

論文 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

高田 浩夫^{*1}・飯塚 貴洋^{*2}・浅野 幸男^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（HPFRCC）が引張力下で示すひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ挙動を、通常の圧縮試験機を用いて、円筒状の供試体を内圧によって引張破壊させることにより比較的簡単に確認する試験方法を提案した。繊維混入率の異なる 3 種類の HPFRCC について実験を行い、ダンベル型供試体を用いた一軸引張試験結果との比較を行い、円筒供試体を用いた試験によりひずみ硬化挙動や複数ひび割れ挙動を簡便に確認できることを検証した。

キーワード：HPFRCC, 複数微細ひび割れ, ひずみ硬化, 円筒供試体, 引張試験

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（HPFRCC）は、引張力下で複数の微細なひび割れを生じ、ひずみ硬化しながら大きな引張ひずみを示す繊維補強セメント系材料である¹⁾。ひび割れ幅の制御を材料自身が行う点にこの材料の大きな特徴がある。

HPFRCC のひび割れ性状（幅、数、分布等）を確認するには、一軸引張試験を行うことが望ましい。一般的な引張試験機や可搬型の引張試験装置²⁾に、両端の掴み部が拡幅されたダンベル型供試体をセットして一軸引張試験が行われているが、試験機やダンベル型供試体用型枠が必要なことから、これらの試験は必ずしも一般的とはなっていない。

引張試験に代えて曲げ試験によって、ひび割れ挙動を簡便に確認することもしばしば行われているが、高靱性繊維補強セメント複合材料（DFRCC）の中には、一軸引張試験では複数ひび割れ性状を示さない材料であっても曲げ試験では複数ひび割れ性状を示す場合もある。³⁾

本研究においては、HPFRCC の複数微細ひび割れ挙動を比較的簡単に確認する方法として、円筒状の供試体を内圧によって引張破壊させる試験方法を提案した。載荷

試験終了後に、円筒供試体の側面のひび割れを観察した。繊維混入率を変えた HPFRCC について試験を行い、ダンベル型供試体を用いた一軸引張試験の結果と比較し、提案した試験方法の有効性を確認した。

2. 実験概要

2.1 HPFRCC の種類と配合

高強度ポリエチレン繊維を体積比で 1.5% 混入した HPFRCC を標準とした。比較のため、繊維混入率を 1.0% あるいは 0.75% とした HPFRCC も作製した。HPFRCC に用いた材料を表-1 に、標準とした配合を表-2 に示す。

表-1 使用した材料

材料	仕様, 成分, 物性
高強度ポリエチレン繊維 (PE)	繊維径 12 μ m, 繊維長 12mm, 密度 0.98g/cm ³ , 引張強度 2.6GPa, 弾性係数 88GPa
セメント (C)	JIS R 5210 早強ポルトランドセメント, 密度 3.13g/cm ³
細骨材 (S)	7号珪砂, 密度 2.56g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (AD)	ポリカルボン酸エーテル系
増粘材 (MC)	水溶性メチルセルロース系

表-2 HPFRCC の配合

配合	繊維の種類	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)					
			水 W	セメント C	7号珪砂 S	高性能 AE 減水剤 * AD	増粘材 MC	繊維 * * PE
HPFRCC (F=1.5%)	PE	30	342	1264	395	37.9	0.9	14.6

* 化学混和剤 AD は、水 W と混合され単位水量の一部となる。

* * 繊維混入率が 1.0, 0.75% の配合では、それぞれ単位繊維量を 9.7, 7.3Kg/m³ とし、他の材料の比率は同一とした。

*1 岐阜県生コンクリート工業組合技術センター 所長 (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 工学部社会基盤工学科研究員 (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)

2.2 円筒供試体とダンベル型供試体

円筒供試体の形状、寸法を図-1に示す。円筒供試体型枠は、内径150mm、内高150mmの円柱供試体（割裂供試体）用型枠の中央に外径103mmのプラスチック型枠をセットしたもので、簡便性を考慮して身近にある試験器具を利用した。プラスチック型枠を中央にセットするため、厚さ2mmのドーナツ状鋼板を底部に用いた。既往の文献¹⁾において、一軸引張試験における厚さ13mm、30mm、50mmの供試体を用いた実験で、全ての供試体においてHPFRCCの特徴的挙動が確認されていることから、本実験で用いる供試体の管壁の厚さ23.5mmは、試験目的を満足すると考えた。

ダンベル型供試体は、土木学会施工指針¹⁾に規定する引張試験部の断面寸法30×30mm、長さ80mmのものを用いた。供試体は、型枠に振動を与えながらHPFRCCを打設した。材齢1日で脱型後、試験材齢14日まで20℃の水中で養生し、試験の数時間前に水中から取り出し載荷試験に供した。

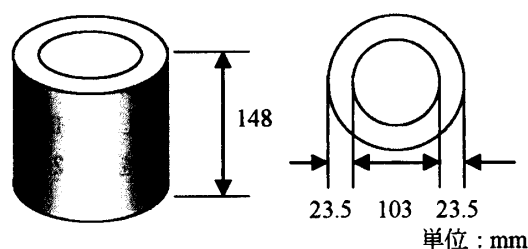


図-1 円筒供試体形状、寸法

2.3 円筒供試体を用いた試験

通常の圧縮試験機により、円筒供試体内部に内圧を作させた。円筒供試体内部に内圧を液圧状に作用させる媒体としては、液体を用いることが望ましいが扱いやすさを考慮して直径11mmならびに2.8mmの鋼球と氷を用いた。氷は、事前に実施した直径100mm、高さ200mmの円柱氷供試体を用いた実験において、通常の載荷速度の下で100kNの荷重レンジにおいて殆ど抵抗を示すことなく直径方向に塑性変形したので、媒体として用いることとした。鋼球を用いる場合には、鋼球が骨格を形成するいわゆる「せり持ち効果」を低減するため円筒供試体下部に写真-1に示すように、硬質ゴムを入れた空間を設けた。また媒体のみに圧縮試験機の荷重が伝わるように、写真-2に示す直径100mm（厚さ12mm）の鋼円版

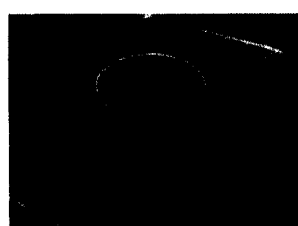


写真-1 供試体下部の空間

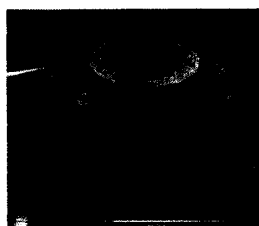


写真-2 円筒供試体

を介して載荷した。

(1) 荷重変位計測

円筒供試体（高さ148mm）の外周上の、上下2段（底部からの高さが50mmと100mmの位置）で直交する直径4方向の膨張変位を計8本の高感度変位計を用いて計測し、それぞれの段の円周方向の引張変形とした。載荷試験状況を写真-3に示す。なお、円筒供試体に肉厚があるため、放射線状の膨張変形と円周方向の膨張変形とは厳密には一致しないが、ここでは簡便のため、同一とみなした。上段ひずみと下段ひずみを平均して、供試体のひずみとした（高さ75mmに相当）。

圧縮荷重はロードセルで計測し、荷重を内空断面積で除して内圧とし、円筒供試体内側面に作用する内圧が、円筒供試体の断面の引張抵抗と釣り合うと簡略化し、HPFRCCに作用する引張応力を求めた。



写真-3 載荷試験状況

(2) ひび割れ計測

載荷試験終了後に、円筒供試体外周面中央部のひび割れを、マイクロスコープを用いて観察した。最大荷重後に局所化して大きな幅となったひび割れを除外し微細ひび割れの発生状況を観察した。

2.4 ダンベル型供試体を用いた試験

(1) 荷重変位計測

可搬型の手動式引張試験装置²⁾を用いた（写真-4）。ダンベル型供試体の一軸引張試験の様子を写真-5に示す。写真-5に示すように、供試体左右2個の高感度変位計を検長80mm区間に取り付けて引張変形を計測した。引張荷重は、供試体掴み治具を上げるロッドの反力を

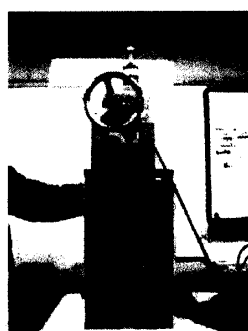


写真-4 引張試験機

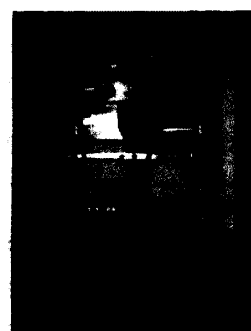


写真-5 引張試験状況

載荷装置上に取り付けたロードセルで計測し、試験区間の供試体断面積で除して引張応力とした。

(2) ひび割れ計測

検長 80mm 区間の中央部に長軸方向に引いた線に沿って、ひび割れをマイクロスコープにて観察した。引張ひずみが 0.2%, 0.5%, 1.0% の段階ならびに載荷試験後にひび割れ幅を計測したが、ここでは、円筒供試体のひび割れと比較をするため、載荷試験後のひび割れ幅のひび割れ幅のみを用いた。

3. 実験結果

3.1 3 種類の媒体を用いた試験

本実験の前に実施した 3 種類の媒体（鋼球 11mm、鋼球 28mm、氷）を用い荷重を加えたときの供試体高さ方向の中心における荷重－引張ひずみ曲線を図－2 に示す。

図－2 に示すように、氷を媒体として用いた場合、鋼球を用いた場合と比べて荷重－引張ひずみ曲線の形状のばらつきが大きくなった。常温での試験では、氷は徐々に解けて体積変化や温度による物性の変化などが試験結果に影響したものとする。氷は、鋼球と比べて重量が軽く、散乱する危険もなく安全であるのが特徴で

あるが、試験に用いるには融水を封じ込めるなどの工夫を要する。

次に、本実験において鋼球を用いたときの上下二段におけるひずみの例を図－3 に示す。

図から、初期ひび割れが発生する引張降伏強度に至るまでの弾性領域において、円筒供試体は上下均等に変位していることが確認できる。

その後、引張強度に達するまで、直径 11mm と 2.8mm の鋼

球では、2.8mm の方が上下段の変位差が小さいことが確認できる。このことから、直径 11mm の鋼球を用いた場合、ひび割れが発生すると荷重が局所化しやすく変位差が大きくなると考え、以降の実験は、直径 2.8mm の鋼球を用いて行った。

荷重から得られる内圧より円筒供試体の引張応力を求めると、次の 3.2 に示すダンベル型供試体による一軸直接引張試験より得られる引張応力の 1.6～2.0 倍程度大きな値となる。また、先に述べたように媒体により得られる荷重が異なることにより、圧縮試験機の荷重は、そのまま液圧としてではなく、媒体により減ぜられて作用していると思われる。

しかし、円筒供試体による荷重－ひずみ曲線からは、HPFRCC の特徴である引張応力下でのひずみ硬化挙動を十分確認できる。

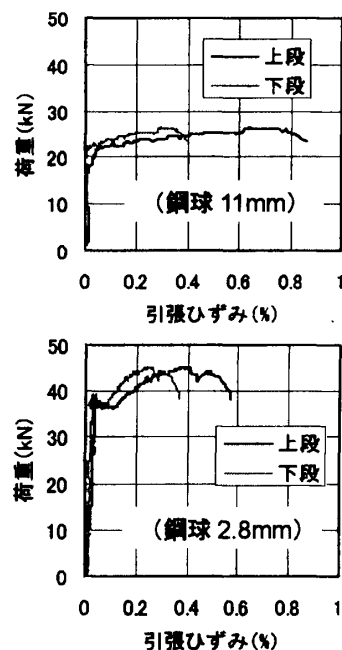
3.2 繊維混入量が異なる供試体の試験

(1) 引張応力（荷重）とひずみの関係

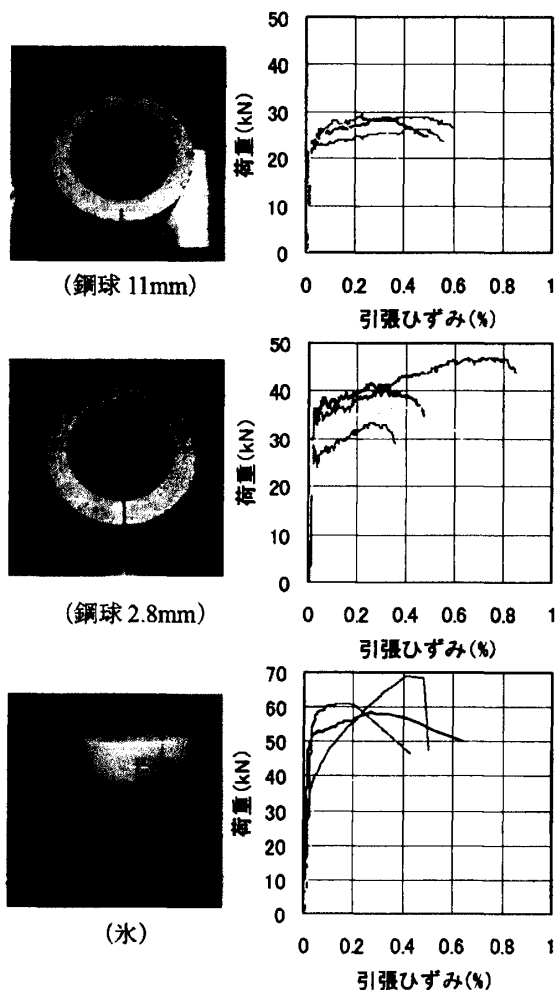
繊維混入率を体積比で 1.5%, 1.0%, 0.75% と変化した HPFRCC を用いてダンベル型供試体、円筒供試体を作製して、それぞれの供試体から得られた応力（あるいは荷重）－ひずみの関係を図－4、図－5 に示す。

ダンベル型供試体による試験結果から、繊維混入率は引張降伏強度、引張強度にほとんど影響しないが、ひずみに影響して、繊維混入率が低くなるとひずみが小さくなることが確認できる。

円筒供試体においても、ひび割れ荷重、最大荷重に関がその値に影響しない傾向が確認できる。



図－3 鋼球を用いた上下 2 段におけるひずみ測定例



図－2 各媒体を用いたときの荷重－ひずみ曲線

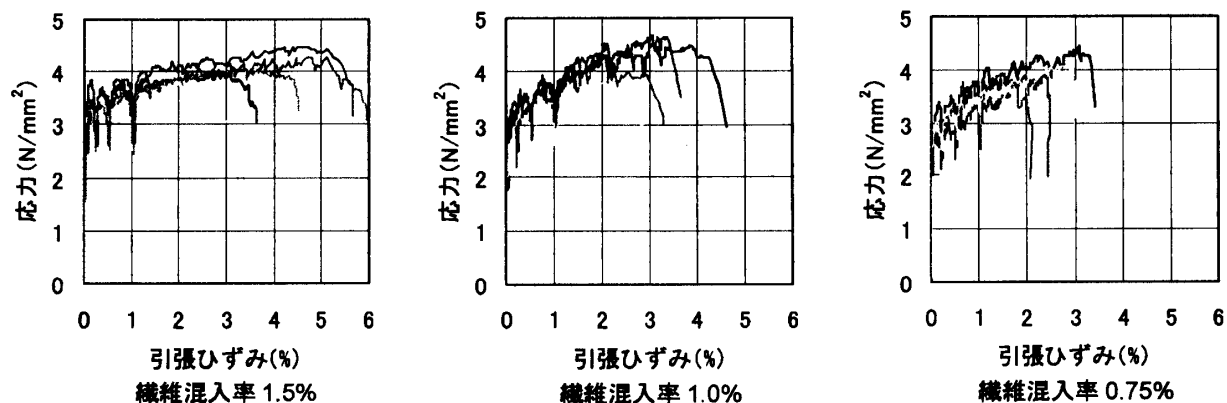


図-4 繊維混入率の異なる HPFRCC のダンベル型供試体による応力-ひずみ曲線

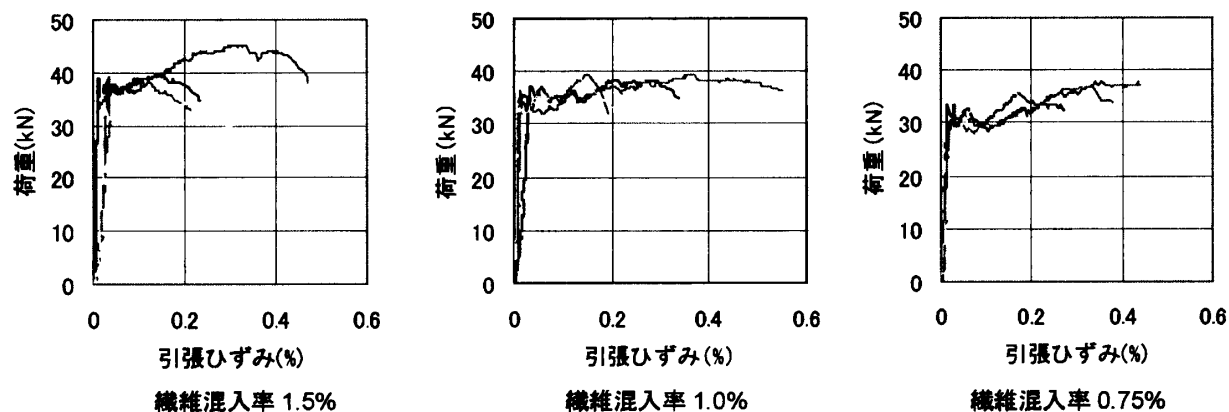


図-5 繊維混入率の異なる HPFRCC の円筒供試体による荷重-ひずみ曲線

しかし、円筒供試体のひずみは、ダンベル型供試体の1/10程度と小さく、ダンベル型供試体のように繊維混入率がひずみに与える影響は確認できない。ダンベル型供試体のひずみに比べ、円筒供試体のひずみが小さい理由として、引張領域の寸法が $150 \times 23.5 \times$ 約 400mm と大きく、最弱部分に引張強度が支配されることなどが考えられる。

図-4が示すダンベル型供試体におけるHPFRCCのひずみ硬化挙動は、図-5の円筒供試体の荷重-ひずみ曲

線からも確認することができる。

(2) ひび割れ性状

ダンベル型供試体と円筒供試体に発生したひび割れ幅の計測結果の代表例をそれぞれ図-6、7に示す。

ダンベル型供試体のひび割れ幅は、平均値を中央として左右均等に広がる正規分布の形を示すが、円筒供試体に発生するひび割れ幅は、右すそが広がり前者より大きな分布を示す。

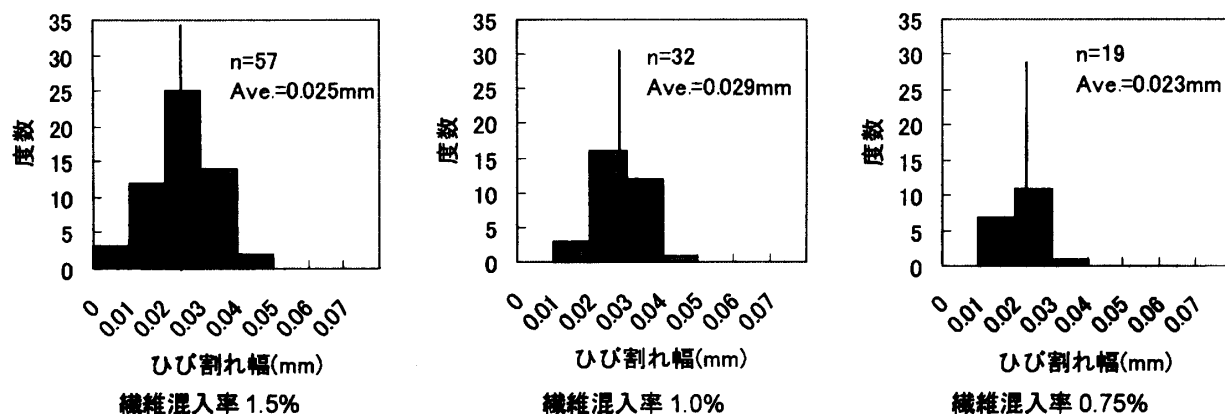


図-6 繊維混入率の異なる HPFRCC のダンベル型供試体に発生したひび割れ幅の分布の例

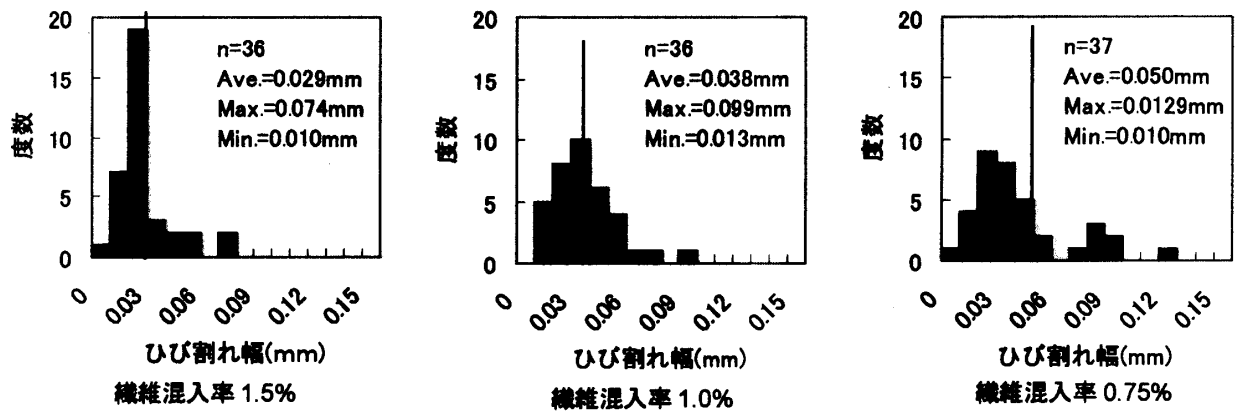


図-7 繊維混入率の異なる HPFRCC の円筒供試体に発生したひび割れ幅の分布の例

これは、後述の写真-6 に示す円筒供試体に発生するひび割れの性状が表すように、ひび割れが複雑に発生することにより、ダンベル型供試体のような単純なひび割れパターンでないことによると考える

ひび割れの確認本数について、円筒供試体のひずみは、ダンベル型供試体の 1/10 程度ではあるが、観察区間は円筒管外周の 471mm であり、ダンベル型供試体の 80mm の約 6 倍あるのでダンベル型と同程度のひび割れ本数の確認ができる。

実験に供した全ての供試体のひび割れ本数と平均ひび割れ幅の関係を図-8 に示す。

ダンベル型供試体及び円筒供試体に発生するひび割れの幅の平均値は、繊維混入率とは関係せず、0.02~0.05mm の範囲に分布していることが確認できる。

また、繊維混入率とひび割れ本数、ひび割れ幅の関係を各水準の平均値でまとめたものを図-9 に示す。

図は、ダンベル型供試体において、繊維混入率に関わらず、ひび割れ幅はほぼ一定であるが、ひび割れ本数は繊維混入率が増すと直線的に増加する顕著な傾向を示す。

一方、円筒供試体においては、ダンベル型供試体と異なり、繊維混入率によるひび割れ本数の増加傾向は見られないが、ひび割れ幅が減少する傾向が確認できる。

ダンベル型供試体は、土木学会施工指針¹⁾に規定するように、一方向より型枠内に材料が打込まれて作製されるので、30×30mm の限られた断面において繊維が一軸引張方向に配向しやすく、安定した挙動を示すが、円筒供試体の断面は、図-1 に示したように、148×23.5mm であり、繊維の配向、密度のばらつきの影響をより大きく受けると考える。

写真-6 に繊維混入率の異なる供試体に発生したひび割れの状況を示す。写真-6 では、供試体を湿潤させ、ひび割れ部の乾燥が遅れることを利用してひび割れを

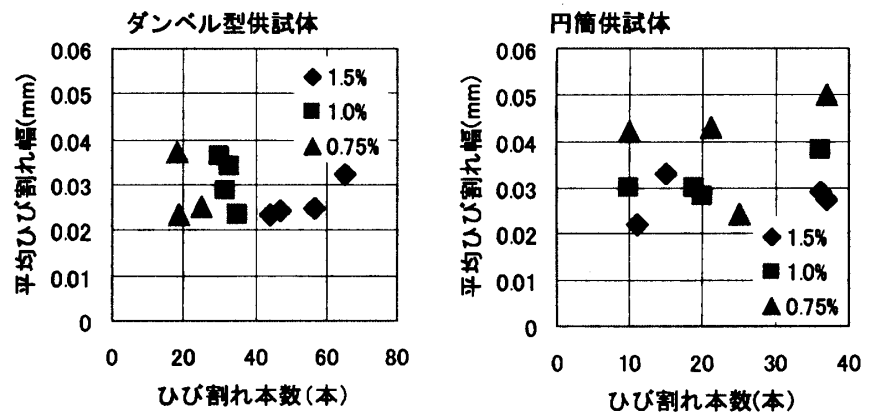


図-8 各供試体に発生したひび割れ本数と平均ひび割れ幅の関係

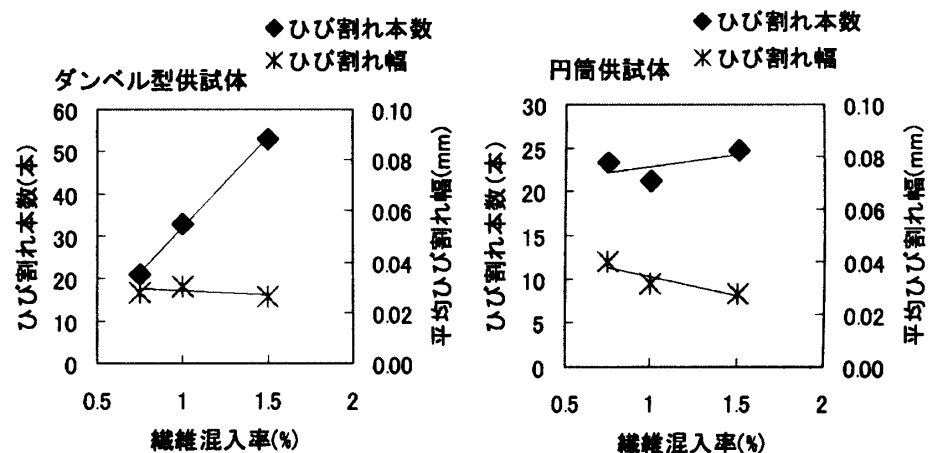


図-9 繊維混入率とひび割れ本数、ひび割れ幅の関係

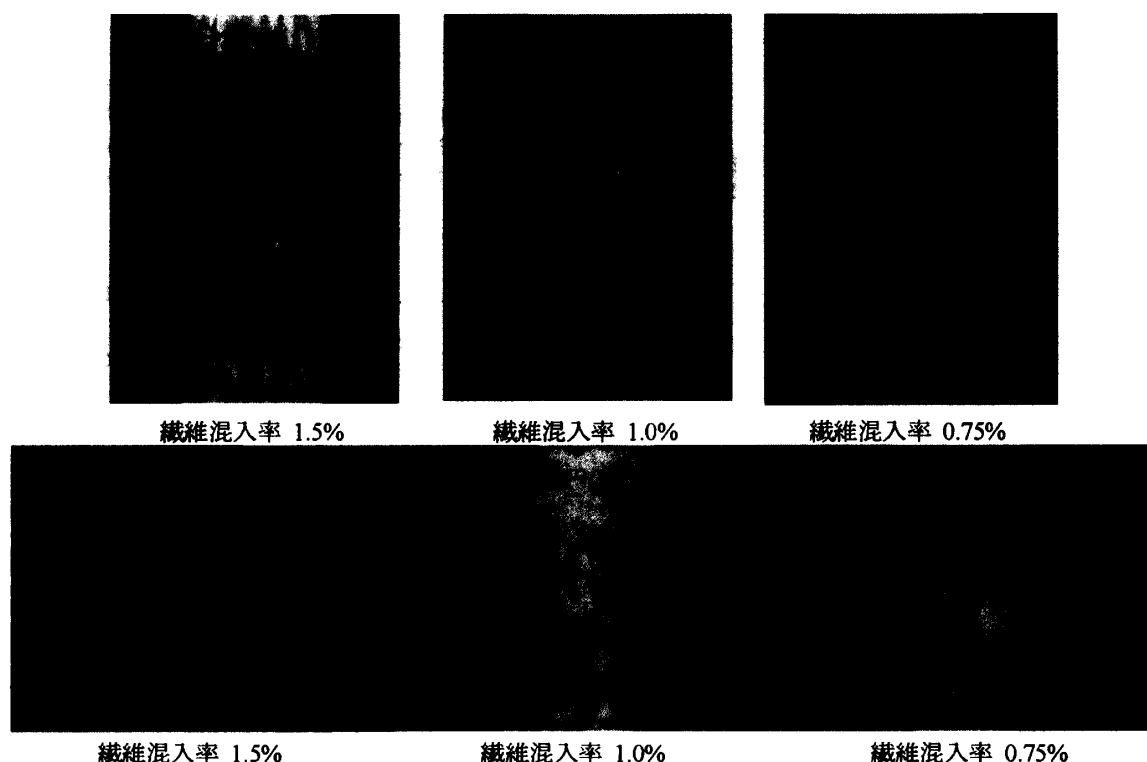


写真-6 繊維混入率の異なる供試体に発生したひび割れの状況

可視化したものである。この写真より、図-9 で示した繊維混入率とひび割れ本数の関係が確認できる。

円筒供試体における複数微細ひび割れの発生パターンは、繊維混入率が1.5%においてはダンベル型供試体と同様に、引張力と直角方向にひび割れが発生しているが、繊維混入率が低くなると軸方向のひび割れ以外に複雑なひび割れが発生している。繊維混入率が低くなると、繊維密度のばらつきが軸方向のひずみのばらつきに与える影響が大きくなり、ひび割れが軸方向以外にも複雑に発生したものとする。円筒供試体の上部から下部まで均等に内圧が作用するよう、媒体や供試体寸法（特に高さ）をさらに改良する予定である。

4. あとがき

円筒供試体を用いた引張試験において、荷重-ひずみ曲線から HPFRCC の示すひずみ硬化挙動を確認することができた。引張降伏強度、引張強度については、媒体に加えた荷重から直接算出することはできなかった。例えば、鋼管等を用いて鋼球を用いた載荷実験を行い、鋼管のひずみから引張応力を算定し圧縮試験機の垂直荷重が鋼球を介してどのように伝達されるか、さらに検討する必要があると考える。

載荷終了後のマイクロ스코プを用いたひび割れ計測から、HPFRCC の示す複数微細ひび割れ挙動を確認することができた。すなわち、円筒供試体を用いることにより、引張試験装置を用いなくても、通常の圧縮試験機

を用いて HPFRCC の複数微細ひび割れ性状を簡単に確認することができた。

以上のことから、本研究で提案した円筒供試体を用いた試験方法により、HPFRCC の特徴である複数の微細ひび割れに伴い応力を保ちながら大変形をする挙動を確認することができ、試験方法の有効性を確認した。また、適当な型枠を用意すれば、寸法の異なる供試体を用いた試験にも容易に対応することが可能であり、将来の応用が期待される。

媒体等さらなる改良の余地はあるが、この試験方法が、HPFRCC の今後の開発に役立てられればと考える。

参考文献

- 1) 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, 土木学会, 2007.3
- 2) 森山守, 林承燦, 内田裕市, 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引張性能と試験装置, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.311-316, 2006.7
- 3) Takashi MATUMOTO, Hirozo MIHASHI: JCI-DFRCC SUMMARY REPORT ON DFRCC TERMINOLOGIES AND APPLICATION CONCEPTS, Proceedings of the JCI international Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation - (DFRCC-2002), pp.59-66, Oct.2002