

# 論文 ひび割れを導入した円筒供試体を用いた止水性材料の性能評価方法

宮元 智之\*1・浅野 翔也\*2・浅野 幸男\*3・六郷 恵哲\*4

**要旨:** ひび割れを導入した円筒供試体を用い、ひび割れ部の止水性の改善を目的とした補修材料の性能評価方法を提案した。円筒供試体を普通モルタルと HPFRCC により作製し、ひび割れを導入した円筒供試体の透水試験を行い、透水速度比により各止水材料の性能評価を行った。止水性材料として、珪酸塩系表面含浸材、シラン系表面含浸材、アルギン酸ナトリウム溶液及び粘土溶液の 4 種類を用いた。透水時間比には、止水性材料の性能差が明確に現れ、提案した評価方法の有効性を確認した。

**キーワード:** ひび割れ, 止水性材料, 珪酸塩系表面含浸材, 撥水剤, アルギン酸ナトリウム

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の長寿命化を目的に、補修・補強用の新材料・新工法の提言や指針類<sup>1)2)</sup>の整備が進められている。コンクリート構造物に生じるひび割れは、鉄筋腐食による耐荷性能や美観性能の低下や、漏水による使用性能の低下の要因となる。今後、ひび割れの補修や充填を対象とした補修材料や工法の技術開発が加速するものと思われる。

既存の補修材料の性能評価や新しい補修材料の開発には、ひび割れを導入した供試体を用いた評価試験方法の確立が不可欠となる。供試体のひび割れ導入方法としては、はり状供試体を用いて一軸引張(両引き)を行う方法<sup>3)</sup>、供試体をカッターで切り出し所定厚のテフロンシート等を挟み込む方法<sup>4)</sup>等が提案されている。しかしながら、両引きの場合では供試体に引張力を加えるための装置が必要で、設備面や効率面でやや難がある。カッターで切り出した供試体を用いる場合では、ひび割れ破面が平面的な滑面となるため、実際のひび割れ形状と異なるという課題がある。筆者らは先に、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composite)のひび割れ性状を確認するための試験方法として、円筒供試体を用いた引張試験方法を提案した<sup>5)</sup>。

本研究では、先に提案した方法でひび割れを導入した円筒供試体の透水試験を行い、ひび割れ部の止水性の改善を目的とした補修材料の性能評価を行った。止水性材料としては、珪酸塩系、シラン系の表面含浸材、アルギン酸ナトリウム溶液<sup>6)</sup>及び粘土溶液の 4 種類をとりあげた。それらの性能評価を透水試験で行った。止水性材料の有無による透水速度比には、供試体の種類や材料の違いによる性能差が明確に現れ、提案した評価方法の有効

性を確認した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

#### (1) 種類

表-1 に供試体の作製に用いた材料を、表-2 に普通モルタル(以下, NM)と HPFRCC(以下, HP)の配合を示す。供試体は外径 150mm, 内径 106mm, 高さ 108mm の円筒状のもので、NM と HP により、各 6 体ずつ作製した。ひび割れ導入後のひび割れ幅を安定させる目的で、SD345 相当のφ3mm の異形鉄筋<sup>7)</sup>をラセン状に加工(3 巻き、鉄筋とコンクリートの断面積比: 0.9%)し、全ての供試体に配置した。

#### (2) 作製方法

供試体の作製には、外径 150mm, 高さ 150mm の引張強度試験用の型枠を外型枠に、市販の外径 106mm の紙管を内型枠に用いた。NM および HP を容量 10ℓ のホバー

表-1 使用材料

材 料	物 性
セメント	早強ポルトランドセメント 密度3.13g/cm <sup>3</sup>
細骨材	NM: 砂 密度2.59g/cm <sup>3</sup> HPFRCC: 7号珪砂 密度2.63g/cm <sup>3</sup>
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
増粘剤	メチルセルロース系
織 維	高強度ポリエチレン(PE) 径12μm 長さ12 引張強度2.6GPa 弾性係数88GPa
鉄 筋	SD345相当のφ3mmの異形鉄筋 <sup>7)</sup> 降伏強度372N/mm <sup>2</sup> 引張強度480N/mm <sup>2</sup>

\*1 杉山建設株式会社 (正会員)

\*2 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*3 岐阜大学 社会資本アセットマネジメントセンター 博士(工学) (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	高性能AE 減水剤	増粘剤	繊維
NM	32.5	188	576	1440	11.52		
HP	30.0	380	1264	395	37.92	0.9	14.6



図-1 鋼球の充填状況



図-2 ひび割れの導入状況



図-3 ひび割れの測定位置

トミキサで練り混ぜ、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に規定するテーブルバイブレータを用いて供試体を成形した。成形翌日に脱型して水中養生を6日間行い、以降は、恒温室内で気中養生を行った。材齢1年目でひび割れを導入し、その後、再度恒温室内で1年養生した後、止水性材料の性能評価試験に用いた。

## 2.2 ひび割れの導入と測定方法

### (1) ひび割れの導入方法

円筒供試体の底面(下側)に、供試体と同一の平面形状を有するドーナツ型鋼板を用いて約30mmの空間を確保し、空間底部に硬質ゴム板を設置した後、図-1に示すような直径2.8mmの鋼球を供試体内部に充填した。鋼球を充填した円筒供試体の上面に、直径100mm、厚さ12mmの鋼板を設置し、鋼球に圧縮力を作用させた。供試体底面の空間の確保は、鋼球が骨格を形成するいわゆる「せりもち効果」を低減するために行った。

圧縮試験機による円筒供試体へのひび割れの導入状況を図-2示す。供試体高さの中央で、円周方向の直交4方向の位置に高感度変位計を取り付け、供試体に生じる直径方向の膨張ひずみを測定した。膨張ひずみは直行する2方向の値の平均値を合算し、その値を外側直径(150mm)で除して算出した。NM2, NM3, NM5の供試体では降伏直後に除荷し、NM1, NM4, NM6供試体ではひび割れの発生挙動を観察するために、膨張ひずみが0.8%となる付近まで荷重を加えた。HP供試体では、いずれも局所ひび割れが発生するまで荷重を加えた。

### (2) ひび割れの測定方法

供試体の上面から10mm、中央、下面から10mmの位置に図-3に示すような紙製のスケールを貼付し、マイクロSCOOP(撮影倍率100倍)によりひび割れの発生位置、幅、数量を測定した。

## 2.3 止水性材料の性能評価

### (1) 止水性材料

珪酸塩系表面含浸材(銘柄が異なる2種類)、シラン系表面含浸材(撥水材)、粘土溶液、アルギン酸ナトリウム溶液を止水性材料として用いた。珪酸塩系並びにシラン系の表面含浸材は市販されているもので、シラン系はアルキルアルコキシシラン・モノマーを主成分とするものである。粘土は岡山県産の笠岡粘土で、密度2.70g/cm<sup>3</sup>、粒度は75μmふるい残留率が6.3%、63μmでは10.8%のものを用いた。アルギン酸ナトリウムは1.0%水溶液の粘度が300mPa・sとなる試薬を用いた。アルギン酸ナトリウムは供試体中のカルシウムイオンとの反応で海藻ゲル物質(アルギン酸カルシウム)を生成することから、ひび割れ部の止水性を高める効果がある<sup>6)</sup>。

表-3に止水性材料と供試体の組み合わせを示す。この内、珪酸塩系Aの場合では、含浸面(塗布面)の違いによる効果を調べた。大きなひび割れ幅となったNM供試体に珪酸塩系を用いる場合、各々のメーカーが保有する反応補助材を併用した。アルギン酸ナトリウムの1.0%溶液を用いる実験では、酢酸カルシウムの1.0%溶液を反応補助材として用いた。供試体への含浸方法は、珪酸塩系の場合ではHP供試体のようなひび割れ幅が小さい場合ははけで塗布し、NM供試体のようなひび割れ幅が大きい場合は、ひび割れ部に珪酸塩溶液をスポイトで注水した。シラン系の場合、供試体の種類に関わらずはけで塗布した。

### (2) 性能評価の方法

止水性材料の性能評価には、図-4に示す透水試験装置を用いた。止水性材料を含浸させた後、珪酸塩系は14日間、シラン系は7日間養生した後に、透水試験を行った。粘土およびアルギン酸ナトリウムの溶液を用いる実

験では、所定濃度の各水溶液を円筒供試体内部に入れて1日放置した後、円筒管内部の水溶液を排出してから透水試験を行った。

透水試験は水頭が400mmから250mmへ低下するまで(水頭差150mm)の所要時間を測定し、その時の透水量を所要時間で除して透水速度( $\text{cm}^3/\text{min}$ )を算出した。止水性材料を用いた場合と用いない場合の透水速度の比として透水速度比を求め、性能評価の指標とした。

透水試験は20°Cの恒温室内で行い、使用する水の温度を20°Cに調整した。試験精度を向上させるために、透水試験を行う前日から供試体を水頭400mmの位置まで全水没させ、試験当日の透水試験前に水頭を100mm程度まで下げ(3時間程度)、その後透水試験を行った。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 ひび割れの性状

図-5 にひび割れ導入時の荷重-膨張ひずみ曲線の例、図-6 に供試体に発生したひび割れ本数、図-7 にひび割れ幅の分布を示す。各図中の NM2, NM3, NM5 は最初のひび割れが発生した直後に除荷したものであり、NM1, NM4, NM6 は膨張ひずみが0.8%程度となるまで荷重を加えたものである。

NM 供試体によるひび割れの発生形態は、32kN 付近の荷重でひび割れが1本生じた。その後、荷重の増加と共にひび割れ本数も増え、膨張ひずみ0.8%まで(荷重40kN)の荷重では3~6本のひび割れが確認された。ひび割れはほぼ同間隔に発生し、最初に発生したひび割れの幅が荷重の増加と共に拡大する傾向を示した。

図-7 から分かるように NM 供試体の上中下の位置でのひび割れ幅はほぼ同程度であった。各供試体のひび割れ幅(平均値)は、NM2 は0.184mm, NM3 は0.311mm, NM5 は0.177mm であった。

HP の場合、ひび割れの発生箇所は6供試体中の3供試体は上側が多く、残りの3供試体は中央部が多くなった。供試体ごとに上中下の3ヶ所の位置のひび割れ本数の平均値については、最大はHP3の105本、最小はHP6の40本であった。ひび割れ幅の平均値は0.018mm程度で、0.04mm までの範囲に大半のひび割れが分布していることが図-7 から分かる。

本研究の範囲では、ひび割れ幅を十分にコントロールするまでに至っていないが、本実験結果を踏まえると、繊維の種類や混入量を考えることにより、供試体のひび割れ幅の制御も可能になると思われた。

なお、止水性材料の性能評価の実験では、NM 供試体ではひび割れ幅の水準設定に必要なひび割れのみを残し、他のひび割れはエポキシ樹脂で被覆したものをを用いた。HP 供試体の局所ひび割れの箇所も同様な処置をして用いた。

表-3 実験の種類

止水材		供試体		含浸面	
		NM	HP	内面	外面
珪酸塩系表面含浸材	A	◎	○	○	○
	B	◎	○	○	
シラン系表面含浸材		○	○	○	
粘土溶液(%)	10		○	○	
アルギン酸 ナトリウム溶液(%)	0.10		○	○	
	0.25	○		○	
	1.00	◎		○	

※表中の○印は止水性材料の単体使用、◎印は反応補助材との併用を示す

単位(mm)

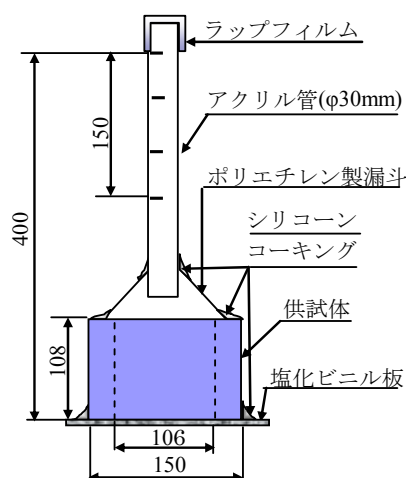


図-4 透水試験装置

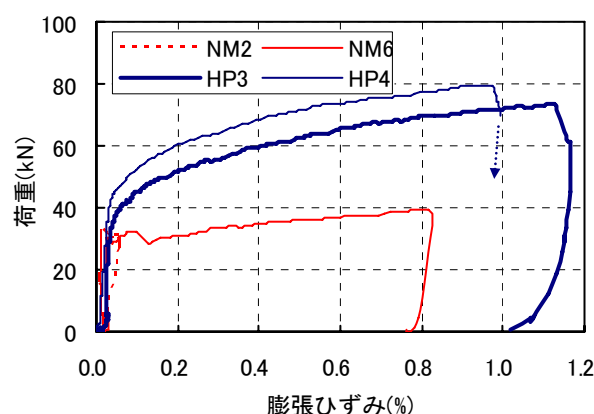


図-5 荷重-膨張ひずみ曲線の例

#### 3.2 止水性材料の性能評価

##### (1) 止水性材料を用いる前の透水特性

表-4 に止水性材料を用いる前の各供試体の透水時間を、図-8 に止水性材料を用いる前の各供試体の最大ひび割れ幅と透水速度の関係を示す。表-4 に示す透水時間は、透水試験を各供試体について連続6回行った結果の平均値であり、ひび割れ幅が大きいNM 供試体の変動係数

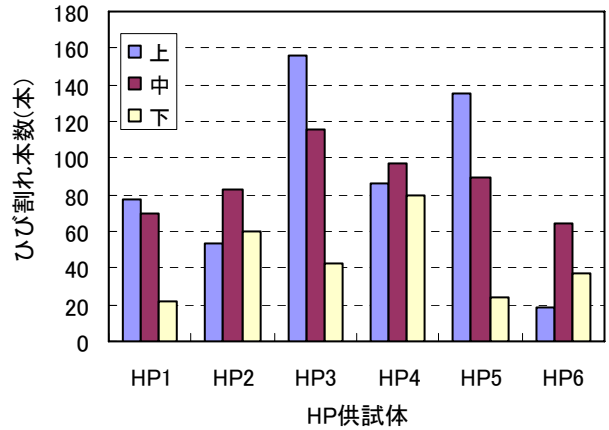
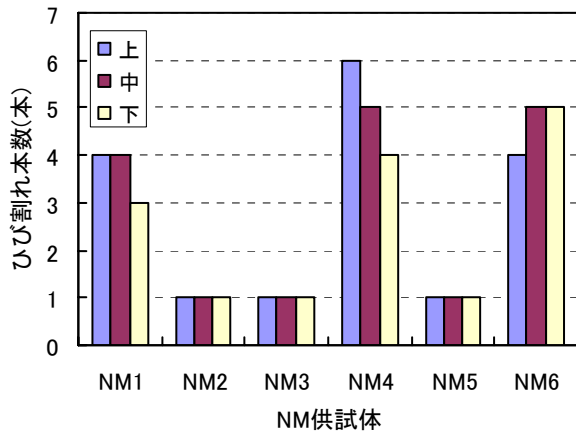


図-6 ひび割れ本数

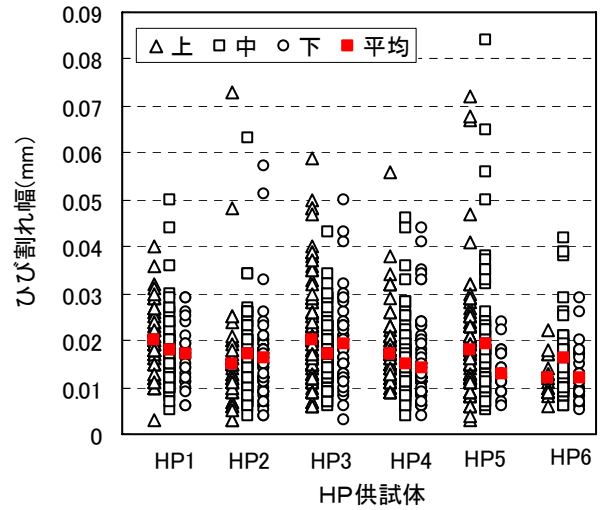
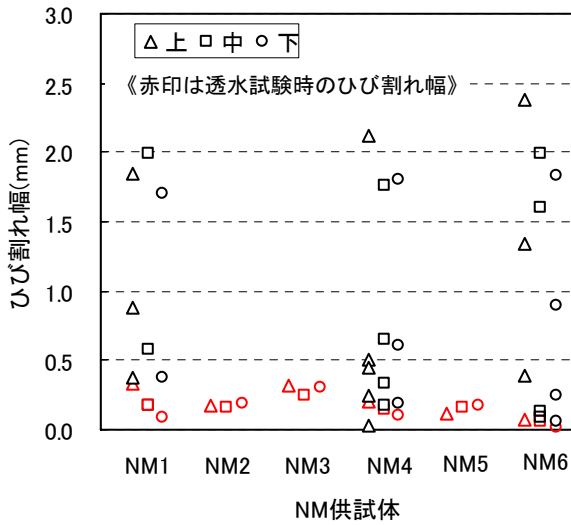


図-7 ひび割れ幅の分布

の平均値は 0.8%，ひび割れ幅が小さい HP 供試体の変動係数の平均値は 1.0%となった。この種の試験方法で試験精度を捉えたものがないため比較検討は難しいが、実験結果からは 2 回程度の平均値を採用すれば実用上の問題は生じないと考えられた。

図-8 に示すように、最大ひび割れ幅は、NM 供試体では 0.078mm～0.332mm、HPFRCC 供試体では 0.042mm～0.084mm であった。最大ひび割れ幅 0.05mm～0.1mm 程度までは透水速度は極めて遅く、それ以降は直線的に増加する傾向を示した。最大ひび割れ幅と透水速度の間には、相関性が高いことが図-8 から分かる。

### (2) 止水性材料を用いた後の透水特性

図-9 に止水性材料を用いた後の最大ひび割れ幅と透水速度比の関係を示す。透水速度比は下式に表すように、止水材料を用いる前後の透水速度の比であり、止水性材料の性能評価指標とした。

$$\text{透水速度比} = \frac{Q_a}{Q_b}$$

ここに、 $Q_a$ ：止水材料を用いた後の透水速度( $\text{cm}^3/\text{min}$ )  
 $Q_b$ ：止水材料を用いる前の透水速度( $\text{cm}^3/\text{min}$ )

表-4 透水時間

NM供試体	NM1	NM2	NM3	NM4	NM5	NM6
測定回数(回)	6					
最大値(s)	6.6	15.8	6.6	13.1	35.0	68
最小値(s)	6.3	15.6	6.4	12.9	34.7	67
平均値(s)	6.4	15.7	6.5	13.0	34.8	67.7
標準偏差(s)	0.11	0.10	0.07	0.07	0.09	0.50
変動係数(%)	1.7	0.6	1.1	0.5	0.2	0.7
	0.8					
HP供試体	HP1	HP2	HP3	HP4	HP5	HP6
測定回数(回)	6					
最大値(s)	554	643	364	506	360	652
最小値(s)	515	630	357	498	354	635
平均値(s)	534	635	360	503	358	646
標準偏差(s)	12.8	4.4	2.6	2.6	2.1	6.3
変動係数(%)	2.4	0.7	0.7	0.5	0.6	1.0
	1.0					

NM 供試体に比べて、HP 供試体の方が透水速度比は小さくなり、シラン系を除いた透水速度比は平均で約 0.03

となった。ひび割れ幅が大きいNM供試体の場合では、珪酸塩系表面含浸材(反応補助材併用)を円筒管供試体の内面から含浸させた場合とアルギン酸ナトリウム 1.0%溶液(反応補助材併用)を用いた場合の止水性能が高く、珪酸塩 B の場合の透水比は 0.009, アルギン酸の場合は 0.004 となった。珪酸塩系表面含浸材を用いて含浸面(塗布面)の違いによる影響を調べたものでは、円筒管の外側から塗布した場合の透水比は約 0.3, 内側からでは約 0.1 となった。外側から含浸させた場合では、ひび割れ内部に生成した止水性物質が透水試験時の水圧により押し出されやすい状態にあったと推察された。

粘土溶液による実験には、HP 供試体中で 2 番目に大きなひび割れ(0.073mm)となった供試体を用いた。粘土溶液を用いた場合の透水速度比は 0.027 となり、珪酸塩系表面含浸材と同等の性能を示した。粘土溶液の実験に用いた透水試験後の円筒供試体の外面と、供試体内面のマイクロ画像(撮影倍率 100 倍)を図-10 に示す。粘土は供試体の外面までには至っていないものの、供試体内面のひび割れ部表面を粘土が被覆している状況が分かる。使用した粘土の粒径は 75 $\mu$ m ふるい残留率が 6.3%あり、一方、実験に用いた供試体のひび割れ幅は、最大で 0.073mm, 平均で 0.016mm であることから、ひび割れの深部まで粘土が到達せず、表層部にとどまったものと考えられる。ひび割れ幅に応じた適度な粒径・粒度分布を有する無機材料を選定することで、ひび割れの深部まで粘土が到達し、より高い止水効果を発揮する可能性も高い。

本提案法は、コンクリートの表面含浸材料の評価試験方法(JACE-K561-2003:  $\phi$  75mm の漏斗を使用)と比較して、検出面積が約 8 倍(円筒供試体の内部面積と  $\phi$  75mm の漏斗面積の比)となることから、特に、HPFRCC のような微細ひび割れが多い材料の試験方法として好適である。

各種止水材料には、その止水効果が最も発揮されるひび割れ幅の範囲があると考えられる。この点については、今後検討していく予定である。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) ひび割れを導入した円筒供試体を用いた透水試験方法によって、ひび割れ部の止水性の改善を目的とした補修材料の性能評価を、比較的簡便に精度良く行なえることを確認した。
- (2) 珪酸塩系塗布含浸材を円筒供試体の外部から含浸させた場合は、内部から含浸させた場合の止水性能の約 1/3 となり、含浸方向により止水性能が異なることを確認した。

- (3) ひび割れの大きい NM 供試体よりもひび割れの小さい HP 供試体の方が、止水性材料による改善効果は高くなることが分かった。
- (4) 粘土溶液を止水性材料として用いた場合の透水比は 0.027 となり、珪酸塩系表面含浸材とほぼ同等の止水性能を示した。

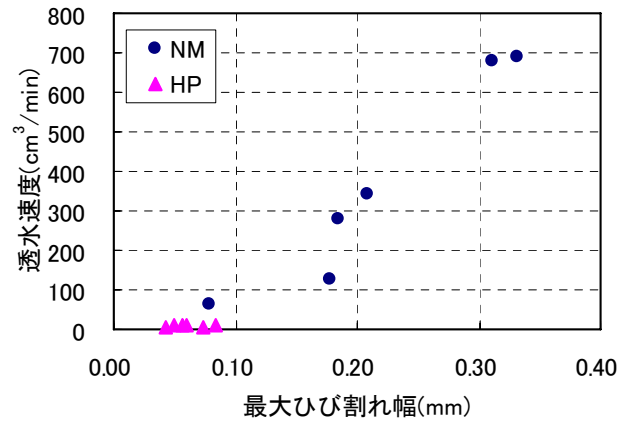
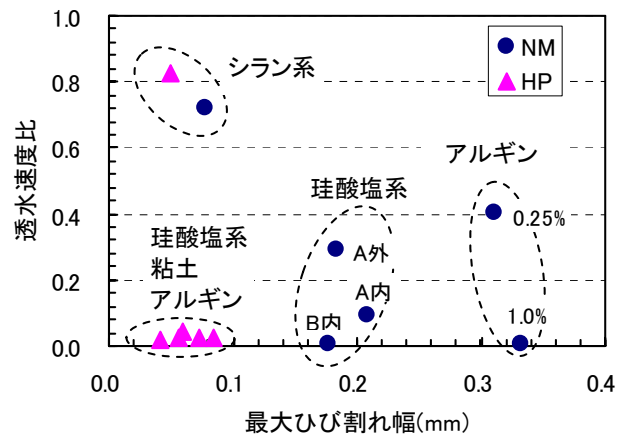
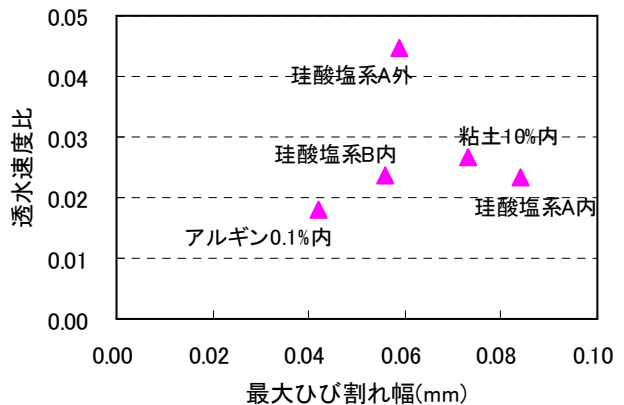


図-8 最大ひび割れ幅と透水速度



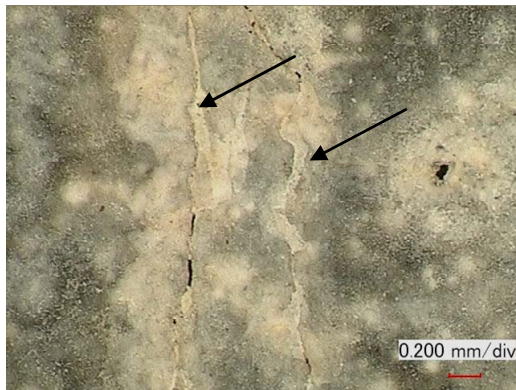
(1) NM, HP 供試体



(2) HP 供試体(シラン系除く)拡大

図-9 最大ひび割れ幅と透水速度比





外面



内面

図-10 粘土の浸透状況

#### 参考文献

- 1) 土木学会：表面保護工法設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー119，2005.4
- 2) 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
- 3) 加藤久也・浅野幸男・山本基由・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水密性能と撥水材の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.341-346，2006
- 4) 安田和弘・渡邊賢三・横関康祐・坂田昇：シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材によるコンクリートの耐久性向上に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.705-710，2002
- 5) 高田浩夫・飯塚貴洋・浅野幸男・六郷恵哲：HPFRCCのひび割れ性状を確認するための円筒供試体を用いた引張試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.297-302，2008
- 6) 高橋祐二・浅野幸男・小林孝一・六郷恵哲：海藻ゲル物質を用いたHPFRCC微細ひび割れ部の止水性の改善，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.261-266，2008
- 7) 新保弘・村山八州雄・須田久美子・一宮利通：6自由度加力装置を用いたRC柱部材実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.1113-1118，1993