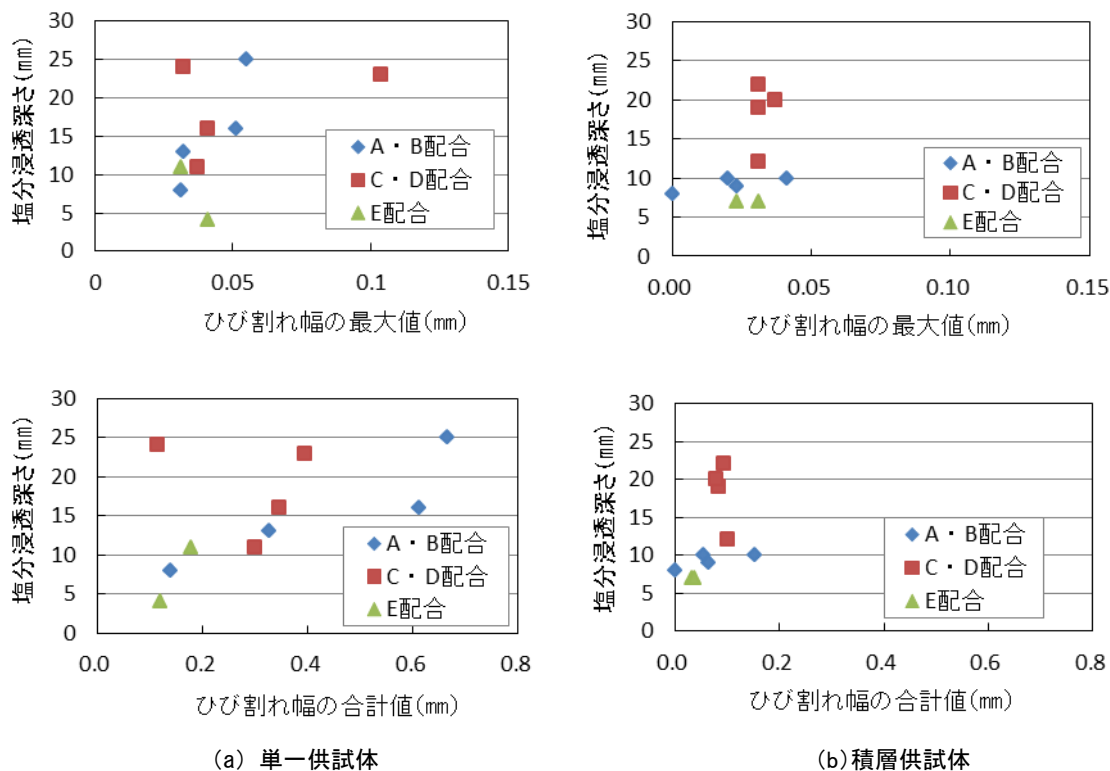


図-7 ひび割れ幅と塩分浸透深さの関係

と D 配合は A 配合と B 配合よりも単位セメント量が小さいことが原因であると考えられる。

(3) 腐食面積率

各供試体の腐食面積率は表-5 に示す。全ての HPFRCC 単一供試体は鉄筋が腐食していなかった。積層供試体は E - 積 - 1 供試体以外では腐食が発生していなかった。これは、前項で示したように HPFRCC の塩分浸透抵抗性が大きいためであると考えられる。

ここで、E - 積 - 1 供試体はひび割れ幅、塩分浸透深さが小さかったにもかかわらず、腐食が大きかった。しかし、E - 積 - 2 は全く腐食していなかったため、今後さらに検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、引張じん性の確保と施工性の向上の両立を目指して、セメントの一部を石灰石粉で置換し、繊維混入率を減少させた配合によって、HPFRCC 供試体を作製した。一軸引張試験により引張性能を確認し、鉄筋防食性能を検討することにより、補修後にひび割れが発生した場合にも高い鉄筋防食性能を有する HPFRCC の開発を目指した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 繊維混入率を小さくすると、引張終局ひずみは明確に低下したが、引張強度に与える影響が殆どなかったことが確認された。繊維混入率を小さくすると、平均ひび割れ幅は同程度であるが、ひび割れ本数は

少なくなった。

- (2) HPFRCC は、補修材としての耐塩分浸透性が NC に比べ優れている。
- (3) HPFRCC の塩分浸透抵抗性は、ひび割れ幅の合計値や水セメント比の影響を受ける。
- (4) 本研究の範囲では、水セメント比を増大させ、繊維混入率を 0.75% に低下させた HPFRCC であっても、鉄筋防食性能が高いと認められる。

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127, 2007.3
- 2) Koichi Kobayashi, Takahiro Izuka, Hoshito Kurachi, Keitetsu Rokugo : “Corrosion protection performance of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites as a repair material”. Cement & Concrete Composites, vol 32: pp 411-420, 2010
- 3) Kejin Wang, Daniel C. Jansen, Surendra P. Shah : “Permeability study of cracked concrete. Cement and Concrete Research, vol.27, No.3 pp.381-393, 1997
- 4) Mustafa Sahmaran, Mo Li, and Victor C. Li : “Transport Properties of Engineered Cementitious Composites under Chloride Exposure”, ACI MATERIALS JOURNAL, Title no.104-M66