

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 SHCC）¹⁾は、一軸引張応力下において疑似ひずみ硬化挙動を示し、複数微細ひび割れを形成する材料である。そのひび割れ幅は数 $10\mu\text{m}$ と微小であるため、高い鉄筋防食性能を持つことが期待され、鉄筋腐食が生じたコンクリート部材用の補修材としての適用が検討されている²⁾。しかし SHCC のひび割れ性状は、そのモルタルマトリックスの配合や用いる繊維の種類、量、さらにはモルタルマトリックスと繊維との付着性状によって異なる。SHCC 中に侵入する劣化因子は、ひび割れを通じて内部に移動するため、SHCC の配合が物質侵入抵抗性および鉄筋防食性能に与える影響は大きいものと考えられる。

本研究では水セメント比、繊維種類などが異なる配合の SHCC 供試体を作製し SHCC を補修材としての性能のうち、物質侵入抵抗性、鉄筋防食性能について検討を行うことを目的とした。

2. SHCC のひび割れからの物質侵入に対する抵抗性

2.1 実験概要

表-1 に使用した配合を示す。繊維は高強度ポリエチレン（以下、PE）繊維、ポリビニルアルコール（以下、PVA）繊維、PE 繊維と PVA 繊維の併用（以下、PEPV 繊維）の 3 種類を使用した。またモルタルマトリックスの W/C の影響を確認するためセメントの一部を石灰石微粉末で 1m^3 当り 0,300 (kg) 置換した。一方、繊維を混入していない W/C=0.3, C/S=0.5 のモルタル（M 配合）も用いた。各配合のダンベル型供試体（図-1）に対して、一軸引張試験器でひび割れ導入を行った。また普通モルタル供試体はひび割れ導入時の破断をさけるために、

直径 5mm 程度の FRP 棒を埋め込んである。

その後、恒温室内に設置した乾湿繰返し装置内で濃度 3% の NaCl 溶液に 3 日間浸漬し、4 日間燥させるサイクルに 2 ヶ月、あるいは 6 ヶ月間それぞれ 3 体ずつ曝した。

以後 2 ヶ月間繰返し

し試験を行ったものを 2 か月測定、6 ヶ月のものを 6 ヶ月測定と呼ぶ。供試体は乾湿繰返し装置内に打設面が鉛直になるように配置した。その後、一軸引張荷にて供試体をひび割れ面にて完全に破断させた上で、蛍光 X 線分析装置を用いてひび割れ面の表面近傍における塩化物イオン量を測定した³⁾。測定位置は供試体の打設面を上とした時、上から順に上、中、下の 3 箇所塩化物イオン量を測定した。

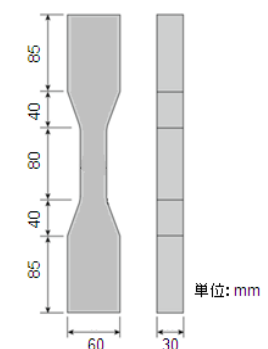


図-1 ダンベル供試体

2.2 実験結果および考察

図-2 に 2 ヶ月測定塩化物イオン量を示す。測定位置上、下は中に比べて塩化物イオン量が大きい傾向が見られた。これは上と下は供試体表面に近いこと、塩水が到達しやすく、塩化物イオン量が侵入しやすいことである。

配合同士で比較すると PE 繊維、PEPV 繊維を用いた供試体の方が PVA 繊維、M 配合よりも塩化物イオン量が大きくなった。PE 繊維を用いた供試体ではひび割れが発生した箇所で繊維が抜け、その抜けた箇所に塩化物イオンが蓄積したため塩分量が多くなった可能性がある。ひび割れ幅が極めて小さくとも、そのひび割れを通じて塩分は内部に侵入することが明らかとなった。

表-1 配合表

名称	W/C	配合重量比(kg/m ³)								
		セメント	水	石灰石	6号珪砂	7号珪砂	増粘剤	減水剤	PE繊維	PVA繊維
PE-0	0.29	1264	371	0	195	200	0.9	28.2	14.6	0
PE-300	0.38	964	371	300	195	200	0.9	25.9	14.6	0
PEPV-0	0.29	1264	371	0	195	200	0.9	28.1	7.3	13
PEPV-300	0.38	964	371	300	195	200	0.9	18.3	7.3	13
PVA-0	0.29	1264	371	0	195	200	0.9	5.8	0	26
PVA-300	0.38	964	371	300	195	200	0.9	4.4	0	26

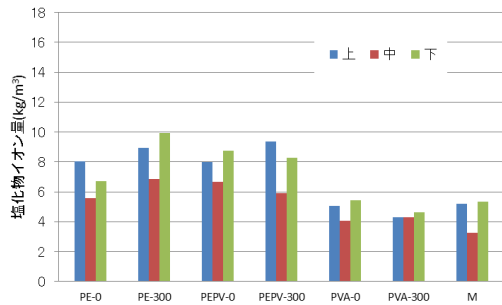


図-2 2ヶ月測定塩化物イオン量結果

3. ひび割れが発生した SHCC の鉄筋防食性能

3.1 実験概要

配合は 2.1 節と同じものを用いた。供試体概要を図-3 に示す。はり部材を 1 配合につき 2 体ずつ作製し、一軸引張載荷にてひび割れを導入した。ひび割れ導入後、はり部材 1 体につき長さ 150mm の寸法で供試体を 2 体切り出して供試体とした。その後 50 倍のマイクロスコップを用いて供試体のひび割れ性状を測定した。

塩分の浸透を供試体上下面(100×150mm の面)からに限定するため、エポキシ樹脂を供試体側面 4 側面に塗布した。鉄筋腐食を促進するために、2.1 節と同様の濃度 3% の NaCl 溶液による乾湿繰返し環境下にさらした。期間は 2 ヶ月、6 ヶ月の 2 種類である。所定の乾湿繰返し期間が経過した後、供試体内部の鉄筋の腐食状況、塩分浸透度を確認するため、供試体を鉄筋と平行方向に割裂させ、断面に硝酸銀水溶液を噴霧し、断面の色の变化から塩分浸透部分を調査した。その後、鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食面積をプラニメーターにより測定した。

3.2 実験結果および考察

表-2 に供試体のひび割れ性状を示す。図-4 に 2 ヶ月測定の最大塩分浸透深さを示す。PEPV 繊維を用いた供試体は他の SHCC の供試体より最大塩分浸透深さが大きかった。これは PEPV 繊維を用いた供試体は、他の SHCC 供試体とひび割れ幅は同程度であったが、ひび

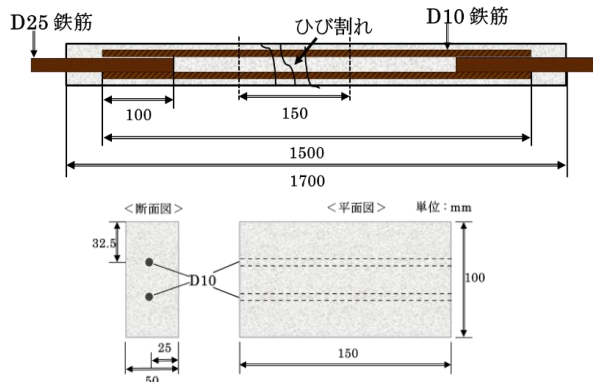


図-3 供試体概要

表-2 切り出し供試体ひび割れ性状

配合	ひび割れ本数	ひび割れ幅(mm)		平均ひび割れ間隔(mm)
		平均	最大	
PE-0	6~15	0.018~0.031	0.023~0.112	6.3~26.2
PE-300	3~11	0.018~0.032	0.020~0.064	7.0~20.3
PEPV-0	15~27	0.024~0.030	0.041~0.081	5.0~7.9
PEPV-300	8~33	0.017~0.036	0.020~0.102	4.0~16.7
PVA-0	6~15	0.020~0.037	0.020~0.110	1.0~18.8
PVA-300	4~12	0.020~0.033	0.029~0.143	10.3~22.5
M	1~3	0.022~0.325	0.023~0.633	0~61

割れ本数が多いこと、ひび割れ間隔が狭いことが理由に考えられる。ひび割れ同士の結合や相互作用が多くなり、塩分が浸透しやすい状況であったと考えられる。また PVA-300 の供試体では、塩分が鉄筋位置まで浸透していた供試体も存在した。これは、この供試体の最大ひび割れ幅が全供試体中で最も大きい値であったためである。6 ヶ月測定では、すべての供試体において塩分は鉄筋位置に達していた。

図-5 に 6 ヶ月測定供試体のひび割れ本数と鉄筋腐食面積率の関係を石灰石微粉末量別に示す。PEPV 繊維を用いた供試体とモルタル供試体は PE 繊維、PVA 繊維を用いた供試体より大きい値となった。PE 繊維、PVA 繊維を用いた供試体では、石灰石微粉末置換量 300 kg/m³ の方が 0 より大きい値となった。これは置換量 300 kg/m³ の供試体の方が水セメント比が大きいためであると考えられる。

SHCC 供試体はモルタル供試体と比較すると、ひび割れ本数が多いが、鉄筋腐食面積率は小さく、鉄筋防食性能が高い。しかし、PEPV 供試体のようにひび割れ本数が、多くなりすぎるとモルタル供試体よりも鉄筋腐食面積率は大きくなった。これは、モルタル供試体では局部腐食が生じたのに対して PEPV 繊維を用いた供試体では広範囲で腐食が生じたためであると考えられる。

SHCC 供試体ではひび割れ本数が増加する

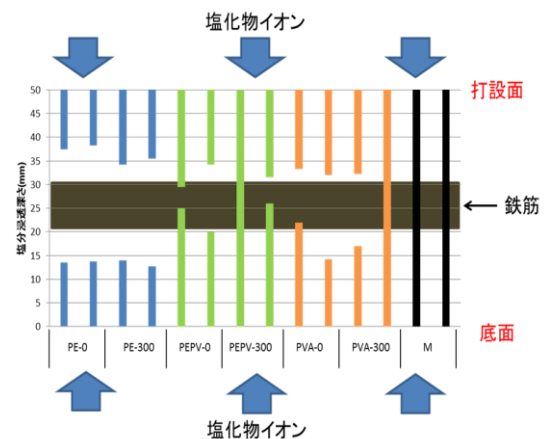


図-4 2ヶ月測定供試体最大塩分浸透深さ

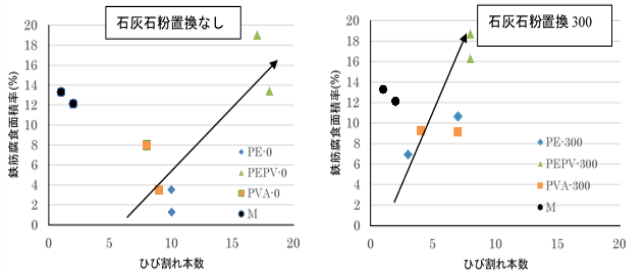


図-5 6ヶ月供試体のひび割れ本数と腐食面積率

につれて、鉄筋腐食面積率も大きくなった。また、置換量 300kg/m³の供試体は置換量 0 の供試体と比較すると、ひび割れ本数の増加に伴う鉄筋腐食面積率の増加率が大きい。これは、鉄筋防食のためには SHCC のモルタルマトリックスの水セメント率が重要であることを示している。

4. 吹き付け施工した積層供試体の鉄筋防食性能

4.1 実験概要

本実験では、塩害を受けた鉄筋コンクリートへの補修を模擬するために図-6の供試体を作製した。高さ70mmまで母材コンクリートで作製し、残り30mmをSHCCで吹き付け補修した。表-3に吹き付け補修したSHCCおよび母材コンクリートの配合を示す。PE-25およびPVA-25の配合は必要最小限の引張靱性を確保した上で、セメント量を低減し、かつ、ワーカビリティを改善するため、PE-0とPVA-0のセメントの25%を石灰石粉で置換した。SHCCの吹き付け面方向を鉛直面（以下V）と水平面（以下H）の2種類行った。供試体は28日湿布養生した。ボルトを通すための削孔を行った後に載荷試験器で曲げひび割れを導入した。その後、除荷した供試体をI型鋼に設置し、設定した変位1mmになるまでボルトを締め上げ固定した。

4.2 試験概要

I型鋼に固定した後に、50倍のマイクロスコブを用いてひび割れ幅を計測した。その後図

表-3 SHCC および NC の配合表

名称	W/C	単位質量(kg/m ³)									
		セメント	水	石灰石微粉末	6号珪砂	7号珪砂	増粘剤	減水剤 (ポリカルボン酸系)	減水剤 (リグニンスルホン酸系)	PE	PVA
PE-0	0.30	1260	378	0	208	208	0.25	1.43	2.10	12.1	0
PE-25	0.40	945	378	315	189	189	0.25	1.07	2.05	12.1	0
PVA-0	0.30	1260	378	0	208	208	0.25	1.01	2.10	0.0	26
PVA-25	0.40	945	378	315	189	189	0.25	0.66	2.05	0.0	26

NC	W/C	単位水量(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

-7 のように上部にアクリル板とシリコンで貯水槽を設置し、濃度 3% の NaCl 溶液を貯水槽に溜め、ひび割れ面を浸漬させることと、溶液を除いて供試体を乾燥させることを繰り返した。浸漬を3日間、乾燥を4日間で1サイクルとし、2, 4 ヶ月間この乾湿繰返しサイクルを続けた。

所定の乾湿繰返し期間が経過した後、供試体内部の鉄筋の腐食状況、塩分浸透度を確認するため、供試体を鉄筋と平行方向に割裂させ、断面に硝酸銀水溶液を噴霧し、塩分浸透部分を調査した。その後鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食面積率と質量減少率を測定した。

4.3 実験結果および考察

図-8 に鉄筋腐食面積率と質量減少率の結果を示す。乾湿繰返し期間2ヶ月では腐食面積率の供試体による差は見られなかったが、乾湿繰返し期間4ヶ月において、多少ではあるがPVA繊維を用いた供試体の方がPE繊維を用いた供試体よりも鉄筋腐食面積率が大きくなった。特に4ヶ月供試体のPVA-0Hは他と比べて大きくなった。また乾湿繰返し期間4ヶ月の供試体において、水平面打設(H)は垂直面打設(V)と比べて腐食面積率は大きくなった。これはVでは重力によるSHCCの流動により繊維が長さ方向に配向したことや、巻き込み空気量が異なることが原因だと考えられる。

乾湿繰返し期間2ヶ月の供試体ではすべての配合において質量減少率の差はあまり見られなかった。PVA-25において、乾湿繰返し期間2ヶ月と4ヶ月の供試体の差が他の配合の供試体と比べて大きかった。

図-9 に鉄筋腐食面積率とひび割れ性状の関係を示す。2ヶ月、4ヶ月ともにPVA繊維を用いた供試体の方がPE繊維を用いた供試体よりも平均、最大ひび割れ幅が大きい。特に4ヶ月

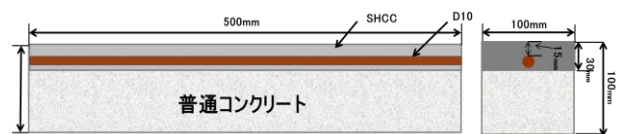


図-6 曲げ供試体概要

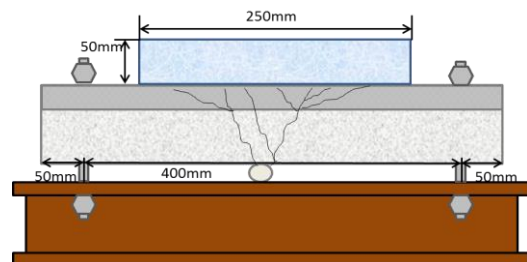


図-7 乾湿繰返し環境

供試体においては、PVA 繊維を用いた供試体の方が腐食面積率は大きくなる傾向が見られた。セメント量による影響は見られなかった。

図-10 に鉄筋質量減少率とひび割れ性状の関係を示す。腐食面積率と同様、4 ヶ月供試体において PVA 繊維を用いた供試体は PE 繊維を用いた供試体と比べ平均、最大ひび割れ幅が大きく、質量減少率は大きい傾向が見られた。このように PE 繊維を用いた供試体の方が鉄筋防食性能は高い傾向が見られる。これはひび割れ幅が狭いことにより、腐食要因である酸素や水分が鉄筋位置まで到達しにくいためと考えられる。しかし PVA 繊維を用いた供試体との腐食面積率、質量減少率の差は小さいため、今後長期にわたる乾湿繰返し試験を行う必要がある。

5. まとめ

本研究では、SHCC の補修材としての性能を検討することを目的として、繊維種類、セメント量などが異なる SHCC 供試体を作製し、SHCC 物質侵入抵抗性試験、鉄筋防食性能試験を行った。

- (1) SHCC のひび割れからの物質侵入抵抗性
 - ・ SHCC には微細ひび割れを通じて塩分が侵入し、ひび割れ面の塩分量にひび割れ幅が与える影響はなかった。
- (2) ひび割れが発生した SHCC の鉄筋防食性能
 - ・ SHCC 内の鉄筋の腐食面積率は、ひび割れ本数と水セメント比に大きく依存する。
- (3) 吹き付け施工した積層供試体の鉄筋防食性能
 - ・ 乾湿繰返し期間 4 ヶ月において、PVA 繊維を用いた供試体は PE 繊維を用いた供試体よりも若干鉄筋腐食面積率が大きくなった。

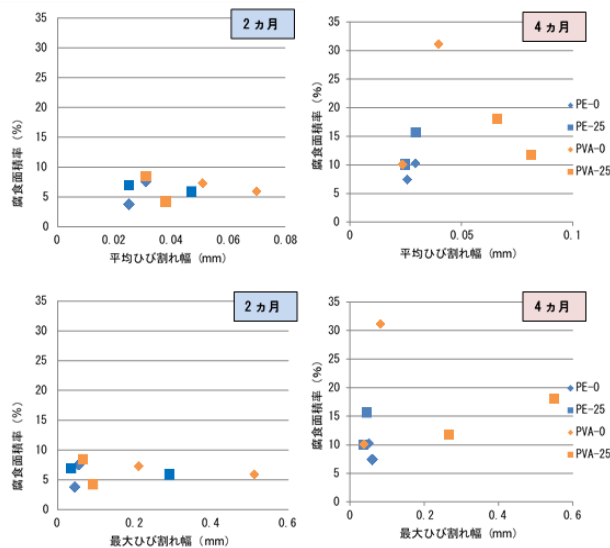


図-9 ひび割れ性状と腐食面積率の関係

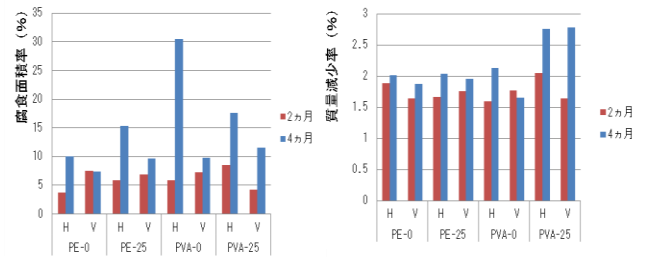


図-8 鉄筋の腐食面積率と質量減少率結果

た。また水平面打設 (H) は垂直面打設 (V) と比べて腐食面積率が大きくなった。

- ・ 乾湿繰返し期間 4 ヶ月の供試体では、PVA を用いた供試体は PE を用いた供試体と比べ平均、最大ひび割れ幅が大きく、鉄筋の腐食面積率と質量減少率は大きい傾向が見られた。

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, Takashi Iizuka, 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) 金田尚志, 魚本健人：塩化物測定用ポータブル型蛍光 X 線分析装置の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 1095-1100, 2007

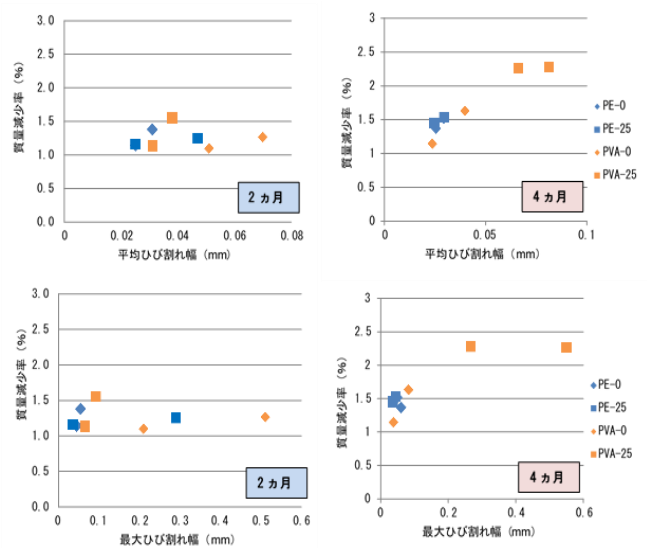


図-10 ひび割れ性状と質量減少率の関係