

論文 セメント系繊維複合押出成形材料の破壊特性に及ぼすパーライト添加の影響

高島 博之*1・西松 英明*2・宮外 清貴*3・橋田 俊之*4

要旨：パーライトを混合して軽量化したセメント系ポリビニルアルコール(PVA)繊維複合材料を押出成形により作製し、その破壊特性を直接引張試験により評価した。パーライトを10%添加したPVA繊維複合材料(密度 1.25g/cm^3)においては、顕著な擬似ひずみ硬化挙動を誘起でき、ピーク応力時の破断ひずみは2.4%に達することを示し、パーライト無添加の場合と比べて顕著に破断ひずみを増大させることに成功した。これは、上述のパーライト添加条件の下では、マトリックスの破壊靱性の低下に伴うマルチプルクラック形成の促進と同時に、界面せん断強度の低減を抑制できているためであると推察される。

キーワード：押出成形、擬似ひずみ硬化挙動、ポリビニルアルコール繊維、パーライト

1. はじめに

押出成形は、セメント系繊維複合材料の工業的な製造方法の一つである。押出成形によるセメント系繊維複合材料の作製における利点は、緻密な成形体が得られることや補強繊維の押出方向への配向制御が可能であることに加えて、流し込みによる作製に比べて多くの繊維を効果的に混入できることから繊維補強効果を有効に活かすことが期待できる¹⁾。

押出成形材料を高靱性化する手法の一つとして、繊維補強によるマルチプルクラックの発生があり、これまでも、ポリビニルアルコール(PVA)繊維補強によって、引張応力の作用下で擬似ひずみ硬化挙動を誘起できることを示している²⁾。

セメント系押出成形材料の用途は、壁材や床材以外にも、埋設型枠、耐震部材などがあり、施工性の点からも軽量化が求められている。

そこで、人工軽量骨材である真珠岩パーライトを混合して軽量化したセメント系PVA繊維

複合材料を押出成形により作製した。その破壊特性を直接引張試験により評価することにより、PVA繊維複合材料の破壊特性に及ぼすパーライト添加の影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験片の作製

構成材料として、普通ポルトランドセメント、珪石粉、真珠岩パーライト(表乾嵩密度 $0.2\sim 0.3\text{g/cm}^3$ ・最大粒子径 0.6mm)、広葉樹系パルプ、鉱物繊維(含水マグネシウム珪酸塩)、メチルセルロース、およびPVA繊維を用いた。それぞれの配合比は、普通ポルトランドセメント:珪石粉:広葉樹系パルプ:鉱物繊維:メチルセルロース=1.0:0.6:0.01:0.05:0.02であり、真珠岩パーライトおよび水の普通ポルトランドセメントの質量に対する配合比率をTable 1に示す。Table 2に、PVA繊維の寸法と諸物性を示す。PVA繊維の繊維混入率は、3vol%とした。

*1 倉敷紡績(株) 技術研究所 研究員 工博 (正会員)

*2 倉敷紡績(株) 技術研究所 研究員 工修

*3 倉敷紡績(株) 技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)

*4 東北大学大学院工学研究科教授 工博

Table 1 Matrix mix proportion (percentage by weight of ordinary portland cement)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Perlite	0	5	10	20	0	5	10	20	10	20
Water	60	60	60	60	80	80	80	80	90	90

Table 2 PVA fiber dimension and properties

Diameter (mm)	Length (mm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Density (g/cm ³)
0.0379	6	158	1650	43.7	1.3

以下に、PVA 繊維複合材料の作製方法を記す。水以外の所定量の原料をアイリッヒミキサに入れて3分間混合した後、水を投入して2分間混合した。この混合した原料を、可塑性を持たせるために、ニーダーに移し3分間混練した。これをシリンダー式真空押出成形機により吐出口の形状に成形した。押出成形に用いた金型の吐出口の寸法は幅 80mm、高さ 15mm の長方形である。PVA 繊維複合材料をトレーごとポリフィルムで包み、恒温恒湿器にて蒸気養生を行った。蒸気養生においては、湿度 98%の条件下において、70°C で5時間保持した。

2.2 評価方法

PVA 繊維複合材料の引張特性に及ぼすパーライト添加の影響を調べるため、ねじ駆動サーボ式万能材料試験機により引張試験を行った。前述の成形によって得られた幅 80mm、厚さ 15mm の押出成形体を切断して、引張試験では幅 40mm、長さ 230mm、厚さ 15mm の試験片を、破壊靱性試験では幅 40mm、長さ 200mm、厚さ 15mm の試験片を作製した。引張試験はクロスヘッド速度 0.5mm/min で行い、変位は標点間距離 50mm の差動トランス式標点間伸び計を使用して測定した。チャック部は、試験片に幅 40mm、長さ 60mm、厚さ 2mm のアルミ板をエポキシ樹脂で接着し補強した。マトリックスの破壊靱性値を求めるため、

ANSI/ASTM E 399 (Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials) に従い、破壊靱性試験を行った。あらかじめノッチを入れた試験体に対して1点载荷の曲げ試験を行い、き裂の開口変位と荷重を測定した。き裂開口変位は、ノッチの肩部に接着したナイフエッジにクリップゲージを装着することにより測定した。試験片のサイズは、幅 15mm、長さ 200mm、高さ 40mm であり、支持点間距離は試験体の高さの4倍、クロスヘッド速度は 0.5mm/min で行った。

Fig.1 に、引張試験、Fig.2 に、破壊靱性試験の概略を示す。全ての試験結果は、3回の試

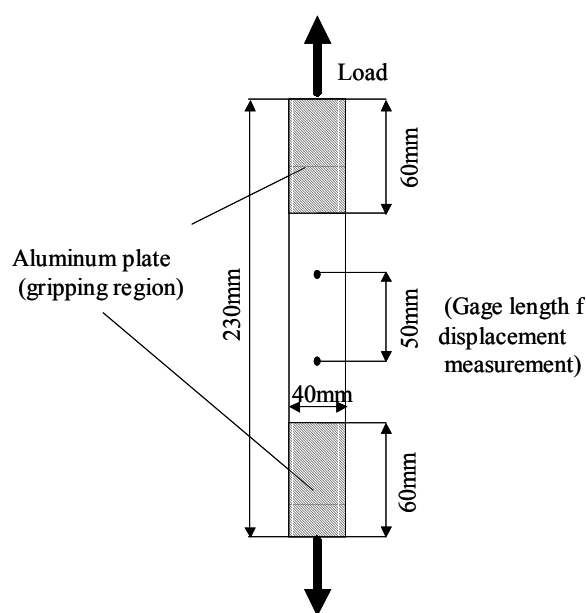


Fig.1. Specimen configuration of tension test.

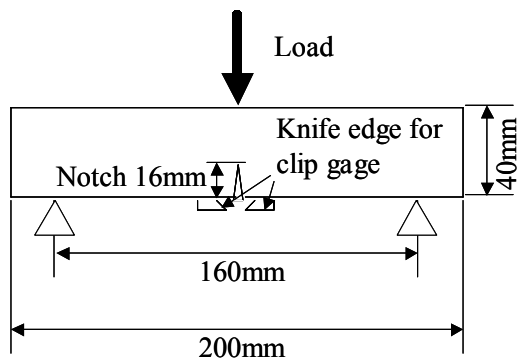


Fig.2. Specimen configuration of fracture toughness test.

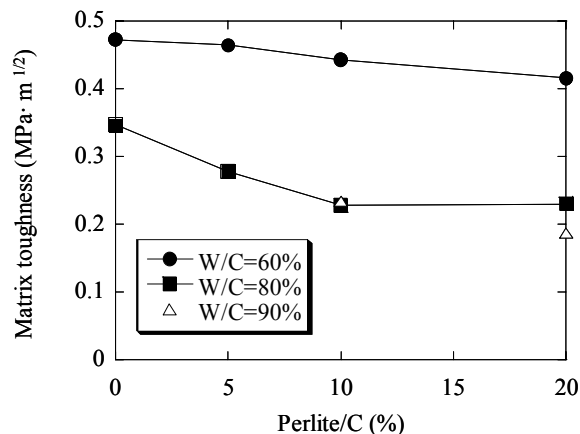


Fig.3 Matrix toughness.

験の平均値を記載した。

試験片中のパーライトおよびPVA繊維の存在状態を確認するため、走査電子顕微鏡を用いて、加速電圧25kVで試験片の断面の反射電子像を観察した。試験片は金型の吐出口に対して垂直な方向に押し出される。この方向を押し出方向とし、電子顕微鏡による観察は、試験片を押し出方向に対して垂直に切断した断面に対して行った。

3. 実験結果および考察

3.1 マトリックスの破壊靱性

Fig.3 に、マトリックスの破壊靱性に及ぼすパーライトの添加量および水セメント比の影響を示す。パーライトの添加量に従い、マトリックスの破壊靱性値は低下していることがわかる。また、水セメント比を60%から80%に増やすことにより、マトリックスの破壊靱性値は、約50%低下するが、水セメント比を80%から90%に増やしてもほとんど変化しない。

マトリックスへのパーライトの添加は、本来軽量化を目的としたものであるが、マトリックスの破断面を顕微鏡で観察すると、パーライト自体が破壊していることが観察された。したがって、Fig. 3 の結果は、パーライトを添加することによりマトリックス中の先在欠陥の密度が大きくなり破壊の起点が増大したためと解釈される。

3.2 PVA 繊維複合材料の破壊特性

Fig.4 に、水セメント比80%の条件で作製したPVA繊維複合材料の一軸引張試験で得られた応力-ひずみ曲線を示す。パーライト添加量は、セメントに対して、0%、5%および10%である。パーライト無添加の場合、マルチプルクラックの発生を伴う擬似ひずみ硬化挙動を示していたが、パーライトを5%添加した場合には、ピーク応力以降に繊維架橋による緩やかな応力低下挙動が観察されるものの、単一のき裂のみが発生し最終破壊した。さらに、パーライトを10%添加したPVA繊維複合材料では、擬似ひずみ硬化挙動を示して破壊し、ピーク時の引張ひずみは、2.4%に達した。

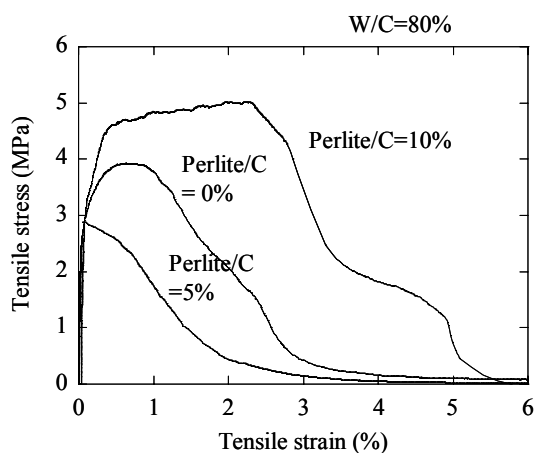


Fig.4 Tensile stress vs. strain curves of PVA fiber composites.

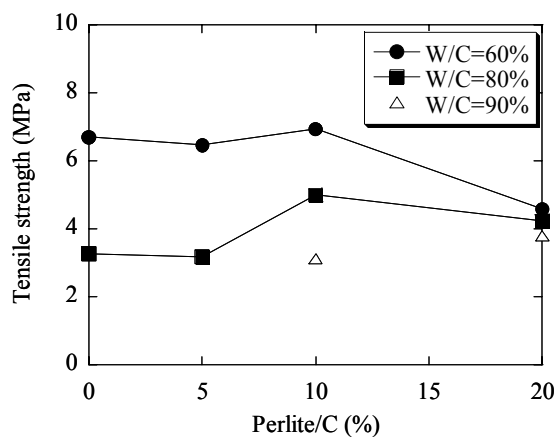


Fig.5 Tensile strength of PVA fiber composites.

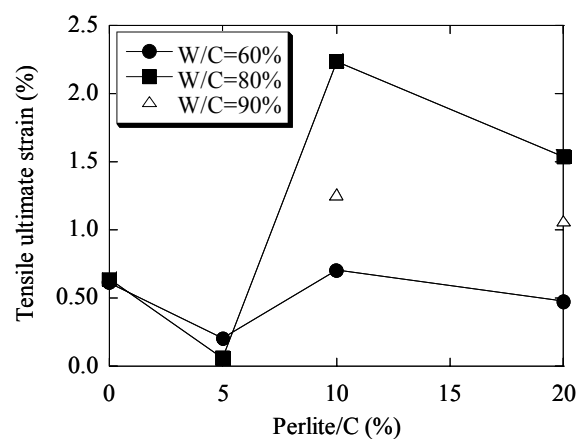


Fig.6 Tensile ultimate strain of PVA fiber composites.

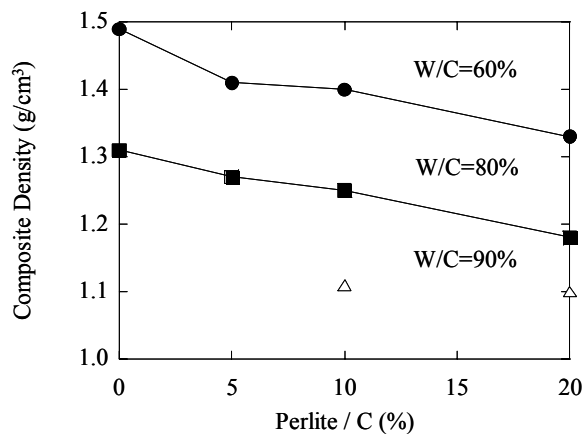


Fig.7 Composite density.

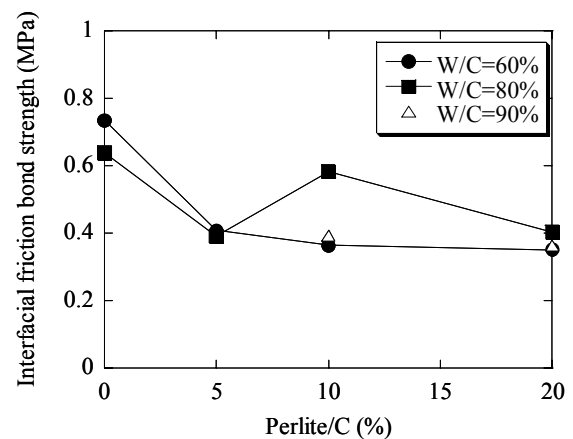


Fig.8 Interfacial friction bond strength.

本研究では、パーライトを 5%添加した PVA 繊維複合材料において、水セメント比 60%および 80%いずれの場合も単一のき裂による破壊を呈したが、これら以外の PVA 繊維複合材料では、マルチプルクラックを伴う擬似ひずみ硬化挙動を示した。また、いずれの PVA 繊維複合材料においても繊維の完全な引き抜けが観察された。

Fig.5に、PVA 繊維複合材料の引張強度、**Fig.6**に、PVA 繊維複合材料のピーク応力時の破断ひずみを示す。パーライト無添加の PVA 繊維複合材料とパーライトを 5%添加した PVA 繊維複合材料を比較した場合、パーライトを添加することにより、特にピーク時の引張ひずみの低下が観察される。さらに、パーライト 10%添加した

PVA 繊維複合材料においては、マルチプルクラックの発生により引張ひずみが顕著に増加している。**Fig.7**に、PVA 繊維複合材料の密度を示す。本研究で評価した PVA 繊維複合材料の中で最も大きな引張ひずみ 2.4%を示した材料の密度は 1.25g/cm^3 である。

Fig.8に、PVA 繊維複合材料における PVA 繊維の界面せん断強度を示す。界面せん断強度は、マトリックスからの 1 本の繊維の引き抜き試験により求めることが一般的であるが³⁾、本研究では、筆者らが参考文献¹⁾で示した引張試験の結果からマイクロメカニクスに基づく間接的な方法により求めた。界面せん断強度は、パーライト無添加の PVA 繊維複合材料とパーライト

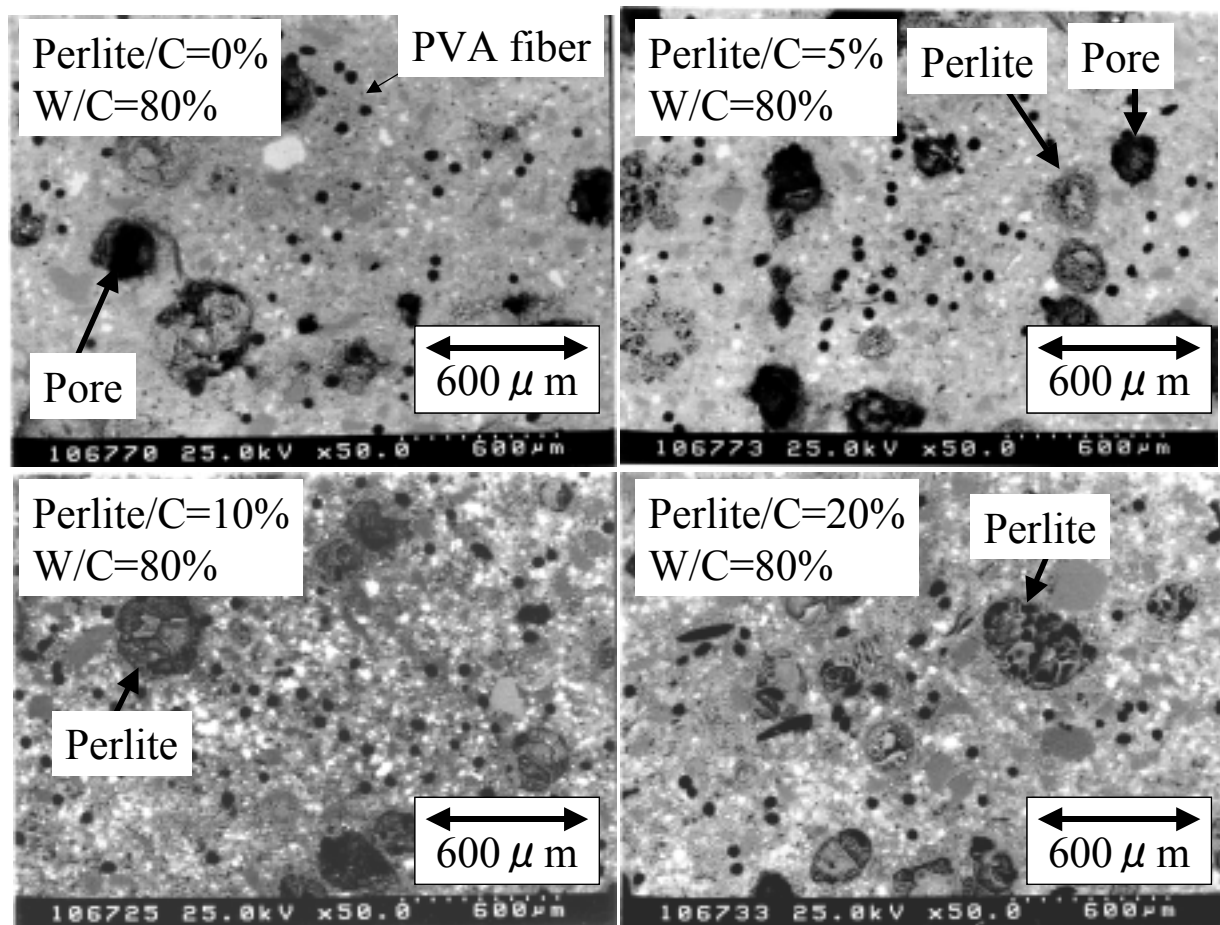


Fig.9 Microstructure of PVA fiber composites

5%を添加した PVA 繊維複合材料を比較した場合、水セメント比 60%および 80%いずれの条件でも大きく減少しており、これは PVA 繊維近傍に欠陥が導入されたことが考えられる。しかしながら、パーライトを 10%以上添加した場合においては、5%添加の場合とほぼ同等あるいはそれ以上の界面せん断強度を与えている。特に、水セメント比が 80%においてパーライトを 10%添加した時には、5%の添加に対して大きな界面せん断強度を示している。Fig. 5 と Fig. 6 の破壊特性に関する結果と Fig. 3 と Fig. 8 のマトリックスおよび界面特性に関する結果を合わせて考察すると、パーライトの添加は、マトリックスの破壊靱性を低下させ、マルチプルクラックの形成を促進する一方で、同時に界面特性を低下させ、繊維架橋効果を低減することがわかる。これが、本研究で作製した繊維混入率 3vol%

の PVA 繊維複合材料の破壊特性を向上させる上で、適切なパーライト添加の範囲が存在している理由であると考えられる。すなわち、水セメント比が 80%、パーライト添加量が 10%のときにおいて特に破壊特性が向上しているのは、界面せん断強度の低下が抑制されたためであり、PVA 繊維の界面の親和性が最適化されるような状態が存在することが期待される。

そこで、Fig.9 に、PVA 繊維複合材料の切断面の電子顕微鏡写真を示す。ここに示した写真は、水セメント比 80%の条件で作製した PVA 繊維複合材料の切断面である。黒色の円形および楕円形の領域が PVA 繊維であり、セル構造の集合体の断面がパーライトである。PVA 繊維およびパーライトのいずれも試験片全体にほぼ均一に分散していることがわかる。

Fig.10 に、水セメント比が 80%の条件で作製

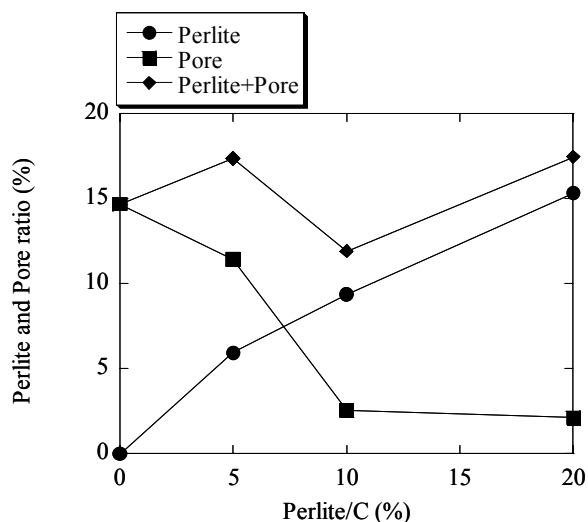


Fig.10 Perlite and pore ratio; W/C=80%.

した PVA 繊維複合材料の断面におけるパーライトおよび空隙の存在率を示す。パーライトおよび空隙の存在率はそれぞれ、電子顕微鏡写真の視野の面積で空隙およびパーライトの面積を除いたものである。パーライト無添加の複合材料では、不定形な空隙が観察され、パーライト添加量 5% の PVA 繊維複合材料においても、パーライトとともに約 2 倍の量の不定形な空隙が観察される。しかし、パーライト添加量 10% および 20% の PVA 繊維複合材料では、パーライトが増えているが、空隙は減少している。パーライト添加量を増やすにつれて、空隙が比較的安定な組織をもつパーライトに置き換わっているものと考えられる。これらの観察は、マトリックス中におけるパーライトおよび空隙の存在率を観察したものであるが、これらの PVA 繊維複合材料の微細構造の変化が、PVA 繊維複合材料の界面せん断強度や破壊特性に大きく影響を及ぼしているものと考えられる。マトリックス / PVA 繊維界面近傍の微細構造のより詳細な観察が、最適なパーライト添加量の決定に重要な情報を与えられと考えられる。

4. まとめ

押出成形により作製した PVA 繊維複合材料の破壊特性に及ぼすパーライト添加の影響につ

いて以下にまとめる。

- (1) パーライトの添加量の増加に従い、マトリックスの破壊靱性は低下する。これは、パーライトの添加により、マトリックスに欠陥を導入することにより起こる。
- (2) パーライトを添加することで軽量化を図れると同時に引張強度、破断ひずみの破壊特性も向上できることを示した。本研究で作製した PVA 繊維複合材料では、密度 1.25g/cm^3 で最大 2.4% の破断ひずみを発現させることに成功した。
- (3) 繊維混入率 3vol% の PVA 繊維複合材料の引張強度および破断ひずみはパーライト添加量が 10% 付近で極大値を示した。これは、パーライトの添加により、PVA 繊維複合材料の微細構造が変化するためによるものと考えられる。

参考文献

- 1) 高島博之, 宮外清貴, 橋田俊之, Li, V.C.: 押出成形によるポリプロピレン短繊維補強セメント系複合材料のマルチプルクラック発生条件に関する破壊力学的研究, コンクリート工学論文集, Vol.13, No.1, pp.1-11, 2002.1
- 2) Takashima, H., Miyagai, K., and Hashida, T.: Fracture properties of Discontinuous Fiber Reinforced Cementitious Composites Manufactured by Extrusion Molding, Proceedings of JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites, pp.75-83, Oct.2002
- 3) 例えば, Kanda, T., Li, V. C.: Interface property and apparent strength of high-strength hydrophilic fiber in cement matrix, J. of Materials in Civil Engineering, Vol.10, No.1, pp. 5-13, 1998