

# セメント量が異なる HPFRCC の鉄筋防食性能に及ぼす繊維の種類と混入率の影響

破壊診断工学研究室 LE ANH DUNG

## 1. はじめに

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）<sup>1)</sup> を用いて断面修復を行うことを想定して検討を行った。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、劣化因子の浸透を妨げ、高い鉄筋防食性能を持つことが明らかにされている<sup>2)</sup>。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。一方、浸透速度および塩分の劣化進行に HPFRCC のひび割れ性状の違いが与える影響について詳細に検討した研究は少ない。

そこで本研究では、高強度ポリエチレン（以下、PE）繊維、高強度ビニロン（以下、PVA）繊維と PEPV 繊維（PE 繊維と PVA 繊維を混合したもの）の3種類のいずれかを用い、石灰石粉の置換量を変化させた HPFRCC 供試体を作製した。これら異なる配合の HPFRCC においてダンベル型供試体の一軸引張試験を行った上で、HPFRCC の力学性能とひび割れ性状に合成繊維種類およびモルタルマトリックスの違いが与える影響について検討した。また、ひび割れを有した無筋の HPFRCC では、塩化物イオン浸透抵抗性に与えるひび割れ幅の影響を検討した。また RC 部材を用いて、補修後にひび割れ発生した場合の HPFRCC の鉄筋防食性能についての検討を実施した。

## 2. HPFRCC の力学性能

### 2.1 使用材料および配合

HPFRCC の配合を表-1に示す。PE 繊維（長さ 12mm、直径 0.012mm、引張強度：2.6GPa、弾性係数：73GPa）、PVA 繊維（長さ 12mm、直径 0.040mm、引張強度：1.6GPa、弾性係数：40GPa）あるいは PEPV 繊維（PE 繊維と PVA 繊維を体積比で等量混合した）を用い、繊維混入率は全ての配合で 1.5%とした。石灰石粉の混入量は 1m<sup>3</sup> 当たりに対して、0、300、600kg の3種類とし、セメントと合わせた単位粉体量は 1264kg/m<sup>3</sup> で統一した。セメントは早強ポルトランドセメントとし、細骨材は 6号と 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。

### 2.2 一軸引張試験

HPFRCC の一軸引張試験を行った<sup>1)</sup>。本研究では、各試験条件で試験した 5 体のダンベル供試体の中、終局ひずみが最大と最小の供試体を除いて、残り 3 体の試験値の平均値を、5 体の供試体の代表値とした。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、目盛 1mm の紙製のスケールを貼付した。引張ひずみが 0.25%、0.5%、0.75%、1.0%、1.5%、2%、3%、4%、5%の段階で荷重を止め（変位は止めているが荷重は時間とともに低下）、その線に沿ってマイクロスコープ（倍率 50 倍）を移動させ、ひび割れの画像をパソコンに取り込み、ひび割れ幅とひび割れ本数を計測した。供試体ごとに計測したひび割れの平均を求め、平均ひび割れ幅とした。ひび割れ位置を計測し、平均ひび割れ間隔の算定に用いた。

### 2.3 実験結果

#### 2.3.1 HPFRCC 性能

表-2にフレッシュ性状と一軸引張試験結果を示す。PE 繊維を用いた配合は PVA 繊維を用いたものより高性能 AE 減水剤を 5 倍多く使用したが、フロー値は PVA 繊維のものが大きく、PE 繊維を用いた配合よりも PVA 繊維を用いた配合は流動性が大きくなった。これは、PE 繊維の方が PVA 繊維よりも径が小さく、同一繊維体積率では混入本数が多くなることから、練混ぜ水の拘束効果が大きかったためと考えられる

石灰石粉の置換量が増加するほど、圧縮強度が低下する傾向を示した。全体的に石灰石粉の置換量と圧縮強度の相関係数は、約 0.90 となり高い相関関係を示した。これは、水結合材比は 0.29 と一定としているが、石灰石粉の置換量が増加するに従って W/C が増加し、圧縮強度が低下したためと考えられる。また、同量の石灰石粉置換量での比較から、PVA 繊維を用いた供試体は PE 繊維と PEPV 繊維をそれぞれ用いた供試体よりも圧縮強度が若干大きくなった。

一軸引張試験の結果より、PVA-0 の配合以外は HPFRCC の擬似ひずみ硬化特性と複数微細ひび割れ特

表-1 HPFRCC の配合

| 配合       | W/C  | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |        |     |     |     |          |      |       |
|----------|------|-------------------------|-----|--------|-----|-----|-----|----------|------|-------|
|          |      | セメント                    | 水   | 石灰石微粉末 | 珪砂  |     | 増粘剤 | 高性能AE減水剤 | 繊維   |       |
|          |      |                         |     |        | 7号  | 6号  |     |          | PE繊維 | PVA繊維 |
| PE-0     | 0.29 | 1264                    | 371 | 0      | 200 | 195 | 0.9 | 28.2     | 14.6 | 0     |
| PE-300   | 0.38 | 964                     | 371 | 300    | 200 | 195 | 0.9 | 25.9     | 14.6 | 0     |
| PE-600   | 0.56 | 664                     | 371 | 600    | 200 | 195 | 0.9 | 17.0     | 14.6 | 0     |
| PEPV-0   | 0.29 | 1264                    | 371 | 0      | 200 | 195 | 0.9 | 28.2     | 7.3  | 13    |
| PEPV-300 | 0.38 | 964                     | 371 | 300    | 200 | 195 | 0.9 | 18.3     | 7.3  | 13    |
| PEPV-600 | 0.56 | 664                     | 371 | 600    | 200 | 195 | 0.9 | 12.6     | 7.3  | 13    |
| PVA-0    | 0.29 | 1264                    | 371 | 0      | 200 | 195 | 0.9 | 5.8      | 0    | 26    |
| PVA-300  | 0.38 | 964                     | 371 | 300    | 200 | 195 | 0.9 | 4.4      | 0    | 26    |
| PVA-600  | 0.56 | 664                     | 371 | 600    | 200 | 195 | 0.9 | 3.8      | 0    | 26    |

表-2 HPRCC 性能

| 配合       | フレッシュ性状      |            | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 一軸引張試験                           |                              |                |                                  |                              |                |
|----------|--------------|------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|
|          | フロー値<br>(mm) | 空気量<br>(%) |                              | 材齢1ヶ月                            |                              |                | 材齢3ヶ月                            |                              |                |
|          |              |            |                              | ひび割れ発生<br>強度(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張終局ひ<br>ずみ(%) | ひび割れ発生<br>強度(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張終局ひ<br>ずみ(%) |
| PE-0     | 163.0        | 6.1        | 76.7                         | 6.47                             | 7.17                         | 0.90           | 5.14                             | 7.14                         | 0.22           |
| PE-300   | 161.5        | 5.6        | 67.1                         | 5.09                             | 6.57                         | 1.19           | 6.48                             | 6.8                          | 0.49           |
| PE-600   | 161.0        | 6.3        | 45.8                         | 5.02                             | 5.66                         | 2.29           | 5.43                             | 5.6                          | 0.52           |
| PEPV-0   | 166.0        | 7.1        | 71.2                         | 6.65                             | 7.45                         | 0.85           | 5.29                             | 6.81                         | 0.34           |
| PEPV-300 | 170.5        | 6.7        | 65.0                         | 5.20                             | 6.69                         | 1.20           | 5.49                             | 7.42                         | 0.71           |
| PEPV-600 | 179.5        | 6.3        | 45.0                         | 4.70                             | 7.05                         | 5.93           | 5.26                             | 6.27                         | 2.27           |
| PVA-0    | 161.5        | 4.3        | 83.5                         | 7.11                             | 7.11                         | 0.02           | —                                | —                            | —              |
| PVA-300  | 169.5        | 4.0        | 69.8                         | 5.61                             | 5.83                         | 0.29           | —                                | —                            | —              |
| PVA-600  | 172.5        | 5.0        | 50.1                         | 4.15                             | 6.61                         | 4.03           | 4.91                             | 6.51                         | 1.08           |

性が認められた。同じ繊維種類の供試体の材齢1ヶ月での結果を比較すると、石灰石粉の置換率が增加するほど、ひび割れ発生強度が低下し、終局ひずみが大きくなる傾向を示した。これは、石灰石粉を置換すると、セメントの希釈効果によってモルタルマトリックス強度が低下したためであると考えられた。終局ひずみはいずれの配合でも材齢1ヶ月から材齢3ヶ月までの間に低下した。これらは、マトリックスの強度が大きくなり、繊維の抜け出しが生じにくくなったためであると考えられる。

2.3.2 ひび割れ性状検討

図-1 に平均ひび割れ幅とひずみの関係を示す。PVA 繊維を用いた供試体は PE 繊維を用いたものよりも平均ひび割れ幅が大きくなった。これらの理由としては、PE 繊維に比べて PVA 繊維の弾性係数が小さく、ひび割れ部での繊維の伸びが大きいためであると考えられる。また、いずれの配合で引張ひずみ 1%からひび割れ幅の増加率が小さかった。

PVA-600 の供試体は、平均ひび割れ幅が各配合と比べおよそ 2 倍となり、ひび割れ本数が少なかった。これは、石灰石粉の置換量が大きいことと繊維の弾性係数が小さいため、繊維とマトリックスの境界面付着が弱くなり、繊維の伸びや抜け出しが大きくなり、ひび割れ幅が大きくなったものと考えられる。

3. 物質侵入抵抗性に関する実験

3.1 使用材料および配合

使用材料は 2.1 に示した材料と同一である。配合は表-1 に示した石灰石粉の置換量 600kg/m<sup>3</sup> の配合を除いた HPRCC と、繊維を混入していないモルタル配合 (M 配合。W/C =0.3) を用いた。M 配合は繊維補強が施されていないため、ひび割れ幅を制御するために繊維補強プラス

チックの棒 (FRP) を埋め込んだ。

3.2 供試体概要

1 配合ごとに一軸引張試験用のダンベル型供試体を 10 個ずつ作製した。本研究では微細ひび割れが発生した HPRCC の塩分浸透性を検討するため、ひび割れ発生位置をできる限り特定させることを目指した。そこで1ヶ月の養生後、ダンベル型供試体の2側面にコンクリートカッターで深さ3mm 幅2mmの切欠きを導入した。その後、ダンベル型供試体にひび割れ導入を行った。

ひび割れ導入後、図-3のように濃度3.0%のNaCl水溶液に3日間浸漬、その後4日間乾燥というサイクルを繰り返した。浸漬・乾燥とも20°Cで行った。供試体の向きは打設面が横、切欠きの2ヶ所が上下となるようにした。所定の劣化促進1ヶ月において各配合3個ずつ取り出し、一軸引張試験器を用い、供試体を完全に引張破断させた後、蛍光X線分析装置を用いて、図-4のように、浸漬方向に対して供試体断面の左部 (Left) 、内部 (Middle) 、

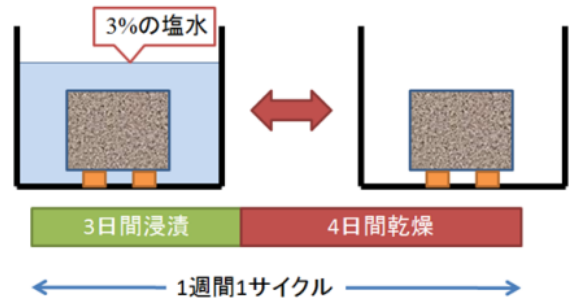


図-3 乾湿繰り返し試験

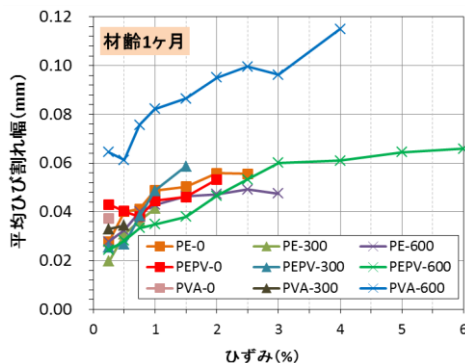


図-1 平均ひび割れ幅とひずみの関係

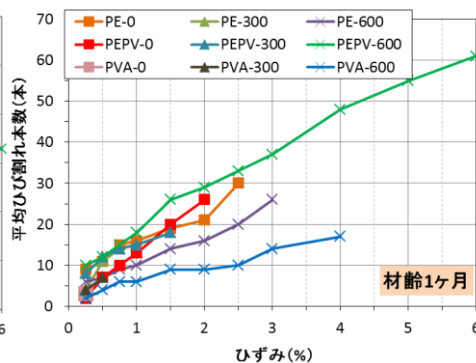


図-2 ひび割れ本数とひずみの関係

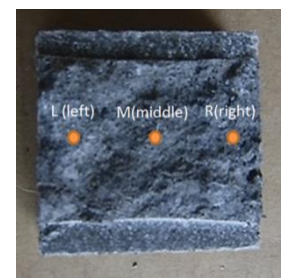


図-4 蛍光 X 線分析測定位置

右部 (Right) の3個所の塩化物イオン量を計測した。

### 3.3 実験結果

図-5に塩化物イオン量の一例を示す。測定位置の左部 (L) と右部 (R) は内部 (M) に比べて塩化物イオン量が大きかった傾向と見られた。これは、左部 (L) と右部 (R) は供試体表面との間隔が小さかったため、塩水が多く到達したと考えられた。

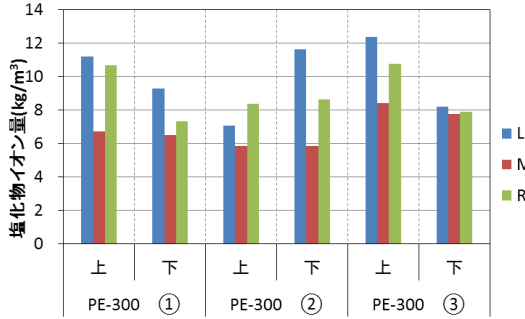


図-5 塩化物イオン量の一例

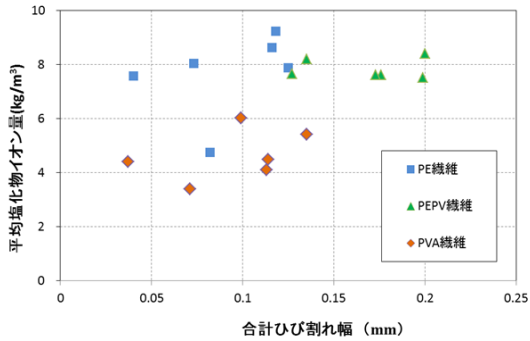


図-6 合計ひび割れ幅と塩化物イオン量の関係

図-6に合計ひび割れ幅と塩化物イオン量の関係を示す。PVA繊維を用いた供試体はPE繊維とPEPV繊維を用いたものよりも塩化物イオン量が低かった。これは、PVA繊維の供試体はひび割れ本数が少なかったため、塩分の浸透が流れにくいと考えられた。PE繊維を用いた供試体はPEPV繊維のものを比較すると、合計ひび割れ幅が小さかったが、塩化物イオン量が同程度であった。本研究では、合計ひび割れ幅と平均塩化物イオン量の相関が見られなかった。

## 4. 鉄筋防食性能に関する実験

### 4.1 使用材料と配合

使用材料と配合は3.1項に示したものと同一である。

### 4.2 供試体概要

供試体は図-7に示す長さ1700mm、幅100mm、高さ50mmはり部材から切り出して作製した。はり部材は全断面がHPFRCCで、1配合ごとに2本ずつ作製し、1ヶ月間の湿布養生を行った。その後、図-8のように一軸引張荷重を行い、ひび割れを導入した。ひび割れ発生の確認は目視にて行い、ひび割れ発生個所で顕微鏡 (倍率50倍) を使用してひび割れ幅を計測した。HPFRCCの部材では、ひび割れ幅が0.03mmに達するまで、引張荷重を行い除荷した。

供試体の打設面と底面 (打設面の反対) の2面を塩化物イオン浸透面とするため、図-9のように供試体の4面 (横2面と切断面2面) のみを湿潤面用被覆材でシーリング処理をした。

3.2項に示した乾湿繰り返し試験終了後、供試体内部

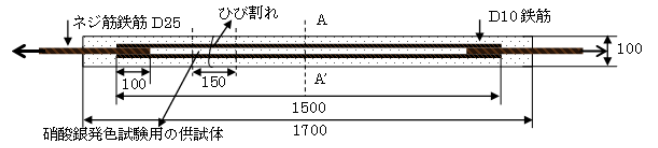


図-7 はり部材

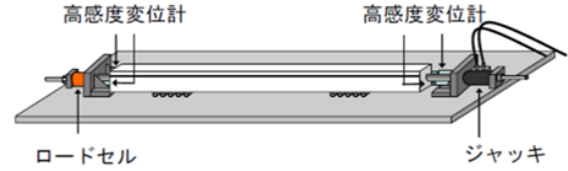


図-8 ひび割れ導入方法

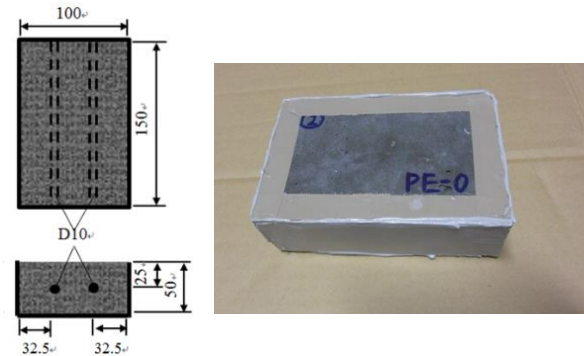


図-9 供試体概要

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。その後、硝酸銀水溶液 (0.1mol/l) を霧吹きで割裂面に散布し、供試体の打設面と下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。

### 4.3 実験結果

#### 4.3.1 ひび割れ性状

図-10からわかるように、各配合の平均ひび割れ幅は同程度 (0.02~0.03mm) であったが、PVA繊維の配合はPEPV繊維とPVA繊維を用いたものよりも最大ひび割れ幅が大きかった。これは、PVA繊維の弾性係数が低いことから、繊維の伸びが大きいと考えられた。最大ひび割れ幅は石灰石粉を置換すると、若干大きかった。

#### 4.3.2 塩水浸透性試験

モルタル配合Mで、塩分は大きな1本のひび割れから浸透し、ひび割れから供試体の内部深くまでモルタルに浸透し、打設面から底面までに達していた。HPFRCCの配合では、微細なひび割れに沿って塩分の浸透が見られたものの、その浸透深さは配合Mと比較して小さかった。図-11からわかるように、PEPV繊維を用いた供試体はPE繊維とPVA繊維を用いた供試体より最大塩分浸透深さが大きかった。これらは、PEPVを用いた供試体はPE繊維とPVA繊維を用いたものと比較すると、ひび割れ幅が大きくなかったが、ひび割れ間隔が近いことから、各ひび割れの繋がりが多くなり、塩分浸透が生じやすいためと考えられた。そして、PVA繊維を用いた供試体はPE繊維のものよりも最大塩分浸透深さが大きかった。これは、PVA繊維を用いた供試体はひび割れ幅が大きかったためと考えられた。

ひび割れがない所の塩分浸透深さは、PE繊維とPVA繊維を用いた供試体を比較すると、石灰石粉の置換により、塩分浸透深さは大きかった。これは、セメントの一

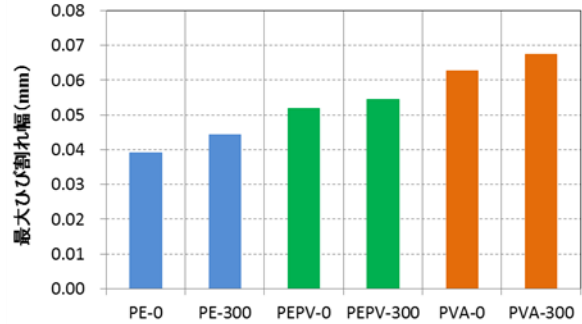
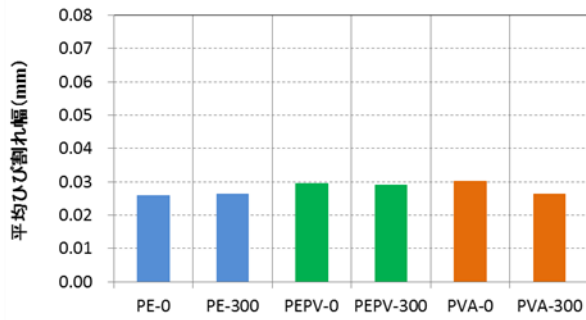


図-10 供試体のひび割れ性状

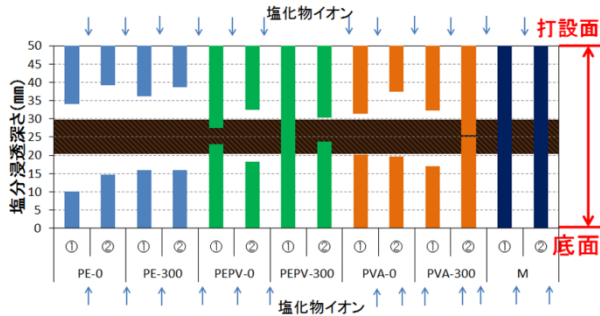


図-11 塩分浸透深さ

部で石灰石粉を置換すると、水セメント比が大きくなったためと考えられた。

#### 4.3.3 腐食面積率

各供試体の腐食面積率は表-3に示す。PE繊維を用いた供試体は鉄筋が全て錆びていなかった。これは、前項に示したようにPE繊維を用いた供試体は、最大ひび割れ幅が小さく、塩化物イオンはひび割れを通じて鉄筋位置まで達しているものの、その面積が非常に小さいためと考えられた。

表-3 腐食面積率

| 配合       | 供試体 No. | 腐食面積 (cm <sup>2</sup> ) |       | 腐食面積率 (%) |       |
|----------|---------|-------------------------|-------|-----------|-------|
|          |         | 上部の鉄筋                   | 下部の鉄筋 | 上部の鉄筋     | 下部の鉄筋 |
| PE-0     | 1       | —                       | —     | —         | —     |
|          | 2       | —                       | —     | —         | —     |
| PE-300   | 1       | —                       | —     | —         | —     |
|          | 2       | —                       | —     | —         | —     |
| PEPV-0   | 1       | —                       | —     | —         | —     |
|          | 2       | —                       | —     | —         | —     |
| PEPV-300 | 1       | 5.5                     | 5     | 11.7      | 10.6  |
|          | 2       | 4.5                     | 1.5   | 9.5       | 3.2   |
| PVA-0    | 1       | —                       | —     | —         | —     |
|          | 2       | 0.3                     | 0.3   | 0.6       | 0.6   |
| PVA-300  | 1       | —                       | 3.4   | —         | 7.2   |
|          | 2       | 3                       | 3.5   | 6.4       | 7.4   |
| M        | 1       | 2.9                     | 4.2   | 6.2       | 8.9   |
|          | 2       | 4.2                     | 6.6   | 8.9       | 14.0  |



図-12 塩分浸透深さと腐食面積率の関係

図-11からわかるように、石灰石粉の置換量が0のもの、300のものを比較すると、最大塩分浸透深さが同程度であった。しかし、PEPV-300とPVA-300の鉄筋の腐食面積が比較的大きかったのに対して、PEPV-0とPVA-0については、鉄筋に腐食が全くないか、あってもすごく小さな面積であった。これは、PEPV-300の供試体とPVA-300の供試体は、石灰石粉で置換して、水セメント比が大きいためと考えられた。図-12に打設面と下面との合計塩分浸透深さと腐食面積との関係を示す。石灰石粉の置換量が300の供試体では図中の直線に示すように相関係数0.81であり、塩分浸透深さと腐食面積率との間に高い相関関係が認められた。

#### 5. 結論

本研究では、下記の結果が得られた。

- (1) PE繊維を用いた供試体の比較から、PVA繊維のものは流動性が大きく、空気量が小さく、圧縮強度が大きかった。PVA-0の配合以外、全体的にHPFRCCの擬似ひずみ硬化特性と複数微細ひび割れ特性が認められた。石灰石粉の置換率が増加すると、ひび割れ発生強度が低下し、終局ひずみが大きくなる傾向を示した。PVA繊維を用いた供試体はPE繊維を用いたものよりも平均ひび割れ幅が大きくなった。引張ひずみ1%からひび割れ幅の増加率が小さく、平均ひび割れ間隔が小さかった。
- (2) PVA繊維を用いた供試体はPE繊維とPEPV繊維を用いたものよりも塩化物イオン量が低かった。本研究では、合計ひび割れ幅と平均塩化物イオン量の相関が見られなかった。
- (3) PEPV繊維を用いた供試体はPE繊維とPVA繊維より最大塩分浸透深さが大きかった。ひび割れがない所の塩分浸透深さは、PE繊維とPVA繊維を用いた供試体での比較から、石灰石粉を置換すると、塩分浸透深さが大きかった。
- (4) PE繊維を用いた供試体は鉄筋が全て錆びていなかった。PEPV-300とPVA-300の鉄筋の腐食面積が比較的大きかったのに対して、PEPV-0とPVA-0については、鉄筋に腐食が全くないか、あってもすごく小さな面積であった。モルタルMの供試体は鉄筋が錆びていた。

#### 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127，2007.3
- 2) Koichi Kobayashi, Takahiriizuka, HoshitoKurachi, KeitetsuRokugo：“Corrosion protection performance of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites as a repair material”. Cement & Concrete Composites, vol 32: pp 411-420, 2010