

論文 加圧処理を施した繊維補強 RPC の微視的構造と力学的特性

渡辺暁央*¹・五十嵐心一*²・川村満紀*³

要旨:フレッシュ時に 50N/mm² の加圧処理を施した繊維補強 RPC (Reactive Powder Concrete) を作製した。圧縮強度は 200°C の養生を行うことにより 400N/mm² を超え、繊維を多量に混入してもほぼ同じ圧縮強度が得られた。このような超高強度の発現は、加圧処理による気泡の除去、セメント粒子の配置の緻密化および毛細管空隙量の減少によるものであることが明らかとなった。繊維を混入することにより初ひびわれ強度および曲げタフネスの著しい増大が確認され、加圧処理による繊維-RPC マトリックス界面の組織の変化の寄与が示唆された。

キーワード: RRC, 加圧処理, 荷重-たわみ曲線, 反射電子像, 画像解析

1. 序論

RPC (Reactive Powder Concrete) は、粗骨材を使用せずに粉体材料を用い、その材料を最密充填になるように配合する超低水セメント比のセメント硬化体である。フレッシュ時に加圧処理を施し、90°C 以上の熱処理を行うことにより、200N/mm² 以上の超高強度が比較的容易に得られる¹⁾。一方、RPC は非常に脆性的な破壊形式を示すため、繊維の混入が不可欠となる。この場合、繊維は RPC を構成する材料の中で最も大きく、繊維長は骨材粒子よりも 10 倍以上の寸法となる。しかし、粗骨材を使用していないために繊維混入率を増大させることも可能である。このように超高強度マトリックスに比較的多量の繊維を混入する場合の補強機構および変形挙動は、通常の低強度マトリックスの繊維補強コンクリートとは異なることが考えられる。

本研究においては、加圧処理を施した RPC を製作し、研磨面の画像解析から、加圧高温処理が内部組織の特徴と強度発現に及ぼす影響を明らかにする。さらに、そのような超高強度 RPC をマトリックスとする繊維補強 RPC を作製し、繊維混入率および繊維長が力学的特性に与える

影響を、内部組織の特徴と関連づけながら考察する。

2. 実験概要

2.1 加圧処理した RPC の作製

(1) 使用材料

セメントはビーライト系セメント (密度 3.2g/cm³, プレーン比表面積 0.410m²/g) を使用した。微粉末材料として、シリカフューム (密度 2.2g/cm³, 比表面積 20.0m²/g, SiO₂ 含有量 90.8%), 微粉石英 (密度 2.6g/cm³, 比表面積 1.42 m²/g) を使用し、骨材として 6 号珪砂, 7 号珪砂および 8 号珪砂 (密度 2.6g/cm³) を使用した。繊維は直径 0.15mm, 長さ 3, 6 および 13mm のストレート鋼繊維 (密度 7.8g/cm³) を用いた。高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸系のものを消泡剤と組み合わせて使用した。

(2) 配合

配合は、セメントとシリカフュームを合わせて結合材として水結合材比を 18%, シリカフューム混入量をセメント質量に対して 25%とした。珪砂の混入量は、セメント質量に対して 50%, 6 ~ 8 号珪砂の代表径を基準に、球形粒子の最密充

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科システム創成科学専攻 修(工) (正会員)

*2 金沢大学 大学院自然科学研究科 助教授 博(工) (正会員)

*3 金沢大学 工学部土木建設工学科 教授 工博 (正会員)

表-1 RPCの配合 (kg/m³)

繊維混入量(%)	水	減水剤	セメント	シカフーム	微粉石英	6号珪砂	7号珪砂	8号珪砂	繊維
0	208	45	1126	281	117	486	61	15	0
2.5	203	44	1097	274	114	474	60	15	195
5.0	198	43	1069	267	111	462	58	14	390
10.0	187	41	1013	253	106	438	55	14	780

填²⁾に従うように混入割合を算定した。微粉石英は、セメント粒子に対して最密充填になるように混入量を決定した。高性能 AE 減水剤の使用量はセメント質量に対して4%である。繊維の混入率は、繊維長 13mm の場合が 2.5%、繊維長 6mm の場合は 2.5 および 5%、繊維長 3mm の場合が 2.5, 5, 10%に変化させた。配合を表-1 に示す。

(3) 供試体の作製

加圧用供試体の作製は、練混ぜ直後の RPC を $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の円柱および $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱の加圧用型枠に流し込み、テーブルバイブレータにより締固めた。その後、図-1 に示す加圧装置を用いて、加圧による繊維の配向の変化の影響を避けるため、供試体の長軸方向を加圧面として 50N/mm^2 の加圧を行った。スプリングによって加圧力を保持したまま 20°C の恒温槽で 2 日間静置した後、圧力を解放して脱型した。加圧を行わない供試体は、JIS R 5201 および JSCE-F506 に準じて $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の円柱を、JCI-SF2 に準じて $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体を作製した。脱型後の供試体は、24 時間の 20°C 水中養生を行い、その後 90°C の水中養生および 200°C の高温常圧養生の 2 条件で養生を行った。

2.2 実験方法

(1) 強度試験

材齢 7 日において、円柱供試体を用いて圧縮強度試験を、角柱供試体を用いて JCI-SF4 に準じて中央集中載荷方式により曲げ強度試験を実施した。また、曲げ強度試験時に載荷点たわみを計測して、荷重-たわみ曲線を記録した。また、一部の供試体については、曲げ強度試験後の切片を用いて、圧縮強度試験を行った。

(2) 気泡の観察

供試体を切断し、赤色のエポキシ樹脂を含浸させた。樹脂硬化後、表面を研磨紙で研磨し、

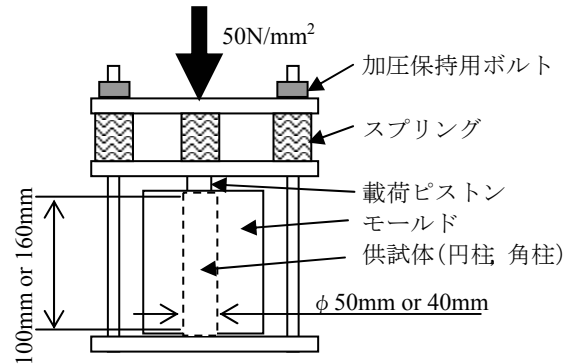


図-1 加圧処理装置

デジタルカメラで撮影した（撮影倍率： $\times 1$ 、1画素は約 0.03mm ）。それをパーソナルコンピュータに取り込んだ。取得した画像について赤色を抽出して、気泡の面積率を求めた。

(3) 反射電子像観察の試料作製

材齢 7 日にて供試体の中心部分から厚さ 10mm 、直径 25mm 程度の円盤状試料を切り出した。それをエタノールに 24 時間以上浸漬してセメントの水和反応を停止させた後、エポキシ樹脂を含浸させた。樹脂硬化後、表面を耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを用いて注意深く研磨し、表面に金-パラジウム蒸着を行って、反射電子像観察試料とした。

(4) 反射電子像観察および画像解析方法

4 分割型反射電子検出器を備えた走査電子顕微鏡を使用して、骨材および繊維をなるべく避けるようにしてセメントマトリックスの反射電子像をパーソナルコンピュータに取り込んだ（加速電圧： 25kV 、観察倍率： $\times 500$ 、1画素は約 $0.2\mu\text{m}$ ）。取得した画像に対して毛細管空隙の抽出を行い、面積率を求めて、それを体積率に変換した。さらに各々の毛細管空隙をラベリングし、それらの円相当径を求め、その円相当径の小さいものから並べ換えることによって、累積細孔径分布を得た。また、未水和セメントに

関しても同様に体積率を求めた。

3. 結果および考察

3.1 フレッシュ性状

表-2 はフロー試験の結果を示したものである。繊維を混入していない場合、フロー値は300mm 以上を示すが、RPC は多量の粉体材料で構成されており、さらに水結合材比が 18%と低いため、材料分離は生じていない。また、繊維を混入することによりフロー値は低下するが、一般的な繊維補強コンクリートよりも多量の繊維を混入しているにもかかわらず十分なワーカビリティが確保されている (図-2)。

3.2 加圧処理による RPC マトリックスの高強度化と内部組織の変化

図-3 は加圧処理の有無による圧縮強度の相違を示したものである。加圧処理を行うことにより圧縮強度は増大する。特に 200℃の養生を行った RPC の圧縮強度の増大が著しく、加圧処理により約 400N/mm²の強度になり、加圧を行わないものより 60%もの増加が確認される。一方、90℃の養生では、200℃の場合と比較すると加圧処理による強度増加がわずかであり、20~30 N/mm²程度の増大を示すにすぎない。

表-3 は加圧処理の有無による未水和セメントの体積率および粒子中心間距離の相違を示したものである。加圧処理により未水和セメント体積率が増大しており、その増大率は加圧処理による全体積の減少 (4%) から計算される値より大きい。また、200℃の養生よりも90℃の養生において、増大割合が大きくなっている。このことは、加圧処理を行った場合、90℃養生では水和が十分に進行していないことを示唆するものであり、生成される水和物の量が少ないことを意味する。しかし、圧縮強度は加圧処理により若干の増大が認められていることから、加圧処理により初期のセメントの充填が密になり、セメント粒子の表面部分が水和するだけで、空間を水和物である程度充填することができたことが考えられる。

表-2 フロー値 (mm)

繊維量(%)	$l_f = 3\text{mm}$	$l_f = 6\text{mm}$	$l_f = 13\text{mm}$
0	300 以上		
2.5	281	257	214
5	254	226	—
10	210	—	—



図-2 フレッシュ時の流動性 ($l_f = 3\text{mm}$, $V_f = 10\%$)

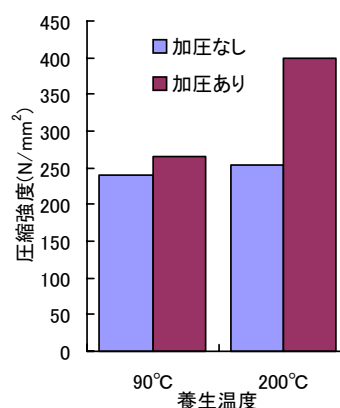


図-3 RPC マトリックスの圧縮強度試験結果

表-3 未水和セメント粒子の解析結果

		加圧なし	加圧処理
90℃	体積率 (%)	22.4	28.2
	中心間距離 (μm)	11.4	10.6
200℃	体積率 (%)	20.2	24.7
	中心間距離 (μm)	12.3	11.6

図-4 は加圧処理の有無による RPC マトリックス切断面写真の相違を示したものである。加圧処理を施さなかった場合、多くの気泡が確認される。これを画像解析すると気泡量は 3.5% になり、流動性が良好でかつ十分に締固め行っても、多くの気泡が残存することがわかる。これは高性能 AE 減水剤の使用量が非常に多いことが一因と考えられる。一方、加圧処理を行ったものには、このような気泡が観察されず、この

ことも圧縮強度の増大に寄与していると推定される。

図-5 は反射電子像の画像解析により求めた粗大毛細管空隙に対する細孔径分布を示したものである。加圧処理を行うことにより、粗大な毛細管空隙量が 1/2 程度に減少し、最大細孔径（曲線の立ち上がり部分の細孔径：図中の縦破線位置）も小さくなっている。粗大な毛細管空隙量の減少は、加圧処理による余剰水の除去に起因し、最大細孔径が小さくなる傾向を示すのは初期のセメント粒子の配置が密に充填されたためと考えられる。しかし、粗大な毛細管空隙量と圧縮強度の対応を考えた場合、加圧による粗大な毛細管空隙量の減少割合は同程度であるのにも関わらず、養生温度 90℃と 200℃では強度の増大の割合が極端に異なる。このことは、画像解析法の対象細孔径以下の毛細管空隙の影響³⁾の影響も考えられるが、両者における反応生成物の相違を反映していると考えられる。すなわち、90℃と 200℃の養生では強度発現機構が異なり、90℃の養生では、強度発現がセメントの水和反応およびシリカフェームのポズラン反応のみに依存しているのに対して、200℃の養生における強度発現は、水和反応およびポズラン反応以外に結晶性水和物（トバモライトおよびゾノトライト）の生成にも依存している¹⁾。このことを考慮すると、加圧処理により余剰水が絞り出されたため、前述のように 90℃の養生では水和反応やポズラン反応に必要な水が不足し、強度増大が小さくなったことが考えられる。これ

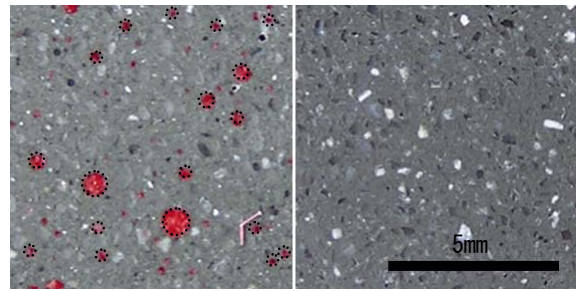


図-4 RPC 切断面（点線で囲んだ赤色が気泡）

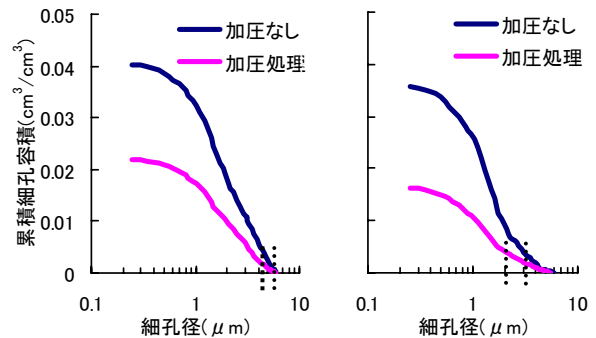


図-5 RPC マトリックスの細孔径分布

に対して 200℃の養生における著しい強度増大についてはさらに検討を要するが、加熱だけでは強度の増大が小さいことを考慮すると、加圧処理により大きな欠陥が減少し、結晶性生成物の生成の効果が現れるようになったことが一因と考えられる。

3.3 加圧処理を施した繊維補強 RPC の強度特性

図-6 は繊維を混入した RPC の圧縮強度を示したものである。長さ 3mm の繊維を 10% 混入しても、マトリックス強度とほぼ同程度の強度が発現しており、いずれの配合においても繊維の混入による強度の低下はほとんど認められない。

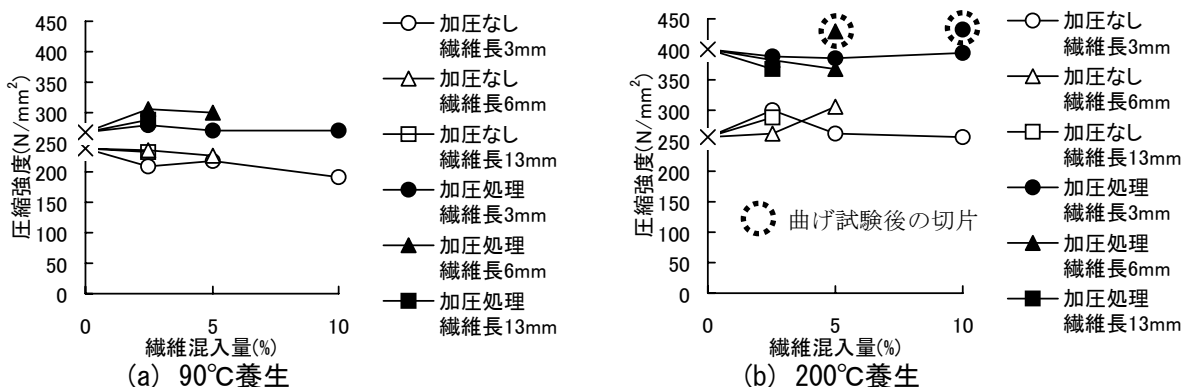


図-6 繊維混入 RPC の圧縮強度

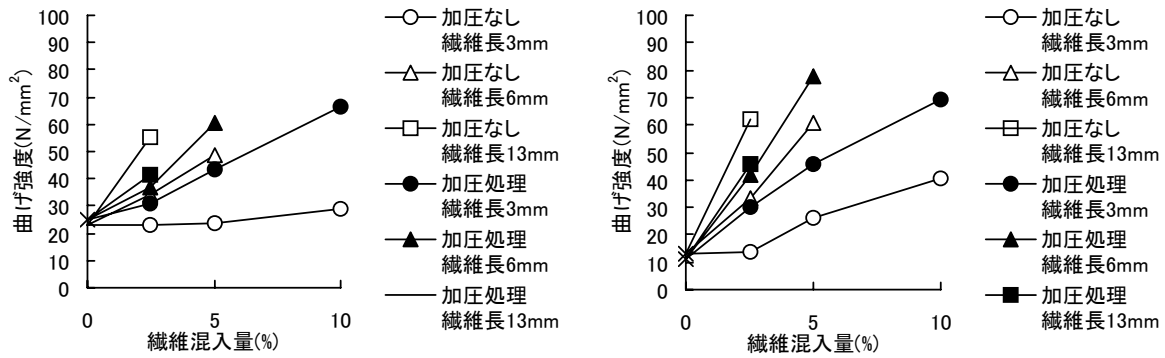


図-7 RPCの曲げ強度

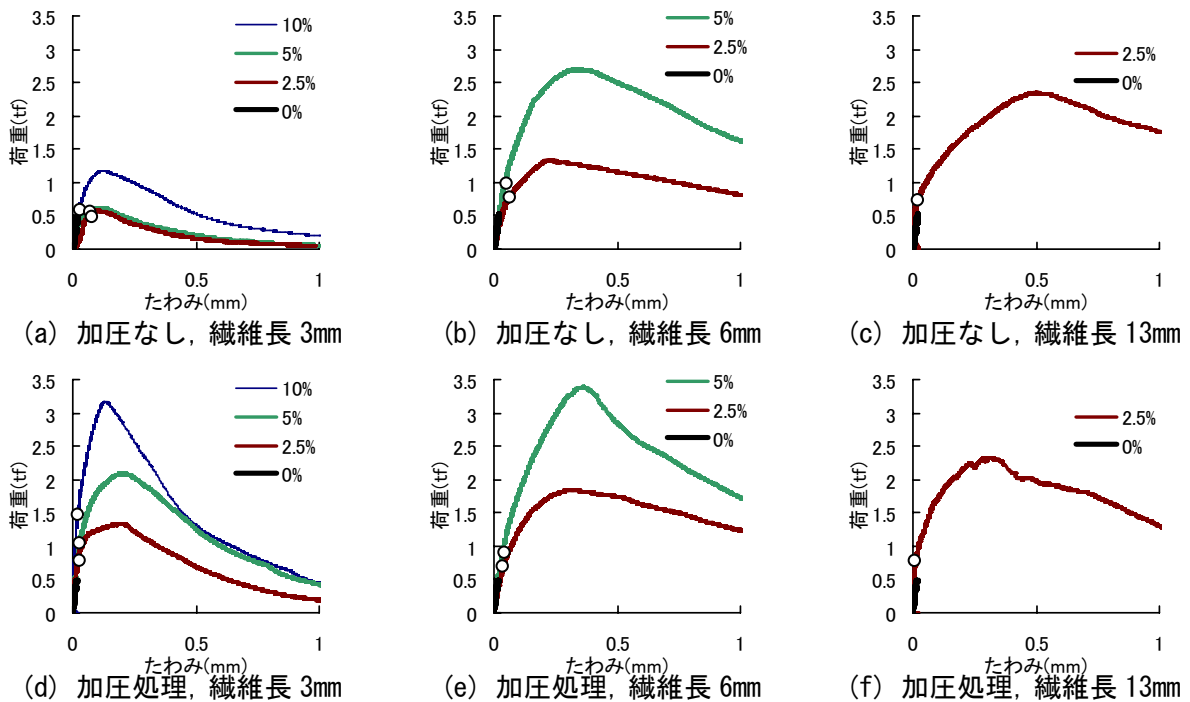


図-8 200℃養生における荷重-たわみ曲線の例 (○は初ひびわれ発生位置)

また、曲げ強度試験後の切片については、 $400N/mm^2$ を上回る超高強度も達成された。これらのことは、粗骨材を用いていないために繊維を大量に混入してもファイバーボールを生じることなく流動性が確保され、十分な締固めが行われていたことを示している。

図-7は繊維補強RPCの曲げ強度を示したものである。200℃養生のマトリックス強度は、表面乾燥の影響により低い値を示すが、繊維混入率の増大とともに曲げ強度は混入率に比例して増大し、同じ繊維混入量であれば繊維長の長いもののほど曲げ強度は大きくなる。加圧処理による効果については、長さ13mmの繊維を除いて加圧処理を行うことにより曲げ強度は増大してお

り、特に長さ3mmの繊維を混入した場合、加圧処理による曲げ強度の増大が顕著である。

図-8に200℃養生を行ったRPCの荷重-たわみ曲線の例を示す。繊維混入率の増大にともない初ひびわれ後の荷重の増大も大きくなり、より大きなタフネスを示すようになる。加圧処理を施さない場合は、繊維を混入しても初ひびわれ強度に大きな変化は認められないが、加圧処理を行うことにより、繊維混入率の増大にともなう初ひびわれ荷重の増大が明らかである。通常の繊維補強コンクリートでは、初ひびわれ強度はマトリックス強度と大きく異なることはなく、繊維の補強効果としてはひびわれ後のタフネスの増大に期待するところが大きい。これに

対して、繊維補強 RPC ではマトリックスが超高強度であるため、必要な繊維混入率は大きくなるが、十分な付着性状により繊維のマトリックス強度への複合効果が期待できることを示しており⁴⁾、これにより微細ひびわれの局所化の過程も変化していると考えられる⁵⁾。一方、長さ 13mm の繊維を使用した場合、加圧処理を行うことにより、曲げ強度が低下するだけでなく、最大荷重到達時のたわみが小さくなり、たわみ 1mm における耐荷力も、加圧処理を行っていないものに比較して低下している。図-9 は繊維-マトリックス界面の反射電子像の例を示したものである。加圧処理により、繊維表面近傍に未水和セメントが多く存在するようになり、界面領域の付着特性は改善されていると推察される⁶⁾。したがって、長さ 13mm の繊維を使用した場合における、加圧処理にともなう曲げ強度および靱性の若干の低下に関しては、さらに検討を要するが、繊維長が 13mm と長く、RPC を構成する材料の中で極端に大きいため、長軸方向に打込まれた供試体の振動締固めにより、繊維の配向が水平方向に若干変化した可能性が考えられる。また、繊維長が長く混入率も比較的大きいため、加圧処理により繊維が屈曲することにより、繊維の配向が変化したことが考えられる。

4. 結論

- (1) フレッシュ特性は、繊維の長さおよび混入率に大きく影響を受けるが、通常の繊維補強コンクリートよりも多量の繊維を混入しても良好なワーカビリティが確保される。
- (2) 加圧処理により 400N/mm^2 を超える超高強度を得ることができた。圧縮強度の増大は、 200°C の養生を行うことにより顕著に現れるが、 90°C 養生ではあまり増大しない。これは加圧処理により水が除去されることにより、水和反応およびポズラン反応が十分に進行しないためであると考えられる。
- (3) 加圧処理は、マトリックス中の気泡を除去し、粗大な毛細管空隙量を大幅に減少させる。

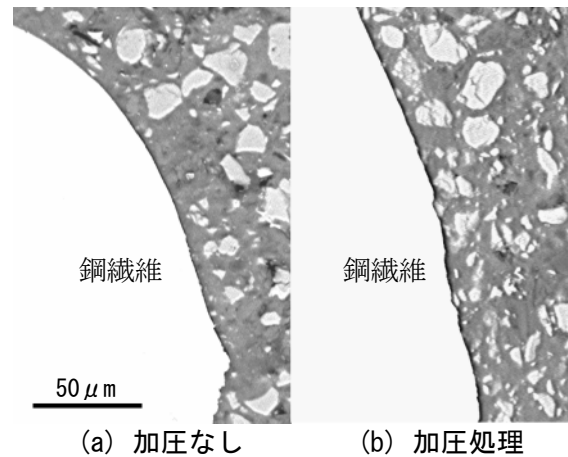


図-9 繊維界面の反射電子像の例

- (4) 繊維を混入した RPC を加圧処理した場合、初ひびわれ強度が増大しており、特に長さ 3mm の繊維の場合、それが顕著に現れる。
- (5) 長さ 13mm の繊維を混入した RPC に加圧処理を行うと曲げ強度が低下しており、繊維配向の変化の影響が示唆される。

参考文献

- 1) Richard, P. and Cheyrezy, M.: Composition of Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, pp.1501-1511, 1995
- 2) 粉体工学の基礎編集委員会：粉体工学の基礎，日刊工業新聞社，1992
- 3) 渡辺暁央，五十嵐心一，川村満紀：養生条件の相違によるセメントペーストの細孔構造の変化と圧縮強度特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.539-544, 2003
- 4) Aveston, A. et al.: Single and multiple fracture. In the properties of fiber composites, Conf. Proc. National Physical Laboratories, IPC, Science and Technology Press, UK, pp.15-26, 1971
- 5) Shah, S.P. and Ouyang, C.: Mechanical behavior of fiber-reinforced cement-based composites, J. Am. Ceram. Soc., Vol.74, No.11, pp.2727-2738, pp.2947-2953, 1991
- 6) Igarashi, S. et al.: The effect of processing on the bond and interfaces in steel fiber reinforced cement composites, Cement and Concrete Composites, Vol.18, No.5, pp.313-322, 1996