

# 論文 ひび割れを有する HPFRCC 積層供試体の耐凍害性能

大畑 卓也\*1・中澤 里\*2・前田 徳一\*3・六郷 恵哲\*4

**要旨:** 力学性能が異なる繊維を用いた HPFRCC 供試体や、ひび割れを有する HPFRCC 積層供試体に急速凍結融解試験を行い、供試体の質量の変化を計測するとともに、界面の付着強度試験を行った。従来の PE 繊維に比べて、力学性能の低い PE 繊維を用いた HPFRCC であってもスケーリング劣化が抑制された。スケーリング劣化する普通コンクリートに HPFRCC を 10mm の厚さで積層することにより、ひび割れがあっても劣化の抑制効果が確認された。NC に HPFRCC を積層した供試体では、ひび割れの有無に関わらず、300 サイクルの凍結融解作用を受けた後においても、両者の付着は良好であった。

**キーワード:** HPFRCC, 表面補修, 急速凍結融解試験, スケーリング, 付着

## 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）は引張および曲げ応力下において、擬似ひずみ硬化特性と複数微細ひび割れ特性を示すひび割れ幅制御型の材料であり、繊維の架橋効果により高い凍結融解抵抗性能を有している。このため寒冷地の農業用水路などの既設のコンクリート構造物の表面補修へ HPFRCC の適用が進められている。しかし、HPFRCC で補修したコンクリート構造物が凍結融解作用を受けた場合にひび割れがあってもスケーリング劣化や付着力の低下が起こりにくいかどうかについては十分には検討はされていない。

そこで、ひび割れを導入した普通コンクリート（以下、NC）に HPFRCC を積層した供試体や積層後にひび割れを導入した供試体を作製し、急速凍結融解試験を行い、ひび割れの観察や、質量変化、付着強度の測定結果から、ひび割れを有する NC への HPFRCC の補修効果について検討した。

また HPFRCC は複数微細ひび割れ特性や擬似ひずみ硬化特性を有する優れた材料であるが、HPFRCC の適用を広めるためには、HPFRCC の性能を確保しつつ、価格を抑えることが重要である<sup>1)</sup>。本研究では従来から用い

ている高性能なポリエチレン（以下、PE）繊維（以下、繊維 A）と中程度の性能を有する安価な PE 繊維（以下、繊維 B）を用いた。

繊維 A と、繊維 B を用いた HPFRCC 単一供試体（以下、HPA および、HPB）を作製し、HPFRCC の凍結融解抵抗性能について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

#### (1) 供試体の種類

表-1 に凍結融解試験に用いた供試体の種類を示す。HPA、HPB、あるいは NC を用いた単一供試体と、NC に HPA を積層した積層供試体を作製した。

既設コンクリート構造物の表面の補修を HPFRCC を用いて行う場合、ウォータージェット工法を用いて劣化箇所を除去し粗骨材を露出させた後に、補修が行われている。しかし、構造物に生じている細かなひび割れまで完全に充填あるいは除去することは困難であり、ひび割れを有したまま補修を行うことが多い。このようなひび割れがある条件を模擬するために、ひび割れの有無の組合せを変えて基盤となる NC の対となる 2 面に約 10mm の厚さで HPA を積層した下記の 3 種類の積層供試体を作製した。

- ① 基盤となる NC と、積層した HPFRCC の両方にひび割れが無い供試体（供試体名：積層 0C）
- ② 基盤となる NC にひび割れがあるが、積層した HPFRCC にはひび割れが無い供試体（積層 1C）
- ③ 基盤となる NC と、積層した HPFRCC の両方にひび割れがある供試体（積層 2C）

#### (2) RC はりの作製とひび割れの導入

表-1 凍結融解試験用供試体の種類

供試体名	配合名	使用繊維	ひび割れ性状	供試体名
HPFRCC 単一供試体	HPA	繊維A	無	HPA
			有	HPAC
	HPB	繊維B	無	HPB
			有	HPBC
NC 単一供試体	NC	-	無	NC
			有	NCC
積層供試体	-	繊維A	無	積層0C
		繊維A	有 (NCのみ)	積層1C
		繊維A	有 (HPFRCCとNC)	積層2C

\*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 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科

\*3 東洋紡績(株) (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-2 配合

材料	水セメント比 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	高性能AE減水剤	増粘剤	繊維
HPFRCC	30	380	1264	395	-	-	3.792	0.9	14.6
NC	55	180	327	810	920	0.8175	-	-	-

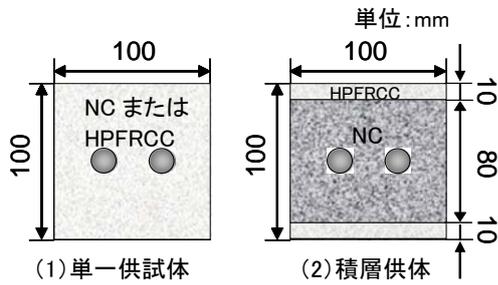


図-1 供試体断面

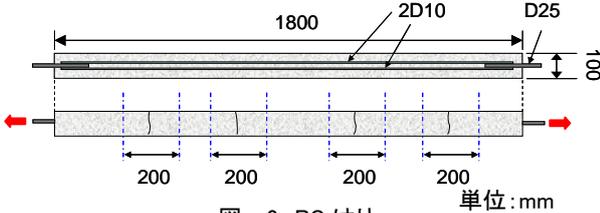


図-2 RC はり

図-1 に単一供試体と積層供試体の断面を示す。2本の鉄筋 D10 の両端部にネジ節鉄筋 D25 を溶接した長さ 1800mm の RC はりを作製した。図-2 に RC はりの形状を示す。

ひび割れを有する供試体を作製する場合には床に固定した鋼製の反力板と油圧ジャッキを用いて、RC はりに残留ひび割れが残る程度までネジ節鉄筋を介して引張荷重を行った。

積層供試体は次の方法で作製した。まず、80×100×1800mm の RC はりを NC で製作した。打設面および対となる型枠面に遅延剤シート（目粗し深さ 2mm）を置き、打設翌日に骨材表面が露出する程度まで洗出し処理を行った。積層 0C、2C 供試体では洗出しを行った両面に、HPFRCC の打継ぎを行った。積層 1C 供試体では、RC はりに引張荷重を行ってひび割れを導入後、HPFRCC の打ち継ぎを行った。積層 2C 供試体では、HPFRCC の打ち継ぎ後にひび割れを導入した。

(3) 供試体の切り出しと加工

RC はりからコンクリートカッターを用いて 100×100×200mm の角柱供試体を切出し、凍結融解試験用供試体とした。

HPA 単一供試体、HPB 単一供試体、および NC 単一供試体については、ひび割れの有るものと無いものをそれぞれ 3 体ずつ作製した。各積層供試体については 9 体ずつ作製し、凍結融解試験 0、150、300 サイクル後に各種 3 体ずつ付着強度試験を行った。

積層供試体については凍結融解作用を HPFRCC 面に限定するため、HPFRCC 以外の 4 面にエポキシ樹脂によ

表-3 繊維の物性値

繊維	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)
繊維A	0.012	12	0.97	2.6	88
繊維B	0.012	12	0.97	1.4	55

りシーリングを施した。

供試体は、RC はりとして 20℃の室内で養生シートを用いて湿布養生をした後、コンクリートカッターを用いて切出しを行い、1 週間水中にて供試体を浸水させた後に凍結融解試験を行った。凍結融解試験の開始材齢は 6 週であった。

(4) ダンベル型供試体

HPA および HPB については、図-3 に示す形状の一軸引張試験用のダンベル型供試体（厚さ 30mm、幅 60mm、長さ 330mm で、中央部の検長区間は 80mm、断面寸法は 30×30mm）を 5 体ずつ作製した。

2.2 使用材料および配合

HPFRCC ならびに NC の配合を表-2 に示す。NC には AE 剤（ポゾリス No.70）を使用し、空気量を 5.0%とした。HPFRCC には 2 種類の力学特性の異なる PE 繊維（A、B）を用いた。繊維の物性値を表-3 に示す。繊維 A に比べ、繊維 B の引張強度は 54%、弾性係数は 63%である。PE 繊維の長さは 12mm、直径は 0.012mm である。

2.3 一軸引張試験

荷重試験機を写真-1 に示す。鋼製フレーム内の上下の掴み具によりダンベル型供試体の端分を掴み、ダンベル型供試体に引張力を作用させた<sup>2)</sup>。荷重は手回し式加力装置の上に設置したロードセル、変位は試験体両側に取り付けた高感度変位計にて計測した。得られた荷重変位関係から応力ひずみ曲線を算出した。応力ひずみ曲線のピークから引張強度を求め、引張強度に対応するひずみを終局ひずみとした。

2.4 急速凍結融解試験

凍結温度を-18℃、融解温度を 5℃とし、1 サイクルを 4 時間として、急速凍結融解試験を実施した。30 サイクルごとに質量を計測し、300 サイクルにて終了とした。式(1)より質量変化率を算出し、スケーリング劣化量を評価した。

$$W_n : n \text{ サイクル後の質量減少率 (\%)}$$

$$w_n : n \text{ サイクル後の供試体の質量 (g)}$$

$$w_0 : 0 \text{ サイクルにおける供試体の質量 (g)}$$

$$W_n = \frac{w_0 - w_n}{w_0} \times 100 \quad (1)$$

なお、本研究の急速凍結融解試験は供試体の条件や試験条件が異なるものの、温度条件や計測条件は JIS A 1148 A 法<sup>3)</sup>に基づき行った。

### 2.5 付着強度試験

各積層供試体（縦 100mm，横 200mm，厚さ 100mm）の 2 箇所（端部から円の中心が 50mm の位置）に、コアドリルを用いて直径 50mm，深さは約 25mm の円筒状の溝を加工した（図-4）。円柱状の部分に、直径 50mm の鋼製アタッチメントをエポキシ樹脂を用いて接着した後に、建研式引張試験機を使用し、付着強度試験を行った。ドーナツ状鋼版を引張試験機の下部に設置した。付着強度試験の結果から、凍結融解作用が積層供試体の界面へ及ぼす影響について検討した。

凍結融解試験 0, 150 サイクルの供試体は、300 サイクルが終了するまで実験室内の気中に保存し、すべての供試体の付着強度試験を 300 サイクル終了後（材齢 28 週）に行った。



写真-1 載荷装置

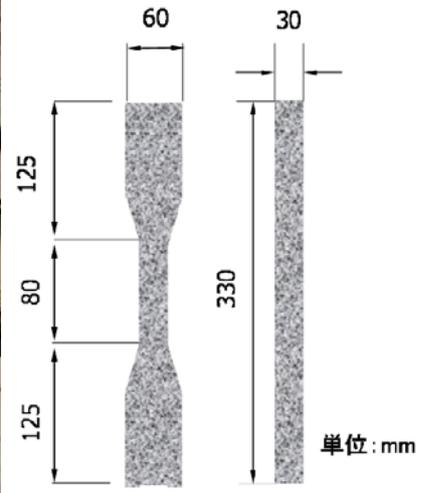


図-3 ダンベル供試体

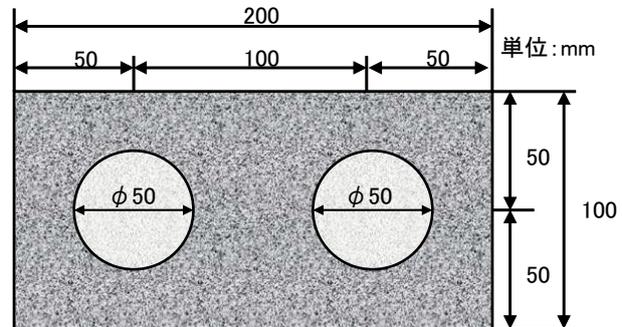


図-4 付着強度試験供試体

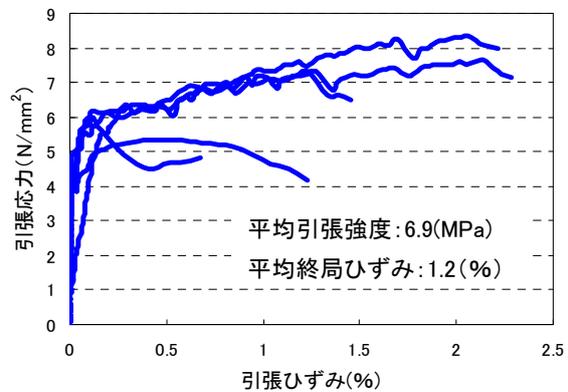
## 3. 実験結果

### 3.1 HPFRCC の性能と供試体のひび割れ

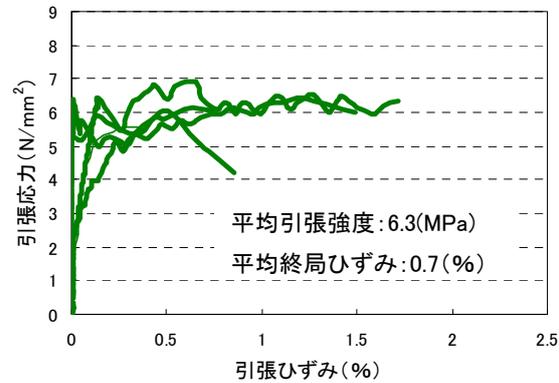
HPA と HPB で作製したダンベル型供試体の一軸引張試験結果を図-5 に示す。繊維 A に比べ力学性能が低い繊維 B を用いた HPB ダンベル型供試体は、終局ひずみが 1/2 程度と小さくなるが、複数の微細ひび割れが発生し、ひずみ硬化挙動が生じることが確認された。これは飯塚ら<sup>2)</sup>の研究の結果と同様であった。ひび割れを有する凍結融解試験用の供試体のひび割れをマイクロSCOPEにより観察した結果を表-4 に示す。繊維 B を用いた単一供試体 HPBC の平均ひび割れ幅 (0.04mm) は、A 繊維を用いた HPAC (0.02mm) と比べ 2 倍程度大きくなった。これは PE 繊維の弾性係数が小さいためと考えられる。

### 3.2 ひび割れとスケーリングの観察結果

凍結融解試験 0 と 150 サイクル時における HPA のひび割れ部の写真を写真-2 に示す。150 サイクル時において、ひび割れ部が白い析出物により塞がれる現象が確認された。HPFRCC はセメント量が多く、析出物も生じやすいと考えられる。しかし、繊維 B を用いた HPBC では、ひび割れ幅が大きいため、このような現象はほとんど観察されなかった（写真-3）。



(1)HPA



(2)HPB

図-5 ダンベル型供試体の一軸引張試験結果

HPA と HPB のいずれの供試体でもスケーリングは観察されず、スケーリング劣化の抑制効果が認められた。NC では全ての供試体でスケーリングが観察された。特にひび割れを有する供試体ではひび割れ部において、角部が丸みをおびるスケーリング劣化が確認された（写真-4）。

凍結融解試験 150 サイクル時に積層供試体では亀甲状の微細ひび割れの発生が部分的に確認された（写真-5）。300 サイクル時には亀甲状の微細なひび割れは増加したが、ひび割れ幅はいずれも、0.01mm 以下であった。

### 3.3 質量の変化

凍結融解試験後の質量変化率を図-6 に示す。300 サイクル後に、単一供試体 HPA と HPB では質量が約 0.8% 増加し、ひびわれを有した単一供試体 HPAC と HPBC においても質量が、約 1.2% 増加した。供試体の質量が増

加した原因として、硬化が進んで吸水したことや、供試体内部に生じた微細ひび割れが吸水したことがあげられる。供試体の表面にひび割れがある供試体は、水が内部に入りやすく、このような現象が顕著に発生したと考えられる。繊維の性能が異なっても質量変化率に明確な違いが確認されなかったことから、力学性能の低い繊維 B であっても、繊維 A と同等の優れたスケーリング抵抗性を有するとともに、スケーリング劣化の抑制には繊維 A, B の力学性能の差が影響していないことがわかる。

単一供試体 NC および NCC ではスケーリング劣化が進行し、凍結融解サイクルの途中から質量の低下が始まり、ひび割れを有する NCC では 300 サイクル後に約 0.4% 減少した。本研究で使用した NC の水セメント比は 55% であり、凍害環境下で使用するコンクリートとしては水セメント比が比較的大きかったためにスケーリング劣化

表-4 供試体の平均ひび割れ幅

供試体名	母材 ひび割れ幅(mm)	凍結融解作用面 平均ひび割れ本数(本)
HPAC	0.02(平均)	14(平均)
HPBC	0.04(平均)	9(平均)
NCC	0.267(1本)	1
積層1C	0.234(1本)	0
積層2C	0.146(1本)	14(平均)

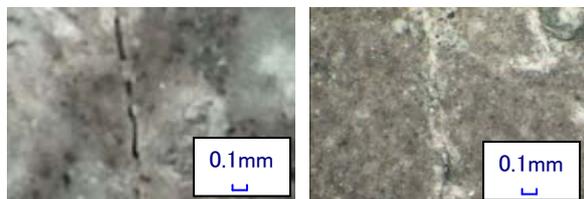


写真-2 HPAC 供試体(左:0 サイクル, 右:150 サイクル)

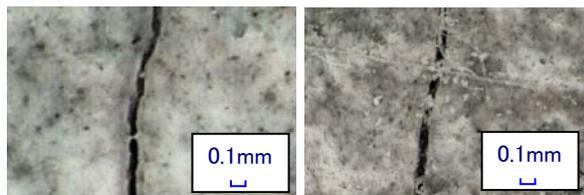


写真-3 HPBC 供試体(左:0 サイクル, 右:150 サイクル)

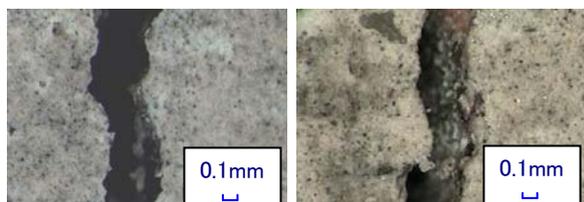


写真-4 NCC 供試体(左:0 サイクル, 右:150 サイクル)

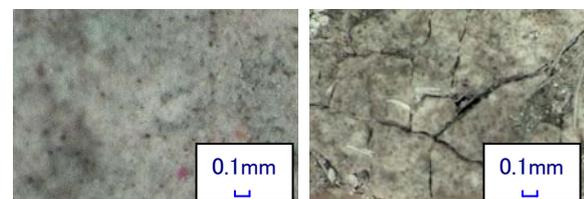


写真-5 積層1C 供試体(左:0 サイクル, 右:150 サイクル)

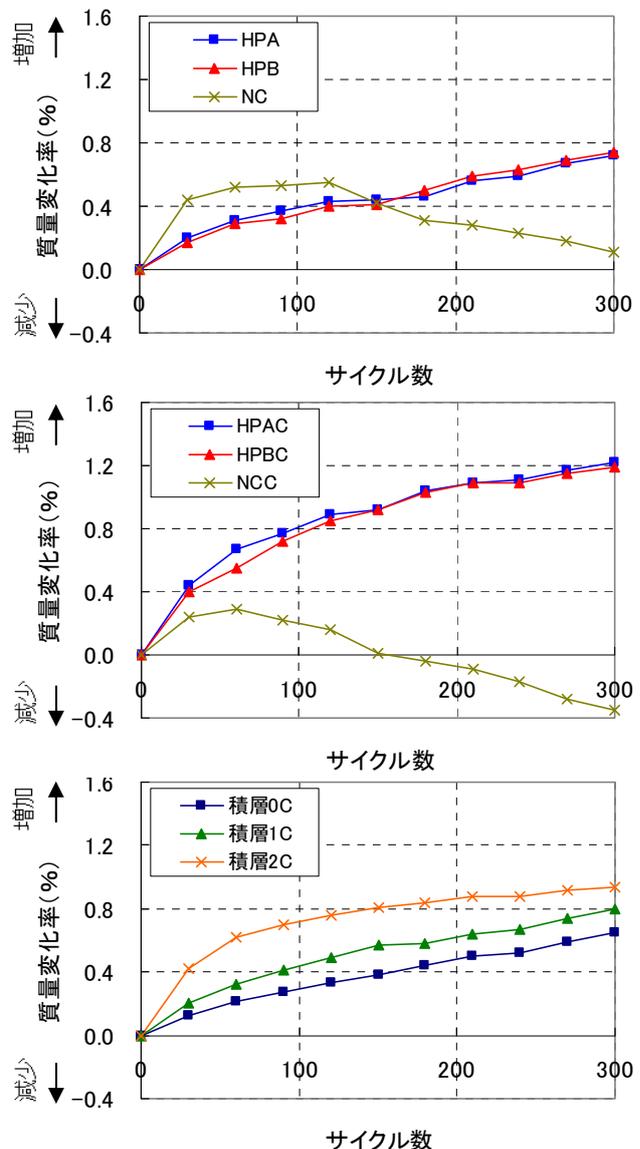


図-6 供試体の質量変化

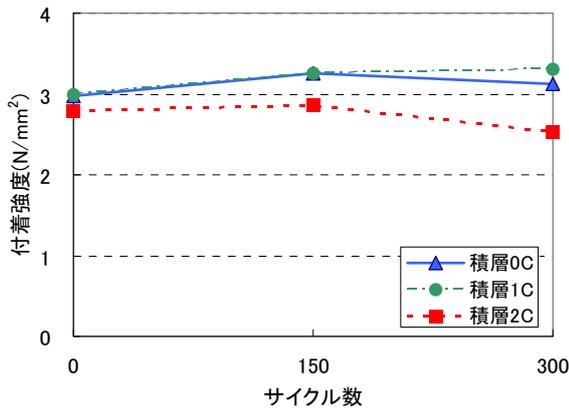


図-7 付着強度試験結果

表-5 付着強度試験の破壊箇所

(1)0 サイクル

0サイクル	NC	破断面に界面が占める割合			HPFRCC
		30%未満	30~60%	60%以上	
積層0C	7	0	0	2	0
積層1C	7	1	1	0	0
積層2C	7	2	0	0	0

(2)150 サイクル

150サイクル	NC	破断面に界面が占める割合			HPFRCC
		30%未満	30~60%	60%以上	
積層0C	8	0	0	1	0
積層1C	9	0	0	0	0
積層2C	8	0	1	0	0

(3)300 サイクル

300サイクル	NC	破断面に界面が占める割合			HPFRCC
		30%未満	30~60%	60%以上	
積層0C	6	0	0	3	0
積層1C	9	0	0	0	0
積層2C	7	1	1	0	0

が進展したと考えられる。NCC 供試体では、ひび割れ部のスケーリングも加わり、質量の減少が大きかったものと考えられる。

ひび割れ性状の異なる積層供試体では、ひび割れの有る供試体の方が無い供試体よりも質量の増加が大きかったが、いずれの供試体も質量は減少しなかった。このことから、スケーリング劣化する普通コンクリートに HPFRCC を 10mm の厚さで積層することにより、劣化を抑制できることが確認された。また基盤のコンクリートや HPFRCC にひび割れが生じている状況下においても、スケーリングの抑制効果を確認できた。このことから、凍結融解環境下の既設構造物を HPFRCC を用いて補修する場合、構造物にひび割れが生じていても HPFRCC を 10mm 積層することによりスケーリング劣化を抑制することができると考えられる。

3.4 付着強度試験

付着強度試験結果を図-7 に、付着破壊箇所を表-5 に示す。一水準当たり、6 箇所について付着強度試験を行っており、6 つの付着強度の値の最大と最小の差は、0 サイクルでは平均値の 33%以内、150 サイクルでは 50%以内、300 サイクルでは 63%以内であった。積層 2C では、300 サイクル時に若干付着強度が小さかったが、本研究では付着強度の目標値を 1.0N/mm<sup>2</sup>以上と設定し、いずれの供試体も 2.5N/mm<sup>2</sup>以上の高い付着強度を保っており、母材 NC と HPFRCC との界面付近で破壊した供試体の割合が少ないことから、凍結融解作用を受けた後にも、HPFRCC と NC との付着は良好であると考えられる。

4. まとめ

HPFRCC をコンクリート (NC) に積層した供試体と、それぞれ単一の供試体を作製し、ひび割れを導入して急速凍結融解試験を行い、スケーリング劣化の有無や界面の付着強度を実験により確認し、下記の結果を得た。

- (1) 従来の PE 繊維に比べて、力学性能の低い PE 繊維であってもスケーリング劣化の抑制効果が認められた。スケーリング劣化抑制に及ぼす PE 繊維の力学性能の影響は少ないと考えられる。
- (2) ひび割れを有する RC はりから切出した NC 供試体では、凍結融解作用により、ひび割れ部の角が丸みをおびるスケーリング劣化が認められた。
- (3) スケーリング劣化する普通コンクリートに HPFRCC を 10mm の厚さで積層することにより、スケーリング劣化を抑制することができた。
- (4) NC に HPFRCC を積層した供試体では、ひび割れの有無に関わらず、300 サイクルの凍結融解作用を受けた後においても、両者の付着は良好であった。

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.267-261, 2008
- 2) 森山守・林承燦・内田裕市・六郷恵哲：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の引張性能と試験装置，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp.311-316, 2006
- 3) JIS A 1148：コンクリートの凍結融解試験法

