

論文 HPFRCC の一軸引張試験による引張特性評価に関する研究

柏木 章宏^{*1}・稲熊 唯史^{*2}・山下 賢司^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：一軸引張応力下において複数微細ひび割れ特性とひずみ硬化特性を示す HPFRCC を対象に、試験体寸法と端部固定条件をパラメータとした一軸引張試験を実施した。本研究で用いた試験体寸法の範囲内では、寸法が小さい方が初ひび割れ応力、最大応力、軟化開始ひずみともに大きくなり、試験体端部の固定条件については応力ひずみ関係に明確な差はみられなかった。また、発生したひび割れ幅をもとに検討した結果、検長間の回転を厳密に制御しても検長間の2次曲げの発生は回避することは困難であることを確認した。

キーワード：HPFRCC, 一軸引張試験, ダンベル, ひずみ硬化, ひび割れ

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 HPFRCC）は、一軸引張応力下において複数微細ひび割れ特性とひずみ硬化特性を示す材料である。HPFRCC を対象とした引張特性評価の有効な試験方法として、一軸方向に引張力を与えて直接的に引張特性を把握する方法がある。日本コンクリート工学協会では HPFRCC を対象とした共通試験が行われているが、試験方法毎に端部固定条件や試験体寸法などの違いにより試験結果が異なることが報告されている¹⁾。さらに、近年 HPFRCC の実施工への適用も進められており、一軸引張特性（応力ひずみ関係）の評価値を設計に反映させるためにも、危険側の評価にならないような考慮が必要である。したがって、一軸引張試験によって材料をより適切に評価するためにも、試験方法及び試験体寸法の差異による評価値の違いを把握しておく必要がある。

以上より本研究では、ひずみ硬化特性を有する HPFRCC について一軸引張試験を実施し、端部固定条件及び試験体寸法による引張特性の評価と発生するひび割れ特性について比較検討し、

これらの試験方法が材料特性の評価値に与える影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体及び使用材料

各試験体の使用した材料の詳細を表-1に、配合を表-2に試験体寸法を図-1に示す。試験体の種類は、ダンベル型試験体とし検長区間の断面形状を30mm×30mm（以下30mmダンベル）と60mm×100mm（以下100mmダンベル）の2種類とした。30mmダンベルの幅は60mm、長さを350mm、100mmダンベルの幅は100mm、長さを400mmとした。30mmダンベルの試験体はポリエチレン繊維(PE)及びビニロン繊維(PVA)を使用した。

2.2 載荷方法

一軸引張試験に使用する載荷装置を図-2に示す。30mmダンベルでは、端部固定条件として両端を固定及び片端を回転自由とした2ケース、100mmダンベルでは、両端を固定として引張試験を実施した。30mmダンベルの一軸引張試験には、油圧式サーボ型試験機を使用した。載荷方法は、両端固定の場合、試験体を直接ヘッドチ

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*2 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社 調査事業部開発技術部 (正会員)

*3 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (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-1 使用材料

材料	仕様
ポリエチレン繊維	繊維径12 μ m, 繊維長12mm, 引張強度2.6GPa, 弾性係数88GPa
ビニロン繊維	繊維径40 μ m, 繊維長12mm, 引張強度1.69GPa, 弾性係数40.6GPa
セメント	JIS R 5210 早強ポルトランドセメント
フライアッシュ	JISA6201 2種
細骨材	7号珪砂
高性能AE減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系
AE剤	高級脂肪酸塩及び非イオン系界面活性剤

表-2 配合表

配合名称	単位セメント量 C(kg/m ³)	フライアッシュ置換率 FA/(C+FA)%	水セメント比 W/C%	繊維添加量 vol%
PE	885	30	43	1.5
PVA	735	41	50	2.5

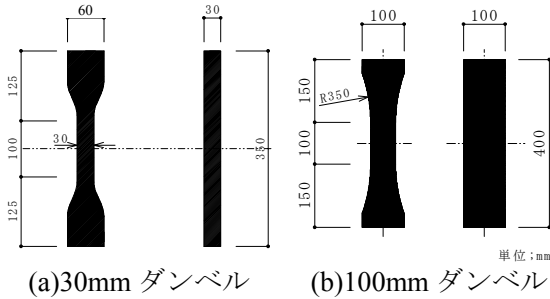
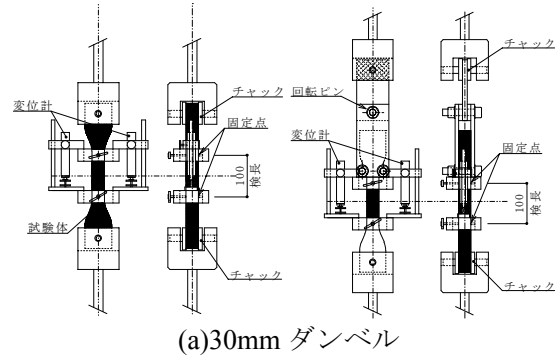


図-1 試験体寸法

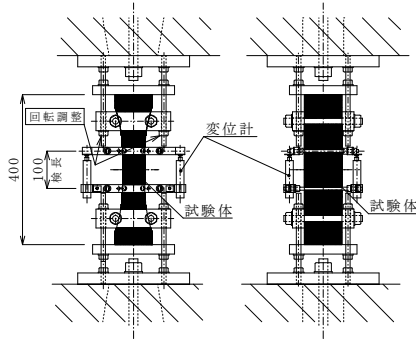
ヤックに固定しロードセルを介して引張力を加える。片端を回転自由とした場合は、試験体片側に回転無拘束の治具を装着し、ヘッドチャックに固定する。荷重はロードセル、変位は試験体両側に取り付けた変位計（変位計の容量は10mm）で計測した。100mm ダンベルの一軸引張試験には、油圧式万能試験機を使用した。

一般に一軸引張試験では、変位制御型の試験機を用いる¹⁾。本研究では、一般的な荷重制御型の万能試験機を用いて100mm ダンベルを検討することから、比較的剛性の高い治具を作製し、試験体を固定するとともに、平均荷重速度 10~20 μ /min の比較的ゆっくりとした速度で引張力を加えた。

検長位置に試験体とは点接触となるように治具を固定し、この治具に取り付けた4本の変位計（検長100mm）を用いて検長間の変位を計測した。荷重過程において、この4本の変位計をモニターし、検長間が平行に変位するように試験体固定部のボルトの長さを微調整しながら試



(a)30mm ダンベル



(b)100mm ダンベル

図-2 引張試験機概要図

表-3 試験体仕様

試験体名称	配合名称	試験体形状
PES	PE	30mmダンベル
PEL		100mmダンベル
PVS	PVA	30mmダンベル
PVL		100mmダンベル

験体検長間の回転変位を制御し荷重を行った。

ひび割れ幅は、引張ひずみが0.1%, 0.2%, 0.5%, 1%, 2%の状態で同一ひび割れの同一点を経時的に計測して、その変化を追跡した。ひび割れの計測はマイクロSCOPE (VH-5000, Keyence 社製) の倍率50倍で画像をパソコンに取り込み計測した。

3. 試験結果及び考察

3.1 応力ひずみ関係

試験体一覧表を表-3に、30mm ダンベルと100mm ダンベルの引張応力ひずみ関係を図-3に示す。30mm ダンベルでは、PE, PVAともに、ひび割れの分散、ひずみ硬化特性を有していることを確認することができた。30mm ダンベル及び100mm ダンベルで最大応力及び軟化開始ひずみ（=最大応力時ひずみ）を同一材料で比較す

ると、すべての特性で 30mm ダンベルが 100mm ダンベルを上回っている。

30mm ダンベルでは試験体端部の固定条件として固定及び回転自由の条件により载荷して、その差異を観察した。その結果、いずれの材料においても、軟化開始までの応力ひずみ関係の挙動は比較的良好に一致することが確認できた。軟化開始ひずみについては大きくばらついているが、それらは同一条件下（固定又は回転自由）においても生じており、固定条件との明確な関係は確認できなかった。

試験体寸法の違いによる応力ひずみ関係を考察すると、ひび割れ発生応力は、30mm ダンベルでは試験体端部の固定条件に関係なく PES で約 2.9~3.4MPa、PVS で約 4.9~5.5 と材料ごとにほぼ一定であるが、試験体寸法の違いで比較すると、100mm ダンベルが 30mm ダンベルに対して約 2/3 となっている。また、最大応力では 30mm ダンベルの最大応力は 100mm ダンベルに対して、PE では約 2 倍、PVA では約 1.5 倍になっている。また、同様に 30mm ダンベルの軟化開始ひずみは、PE では約 2~6 倍、PVA では約 1.5~3 倍になっている。

これらの結果から固定及び回転自由の固定条件については、応力ひずみ関係において明確な差異はみられなかったが、試験体寸法については大きな差がみられ、ひび割れ発生応力及び最大応力、軟化開始ひずみの全てにおいて試験体寸法の大きい 100mm ダンベルの方が小さくなった。

HPFRCC の一軸引張試験において引張特性に影響を与えるものとして以下の要因が考えられる。

- a) 断面内に分布する脆弱部の割合
 - b) 補強となる繊維の配向
 - c) 試験精度としての試験体の偏心又は回転変形（初期不整）
 - d) 材料の不均一性に起因する 2 次曲げ変形
- 各種試験方法による評価結果の差異については、これらの要因の全てが含まれた結果である

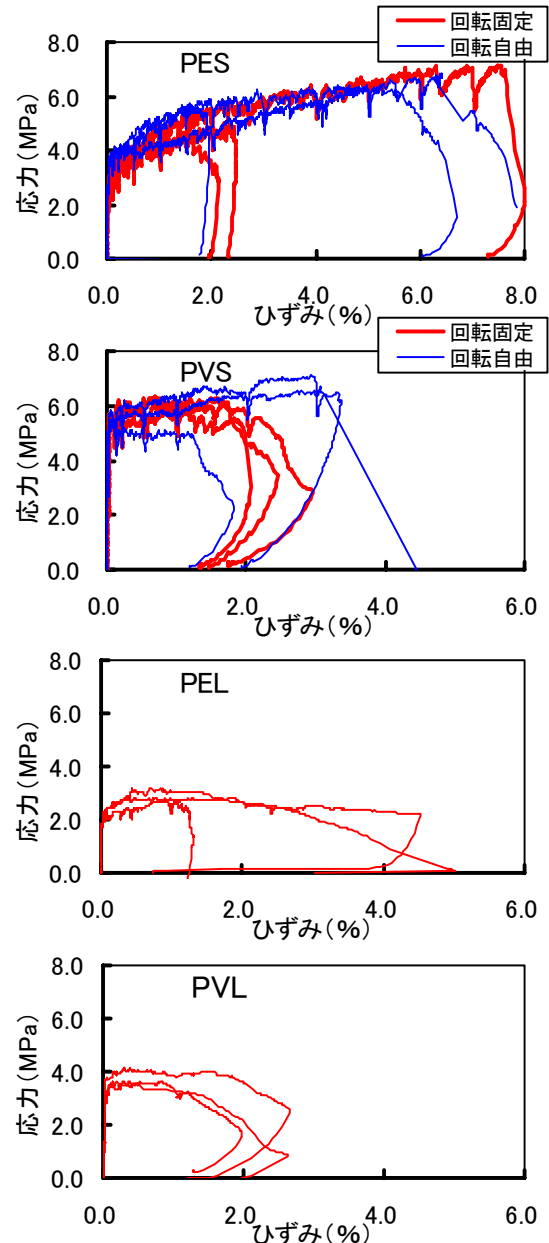


図-3 引張応力ひずみ関係

と考えられるが、断面積が小さくなることによって、引張方向に配置され補強効果が大きくなることが予想される。また、試験体端部の固定条件を回転自由とすることによって、2 次曲げ変形が助長されることが考えられる。

以下これらの評価結果の要因について载荷過程における検長内及びひび割れ部の回転変形や、ひび割れの発生状況をもとに考察する。

3.2 ひずみ硬化域の挙動

30mm ダンベルにおける载荷中のひび割れ計測では、発生したひび割れに対して試験体左右の両端について計測を行った。

30mm ダンベルにおいて、片端の固定条件の違いに関係なく軟化開始ひずみのばらつきが大きかった PES 試験体の 6 体のうち、軟化開始ひずみが、6%以上であった 3 体と 3%以下であった 3 体について、ひび割れ幅の断面方向の分布と変化を図-4 に示す。

軟化開始ひずみが 6%以上の試験体では、試験体の固定条件に関係なく引張応力の増加に伴って、左右のひび割れ幅がほぼ等しく均等に開口している。これに対して、軟化開始ひずみが 3%以下の試験体では、3 体のうち 2 体において、引張ひずみ 0.5%付近から左右のひび割れ幅に差が生じて、ひび割れ部に回転変形が発生していることがわかる。

また、回転変形の発生については、試験体寸法の異なる 30mm ダンベルと 100mm ダンベルの比較においても、ひび割れ発生状況から確認できる。図-5 はひび割れ発生状況の写真で、30mm ダンベルのひび割れがほぼ並行に複数種発生している形状に対して、100mm ダンベルの試験体では、ある部位に集中して放射線状のひび割れが発生している。これは放射線状に発生したひび割れの部位に回転変形（曲げモーメント）が発生していると考えられ、応力ひずみ関係でも、100mm ダンベルが 30mm ダンベルに比べて軟化開始ひずみが小さいことも一致する。

3.3 試験体寸法に及ぼす回転変形の影響

図-6 に検長間の変位から解析した各試験方法及び材料の平均曲率の変化を示す。30mm ダンベルの回転自由と固定を比較すると、片端を回転自由にすることによって軟化開始ひずみよりも比較的小さなひずみ領域から曲率が大きくなっていることが分かる。また、両端固定条件の 30mm ダンベルと 100mm ダンベルを比較すると、100mm ダンベルでは荷重過程において検長間の回転変形をモニターして制御したことにより、軟化開始ひずみまでの領域では、試験体サイズの小さい 30mm ダンベルよりも、検長間の回転変形は小さく、ほぼ平行に引張荷重が行われていることが分かる。

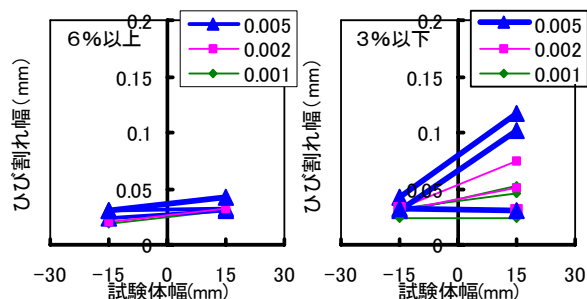


図-4 PES のひび割れ幅分布

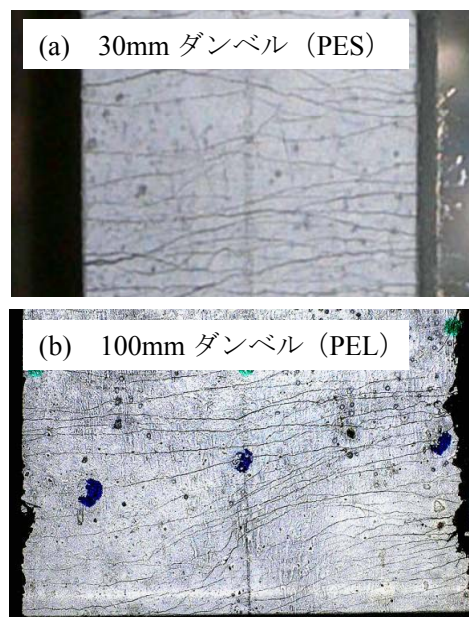


図-5 ひび割れ発生状況

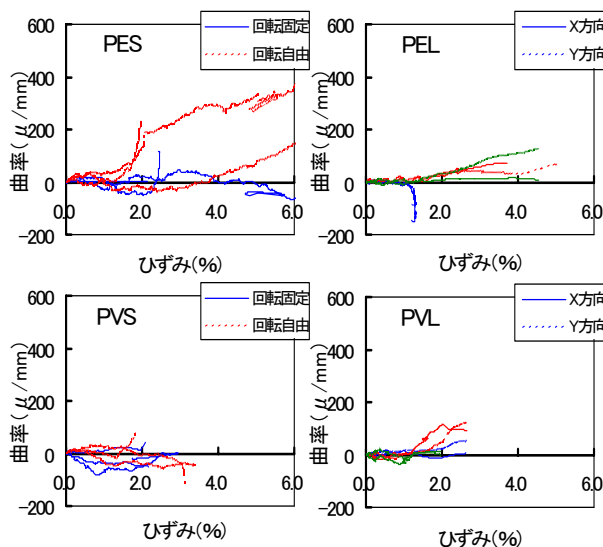


図-6 検長間の平均曲率

両端固定の試験方法において比較的軟化開始ひずみが小さかった試験体について、ひび割れ幅の分布と推移を図-7 に示す。

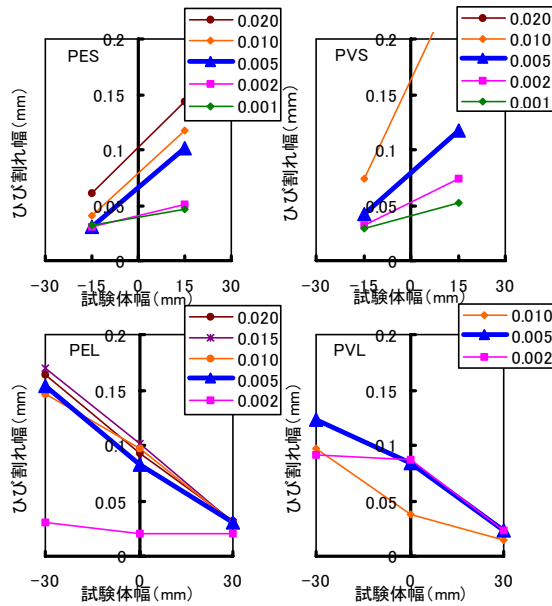


図-7 早期軟化試験体ひび割れ分布

例えば引張ひずみ0.5%において試験体中央位置でのひび割れ幅は0.08~0.1mmで、試験体寸法及び材料に関係なくほぼ等しい。また、断面方向のひび割れ分布は、0.5%付近から傾きを生じており、ひび割れ部に回転変形が生じていると考えられる。その角度は、30mmダンベルと100mmダンベルの双方とも0.002rad程度で大きな差は認められない。

しかし、同一回転角に対する試験体寸法の影響を考えた場合、図-8の概念図に示した通り試験体幅が大きくなることによって、最外縁に発生するひずみが試験体幅に比例して大きくなることが考えられる。

前述した引張特性に影響を与える要因のうち、試験体寸法が大きくなることによって断面内に分布する脆弱部が多くなることや、試験精度としての初期不整が大きくなることが予想される。そして、これらの要因に加えて断面内の不均一性に起因して発生した2次曲げによって生じた回転変形が、断面寸法の拡大により最外縁のひずみとして大きくなり、応力ひずみ関係の評価として軟化開始ひずみ及び最大応力に影響していると思われる。しかし、図-6に示した軟化開始ひずみまでの検長間の平均曲率は試験方法の相違より100mmダンベル試験体の方が小さく、検長間ではより平行に近く制御されて変位して

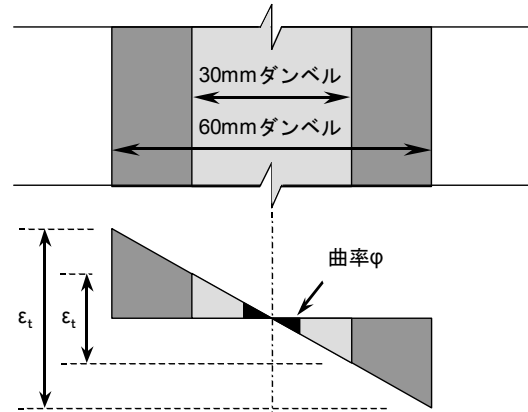


図-8 曲率と最外縁ひずみの概念図

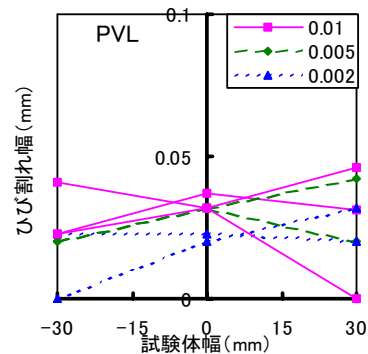


図-9 100mmダンベルのひび割れ分布

いたと思われる。

図-9にPVAの100mmダンベル試験体に発生したひび割れ分布とその変化を示す。これは同一試験体に発生した3本のひび割れを示したものであり、0.2%付近から左右反対方向にそれぞれ回転しているひび割れが混在していることが伺われる。

これらの結果から、100mmダンベルでは検長間の変位として比較的平行に推移しているが、検長間の部分的には個々のひび割れが、ランダムに左右の回転変形を生じていることを表していると推定できる。従って、断面の大きい100mmダンベルにおける引張載荷時の挙動としては、検長間においては平行に制御して変位させても、検長間の断面内で左右のバランスをとった2次曲げが発生しており、断面が大きな試験体を用いる場合、厳密な回転制御により試験体を固定しても、検長間での2次曲げの発生を回避することは困難であることが予想される。

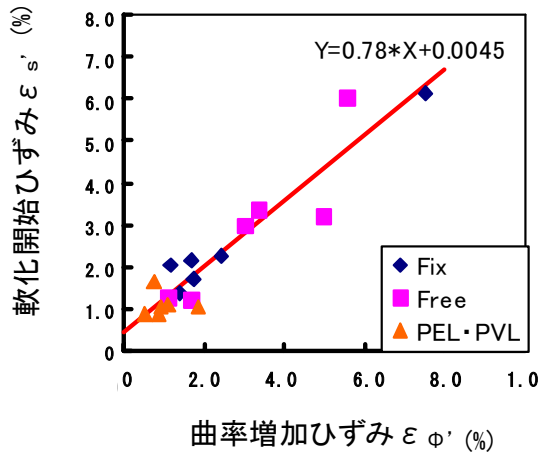


図-10 軟化開始ひずみ

3.4 軟化開始ひずみ域の挙動

図-6 に示した検長間の平均曲率の結果から、各試験条件及び材料において回転変形が急変するひずみと軟化開始ひずみとの関係を図-10 に示す。

検長間の平均曲率が急激に大きく変化するひずみと軟化開始ひずみとは、引張試験条件及び材料の種別に関係なく正の相関が見られる。また、その関係は変形開始のひずみに対して、軟化開始ひずみは約 20%程度小さく、引張载荷中の現象としては軟化開始が発生した後に回転変形が急激に発生していることが分かる。

4.まとめ

- (1) 本研究で提案したダンベル型試験体を用いた 2 種類の直接引張試験方法により、材料の応力ひずみ関係を計測することができた。
- (2) 試験体の固定条件として片端回転自由の条件とした場合、両端固定とした条件に比べて引張载荷中に発生する回転変形が大きくなり、载荷開始直後から一方向に曲がっていく挙動が定量的に確認できたが応力ひずみ関係は明確な差異は認められず、各 3 体の試験結果の比較ではむしろ軟化開始点までの挙動についてはよく一致した。
- (3) 2 種類の形状のダンベル型試験体による引張試験で得られた応力ひずみ関係を比較する

と、断面の小さい試験体で载荷した方が最大応力及び軟化開始ひずみともに大きな評価値となった。これは、断面積が小さい試験体では繊維の配向が 2 次元配向に近づくことや、2 次曲げによる影響が少ないことなどが考えられる。

- (4) ダンベル型引張試験において検長区間を平行に制御して曲げ変形を生じさせないように载荷した場合においても、検長内の試験体に正負双方向の 2 次曲げが発生し、その傾向は载荷断面が大きいほど顕著となる。これは、断面の拡大に伴って繊維配向の不均一性が助長されること、断面剛性が増加することが考えられる。
- (5) HPFRCC の引張特性を直接引張試験で評価する場合、試験体寸法の影響を受けることから、得られた物性値を設計に用いる場合はその試験体寸法や試験方法について考慮し、適切な材料係数を設定することが重要である。

謝辞；試験体作製に際して型枠を提供して頂いた鹿島建設(株) 殿、東海コンクリート工業(株) 殿ならびに試験機及び操作方法を指導して頂いた名古屋大学国枝稔助教授に感謝する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書，2004.5
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，2001.5
- 3) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，コンクリート技術シリーズ 64，2005.7