

# 論文 材料強度のばらつきに着目した HPFRCC の引張特性に関する研究

稲熊 唯史\*1・山田 裕一郎\*2・水田 武利\*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（High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite，以下 HPFRCC）における降伏強度や終局ひずみなどの引張強度特性は，補強繊維の分布や配向により影響を受け一般的にそのばらつきは圧縮特性に比べて大きい。本研究ではばらつきを考慮した引張強度特性と一軸引張及び曲げ応力下で発生する HPFRCC のひび割れ分散性状の関係について検討を行った。その結果，一軸引張応力下ではひび割れ分散はひび割れ強度が引張強度を上回る発生確率と相関することなどが明らかとなった。

**キーワード：**HPFRCC，ひび割れ，一軸引張，曲げ，繊維

## 1. はじめに

HPFRCCの特徴であるひび割れ発生後における疑似ひずみ硬化特性と微細ひび割れ分散が起こる条件として，ひび割れ発生マトリックス強度に対して繊維の架橋応力により確保されるひび割れ部での引張応力が上回ることが必要とされている<sup>1)2)</sup>。すなわち一軸引張応力下において，ひび割れ部での引張応力の最大値（引張強度）がマトリックスのひび割れ応力（ひび割れ強度）を上回らなければ HPFRCC の特徴が確保されないこととなる。一方 HPFRCC のひび割れ部での引張強度を決定する繊維の架橋応力は繊維の分散や配向に影響されると考えられることから HPFRCC の引張強度はそのばらつきが大きいことが予想される。

写真-1 に一軸引張試験後におけるひび割れ分散状況が，不均一に発生している試験体の例を示す。検長区間には複数ひび割れが発生している部分とひび割れが発生していない部分が混在している。ひび割れが発生していない領域では，その領域でのひび割れ強度が検長内において最弱となる引張強度（以下 最弱引張強度）を上回っていると考えられる。

以上のようにひび割れ強度と引張強度の双方に強度のばらつきが存在することを考慮すると，複数ひび割れ発生の必要条件であるひび割れ強度と検長内において最弱となる引張強度の関係が部分的に逆転していると考えられ，そこでは複数ひび割れが発生しないこととなる。従って，HPFRCC の疑似ひずみ硬化と微細ひび割れ分散を生じさせる条件である〔ひび割れ強度<引張強度〕の関係についても，ある検長を持った試験体で評価する場合は，実現象としてそれぞれの強度の平均値にばらつきを含んだ大小関係によって決定されると考えら

れる。また，同様に曲げ応力下においても複数ひび割れモーメントの条件となるひび割れモーメントと破壊曲げモーメントは評価区間内ではばらつきを持っていると考えられる。

しかし，ダンベル型試験体による一軸引張試験や曲げ載荷試験で評価できるひび割れ強度及び引張強度はそれぞれの評価区間とされている領域で最弱部分の強度（最弱引張強度）を示すもので，それらの評価試験方法では材料強度のばらつきを評価することは出来ない。そこで，本研究では一軸引張引張力下における材料強度のばらつきを検討する目的で，切欠き試験体による一軸引張及び曲げ載荷試験を行い切欠き断面における引張特性から統計的な検討によりそれぞれの強度のばらつきと平均値を評価した。そして，材料のばらつきを考慮した引張特性とひび割れ分散特性を比較検討した。

## 2. HPFRCC 材料

### 2.1 使用材料及び配合

本研究で用いた材料及び配合仕様を表-1 及び表-2 に示す。本研究では引張強度に影響を与える繊維混入量を 1.0%，1.25%，1.5%とする 3 種類の HPFRCC とし，マトリックスの配合は全て同一とした。フロー値は 160～170mm の範囲であった。

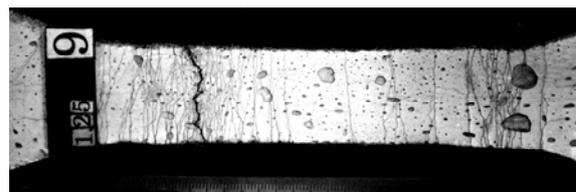


写真-1 分散が不均一な複数ひび割れ

\*1 ジェイアール東海コンサルタンツ（株） 調査事業部 開発技術部（正会員）

\*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科

\*3 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻（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）

### 3. 一軸引張応力下におけるばらつきの評価

#### 3.1 試験体及び試験方法

一軸引張応力下における引張特性の評価は材料のばらつきを評価するため、切欠きを設けた試験体による引張試験とひび割れ性状を評価するためのダンベル試験体による引張試験の2種類の試験を行った。試験体の打設は流込みにより打設し、高周波テーブルバイブレータで脱泡した。養生は水中で行い試験直前まで水中養生した。試験材齢は28～42日で実施した。一軸引張試験について試験体及び試験方法を図-1に示す。

切欠き試験体はあらかじめ型枠内に薄版を設置して切欠きを製作した。試験体の数量は繊維混入量を変えた3種類のHPFRCC材料についてそれぞれ36体とした。引張試験は片端を回転固定、他端を回転自由とした境界条件で変位制御により引張変位を与えた。計測は左右の切欠き部にクリップ型変位計を設置して引張荷重と切欠き部の開口変位量を10Hzのサンプリング周波数で計測した。計測した荷重は切欠きリガメント部の面積で除して応力に換算した。ダンベル試験体による引張試験では検長を100mmとし、検長区間の変位を測定して平均

ひずみに換算し、荷重を断面積で除して荷重とし、荷重ひずみ関係によって引張特性を評価した。それぞれの試験で得られた応力変位及びひずみ関係からひび割れ発生時の応力をひび割れ強度とし、軟化開始直前の最大応力を引張強度とした。

#### 3.2 ひび割れ強度及び引張強度のばらつき

切欠き試験体の引張試験では、繊維混入量に関係なく全ての試験体でひび割れ発生後の疑似ひずみ硬化が確認できた。また、繊維混入量に関係なく強度及び終局変位のばらつきは見られた。初期ひび割れはいずれの試験体についても概ね切欠き部で発生したが、その後荷重の増加に伴いひび割れは切欠き部周辺または切欠きの無い部分に複数ひび割れが発生した。終局時はひび割れ発生後の偏心の影響で2次曲げが発生し、曲げによって破壊する破壊形態が確認された。

切欠き試験体の引張試験で得られたひび割れ強度及び引張強度のばらつきが正規分布で表すことが出来る

表-1 使用材料

材 料	仕 様
高強度 ポリエチレン繊維	繊維径 12 $\mu$ m, 繊維長 12mm 引張強度 2600MPa, 弾性係数 88GPa
セメント	JISR5210 早強ポルトランドセメント
フライアッシュ	JISA6201 2種
膨 張 材	エトリンガイド系
細 骨 材	硅砂7号
高性能 AE 減水剤	カルボキシル基含有 ポリエーテル系
収縮低減剤	低級アルコール アルキレンオキッド付加物

表-2 配合仕様

水粉体比 W/B	単位粉体量 B (C+CS+FA)	フライアッシュ置換率 FA/B	繊維 混入量
30%	1262 kg	30%	1.0vol% 1.25vol% 1.5vol%

C:早強ポルトランドセメント FA:フライアッシュ CS:膨張材

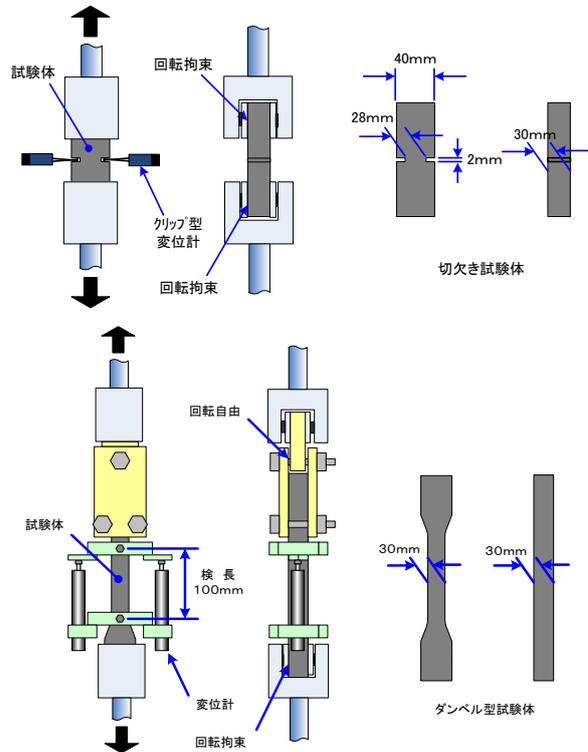


図-1 引張試験体及び試験方法

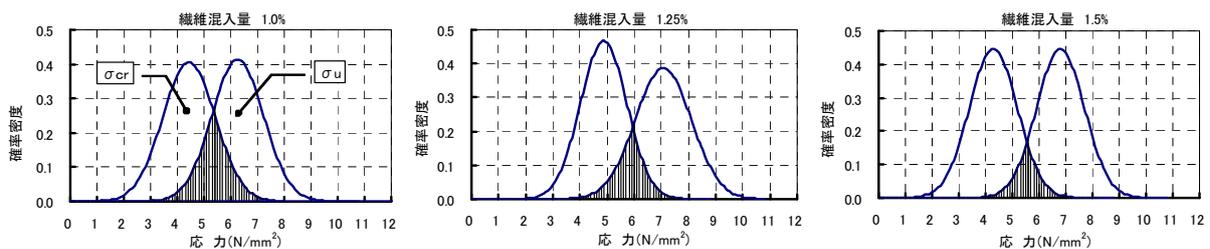


図-2 一軸引張応力下におけるひび割れ強度及び引張強度の分布

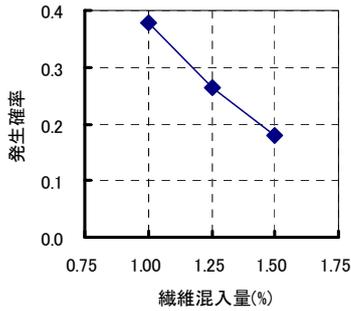


図-3 ひび割れ強度が引張強度を上回る確率

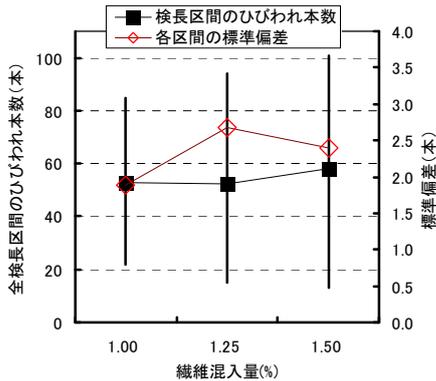


図-4 ひび割れ本数と引張終局ひずみ

と仮定し、試験で得られた強度の平均値及び標準偏差によりそれぞれの確率密度関数を計算した。図-2に繊維混入量別の確率分布を示す。図-2において、それぞれの確率密度関数の重なった斜線の部分が〔ひび割れ強度>引張強度〕となる確率を示しており、式(1)により斜線部の発生確率を計算した。

$$R = \Pr \{ [R(\sigma u) - R(\sigma cr)] < 0 \} \quad (1)$$

R; 引張強度がひび割れ強度を下回る確率

Pr { · }; 括弧内の事象が生起する確率

R(σ u); 引張強度の確率分布

R(σ cr); ひび割れ強度の確率分布

図-3に式(1)により計算した〔ひび割れ強度>引張強度〕となる発生確率と繊維混入量の関係を示す。繊維混入量の増加によりひび割れ強度と引張強度との差が大きくなったこと、ひび割れ強度の標準偏差がやや小さくなったことから、ひび割れ強度が引張強度を上回る確率は減少している。これは繊維混入量の増加により引張強度の平均値が大きくなったことにより確率分布の重なりが小さくなったものと考えられる。

### 3.3 一軸引張応力下におけるひび割れ性状

全てのダンベル試験体について複数に分散した微細ひび割れが発生したが、検長全域に及んでひび割れが分散している場合と、写真-1に示したように分散している領域としていない領域が混在している場合がいずれの配合についても確認できた。また、最もひびわれが多く発生した試験体相互を比べると、外観から観察した範

围では繊維混入量による明確な差はみられなかった。

そこで、ひびわれの数量及び検長内におけるひびわれ発生分布を定量的に把握する方法として、100mmの検長区間を10区間に分割し区間ごとに中心線と交わるひびわれの本数を測定した。検長区間に発生したひび割れ総数の平均値と標準偏差を図-4に示す。ひび割れ本数は繊維混入量と相関して増加傾向があるが、ひび割れ本数は全体的にばらつきが大きく、特に繊維混入量1.25%では他に比べてばらつきが大きいことから、繊維配向の偏りや試験体内部の空隙など何らかの欠陥が生じていたことが考えられる。

## 4. 曲げ応力下におけるばらつきの評価

### 4.1 試験体及び試験方法

一軸引張試験における切欠き試験体による引張試験と同様に、性能評価値が評価区間の最弱断面とならないように、切欠きを設けて破壊する断面を特定して統計的に断面性能の平均値及びばらつきを評価した。続いて、逆に評価区間とひび割れ性状及び断面性能評価値との関係を検討する目的で、モーメントスパンを3水準に変化させた2点荷重による曲げ試験を行った。

切欠き試験体はあらかじめ型枠内に薄版を設置して切欠きを製作した。切欠きの深さは一軸引張試験体と同様に6mmとした。試験体の数量は繊維混入量を変えた3種類のHPFRCC材料についてそれぞれ36体とした。切欠き試験体の荷重試験はモーメントスパンを40mm、せん断スパンを40mmとして荷重し、切欠き部に設置した切欠き間隔変位を計測するクリップゲージと荷重モーメントの関係から、変曲点を読み取ってひび割れモーメント(Mcr)を特定した。

モーメントスパンを試験水準とした曲げ試験では、断面高さ及び幅を40mmとし、モーメントスパンを40mm, 110mm, 180mmの3水準として支間長は160mm, 220mm, 300mmとして荷重試験を行った。荷重中における荷重点とスパン中央の変位を計測し、計測した変位からモーメントスパン内の曲率に換算し、モーメント曲率関係における変曲点からひび割れモーメントを特定した。試験体数量は全て9体とした。試験体及び試験方法図-5に示す。

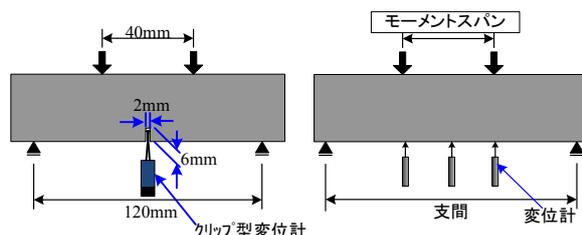


図-5 曲げ荷重試験体及び荷重方法

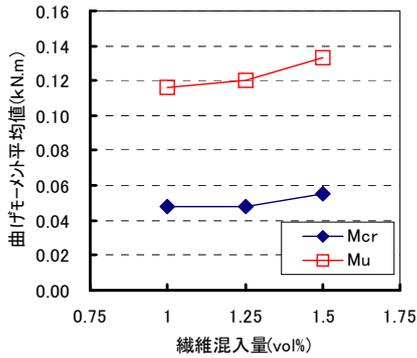


図-6 切欠き曲げ試験結果

#### 4.2 ひび割れモーメント及び最大モーメントのばらつき

切欠きを設けた曲げ試験体の載荷試験結果から得られたひび割れモーメントと最大モーメントの結果を図-6に示す。ひび割れモーメント及び最大モーメントともに繊維混入量の増加により大きくなっている。また、切欠き試験体の載荷試験結果から得られた平均値と標準偏差から統計的に処理した確率密度関数を図-7に示す。ひび割れモーメントと最大モーメントの確率密度は一軸引張試験におけるひび割れ強度と引張強度との関係とは異なり、ひび割れモーメントと最大モーメントの平均値の差が比較的大きく、そして標準偏差が小さいことから、それぞれの領域が重なっている範囲がほとんど無く、[ひび割れモーメント  $M_{cr}$  > 最大モーメント  $M_u$ ]となる発生確率は非常に少ないことが分かる。これは、5.で後述するように一軸引張と曲げ応力下の応力分布による相違によるものと考えられる。

#### 4.3 曲げ応力下におけるひび割れ性状と曲げ特性

モーメントスパン長さを水準として行った曲げ載荷試験の結果で得られたひび割れモーメント及び最大モーメントについて図-8に示す。

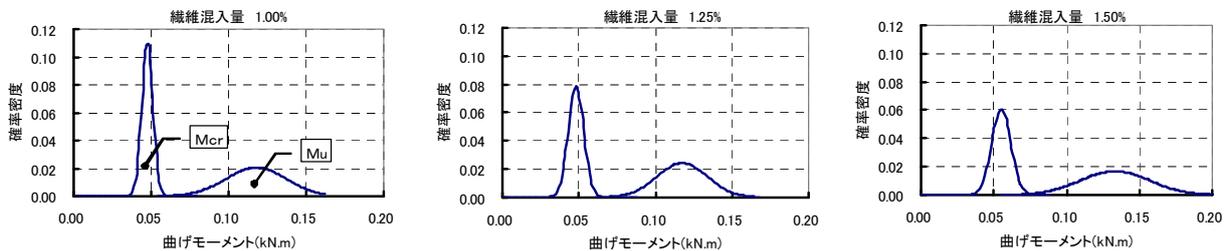


図-7 曲げ応力下におけるひび割れモーメント及び最大モーメントの分布

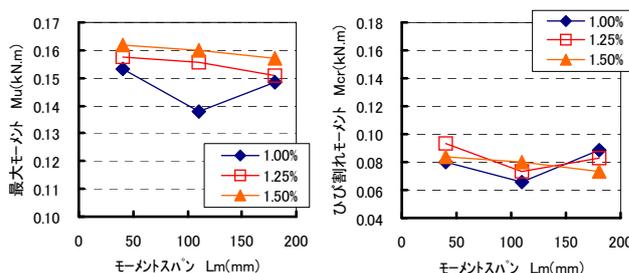


図-8 モーメントスパンを変えた曲げ試験結果

モーメントスパン長さとひび割れモーメント及び最大モーメントの関係は、ひび割れモーメントにおいては明確な関係は見られずモーメントスパンの影響が少ないが、最大モーメントについては概ねモーメントスパン長さの増加と共に最大モーメントが減少している。繊維混入量 1.0%のモーメントスパン 110mm の水準が特異的に小さな値となっていることについては、試験体または実験上何らかの不具合が発生していたことが考えられる。

モーメントスパン内に発生したひび割れの評価は、載荷試験後において発生しているひび割れの本数を測定した。モーメントスパン及び繊維混入量とひび割れ密度の評価としてモーメントスパン 10mm 区間に発生した平均ひび割れ本数の関係を図-9に示す。モーメントスパンに発生したひび割れ密度は繊維混入量 1.5%を除きモーメントスパンの増加に伴って減少している傾向がみられる。繊維混入量 1.5%のように繊維補強量が増加するとモーメントスパン内に存在する欠陥の存在確率が小さくなることも考えられるが、本実験の範囲内では明確な要因は断定できなかった。

#### 5.一軸引張及び曲げ応力下における強度のばらつきとひび割れ分散の関係

一軸引張応力下における強度特性とひび割れ分散性の関係は、図-3及び図-4で示した通りひび割れ強度と引張強度との大小関係で示せると考えられる。そこで、繊維の混入量に関係なく引張強度とひび割れ強度の差と発生したひび割れ本数の関係を図-10に示す。引張強度とひび割れ強度の差が大きくなるとひび割れ本数が増加することを示している。

ダンベル試験体において評価される応力ひずみの関

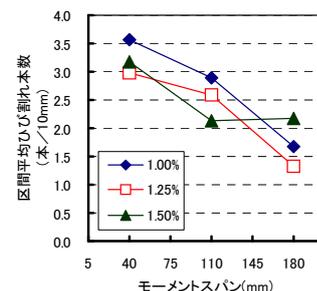


図-9 曲げ応力下におけるひび割れ密度

係は図-11 に示す通り、その試験体の評価区間に含まれているひび割れ強度と引張強度の最弱の値を示している。複数ひび割れ発生の条件として〔ひび割れ強度<最弱引張強度〕とすると、複数ひび割れが生じる範囲は試験体の評価区間内において、ひび割れ強度の分布のうち引張強度以下の範囲の発生確率で決定される。そこで、ひび割れ分散性を向上させる手法としては図-12 に示すように、ひび割れ強度が一定であると仮定した場合、引張強度を増加させてひび割れ強度を上回る確率を大きくするひび割れ強度との応力差を大きくする方法と、それぞれのばらつきの範囲を小さくする方法が考えられる。しかし引張強度を増加させる方法として繊維混入量を増やした場合、特に弾性係数が大きい繊維では弾性域での補強効果によりひび割れ強度も同様に増加すると応力差の拡大効果が抑制されてしまう場合もあり得る。

切欠き試験体によって評価した一軸引張応力下におけるひび割れ強度と引張強度の関係は、図-2 に示した確率分布の通りひび割れ強度と引張強度の差が比較的小さく、そのばらつきを含めて考慮するとひび割れ強度と引張強度の大小関係が逆転する確率が存在する。これに対して曲げ応力下では図-7 に示した通りひび割れモーメントと最大モーメントの差は比較的大きく、それぞれのばらつきを考慮してもこれらの大小関係が逆転する確率は非常に少ない。

図-13 に材料の一軸引張応力ひずみ関係をひび割れ

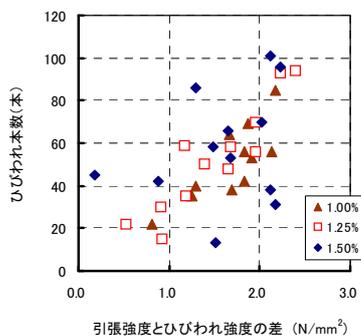


図-10 強度特性とひび割れ幅密度の関係

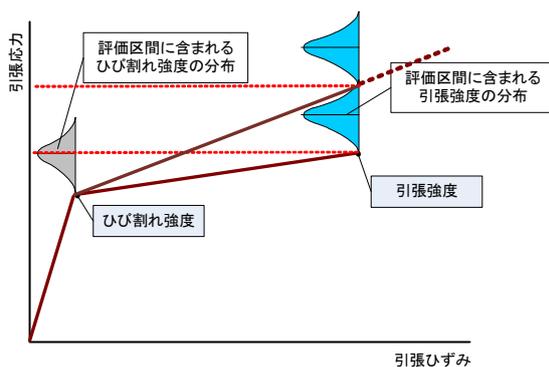


図-11 ダンベル試験で評価される強度の関係

強度以降の塑性領域を考慮して、既報<sup>3)</sup>で示した断面高さを200分割したファイバーモデルで非線形解析した断面内の高さ方向の応力分布を示す。使用したひび割れ強度と引張強度は切欠き試験体による一軸引張試験における繊維混入量1.25%の実験を使用し、引張終局ひずみは3.0%としている。

曲げ応力下におけるひび割れモーメントは、全断面有効の弾性状態で引張縁の応力が材料のひび割れモーメント強度に達する状態であることに対して、最大モーメントでは HPRCC が疑似ひずみ硬化特性を有し高靱性であるため、引張縁で終局ひずみに達して最大モーメントとなる状態では引張荷重を分担する断面のほとんどの領域が塑性化しており、ひび割れモーメントに対して最大モーメントが非常に大きくなることによる。これは、曲げ応力下における断面内の応力分布による構造的な影響であり、一軸引張応力下における評価値が材料特性を示すことに対して曲げ応力下においては断面高さなど試験体形状などの構造的な要因を含んでいることを示している。また、このことが一軸引張応力下においてひび割れ強度と引張強度が比較的接近していることに対して、曲げ応力下ではひび割れモーメントと最大モーメントの差が大きい理由であり、一般に HPRCC のひび割れ特性を評価した場合に曲げ応力下の方がひび割れ分散性が良好で複数のひび割れが発生する要因となっている。

引張軟化する繊維補強セメント複合材料における引張強度と評価区間をパラメータとした寸法効果について既往の研究<sup>4)</sup>によって検討されている。ここでは、引張軟化する脆性材料の破壊について評価区間(体積)に存在する欠陥の確率論に着目して、引張強度が形状母数を考慮したワイブル分布で表すことが出来るとしており、一軸引張試験において検長区間長さを変化させた場合、検長区間が長くなるに従って引張強度の平均値が小さくなることを示している。本研究では曲げ応力下にお

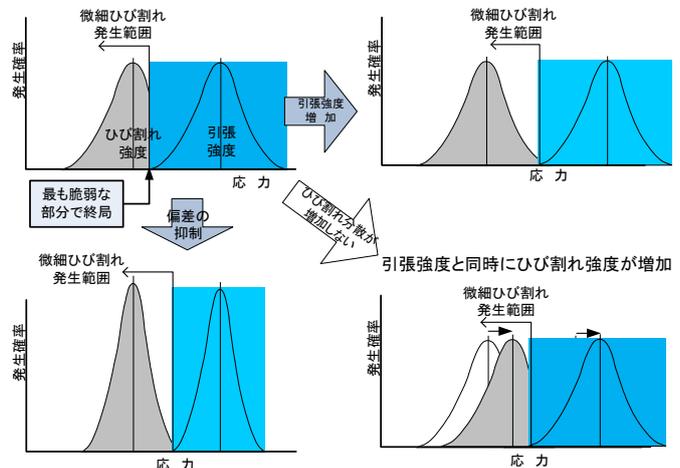


図-12 ひび割れ分散と強度の関係

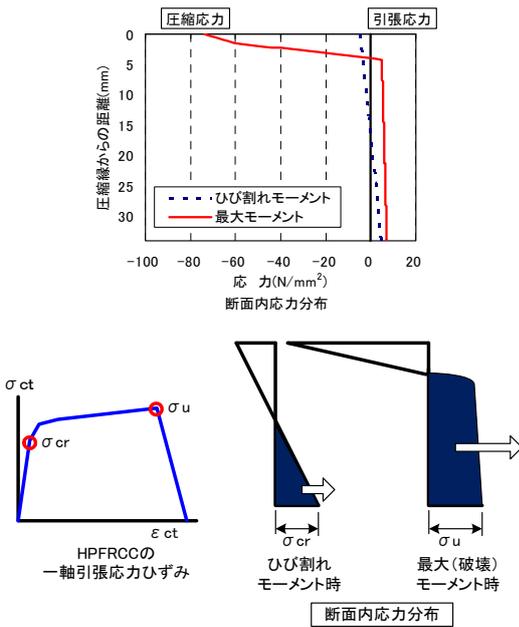


図-13 曲げを受ける断面の応力分布

いてモーメントスパンを変化させており、また HPFRCC が疑似ひずみ硬化する延性材料で図-13 に示した通り最大モーメント時には塑性状態にあることから前提条件が異なるが、曲げ載荷試験の結果では図-8 に示した通り破壊モーメントがモーメントスパン長さの増加に従って減少する傾向にある。これはモーメントスパン長さの増加により欠陥又は脆弱な領域を含む確率が大きくなったことにより最大モーメントの平均値が減少したと考えることが出来る。

次に一軸引張応力下における強度特性とひび割れ分散性の関係と同様に、最大モーメントとひび割れモーメントの差とひび割れ密度の関係を図-14 に示す。ひび割れ密度は最大モーメントとひび割れモーメントの差と相関が見られる。評価区間としているモーメントスパンの増加に伴ってひび割れ密度が減少する原因としては、ひび割れモーメントのばらつきに対して最大モーメントのばらつきが大きいことから、図-8 に示した通り最大モーメントが減少し、ひび割れモーメントとのモーメント差が小さくなったことによる

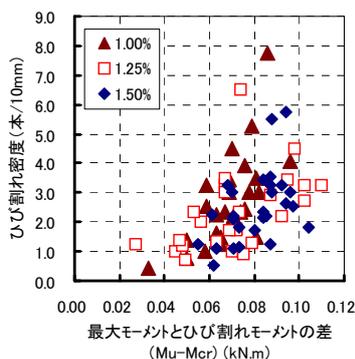


図-14 切欠き曲げ試験体結果

ることによると考えられる。短繊維補強材料の引張特性のばらつきに関してはマトリックス中

の繊維の分布や配向、空隙などの欠陥の分布などが大きく影響していると考えられるが、現段階では直接的にそれらを評価する有効な手段がないため、本研究では強度特性のばらつきを評価することで間接的に検討した。今後はこれらを合理的に直接的に評価できる手法の開発と、それらと強度特性の関係を考察することが必要であると思われる。

## 6.まとめ

以上の結果からばらつきを含んだ強度特性とひび割れ分散性について得られた考察をまとめる。

- (1)HPFRCC に発生する複数ひび割れのひび割れ密度は、一軸引張応力下においてはひび割れ強度と引張強度の差、曲げ応力下においてはひび割れモーメントと最大モーメントの差と相関があり、それらの差の増加によりひび割れ密度も増加する。
- (2)本研究で用いた HPFRCC 材料では、一軸引張応力下において強度のばらつきを考慮すると（ひび割れ強度 < 最弱引張強度）の関係が逆転する範囲が存在し、ダンベル試験体においてひび割れが発生しない領域が生じる要因となっていると考えられる。
- (3)一般的に曲げ応力下の方がひび割れ分散が良好な理由は、曲げ応力下における最大モーメント時では、引張側の HPFRCC の大部分の領域が塑性化する構造的な特性により、弾性状態のひび割れモーメントとの差が大きくなることによる。
- (4)2 点載荷による曲げ載荷試験では、モーメントスパン長の増加により最大モーメントが減少する。これは、モーメントスパン長が増加することにより評価区間における断面耐力のばらつきの分布（範囲）が拡大し、最も脆弱な断面耐力が低下することによると考えられる。

## 参考文献

- 1)Victor C.Li : From micromechanics to structural engineering - The design of cementitious composites for civil engineering applications, Structural Eng./Earthquake Eng, Vol.10, No.2, 37s-48s, 1993.7
- 2)関田徹志, Li,Victor C, 浜田敏裕 : ビニロン繊維を用いた高靱性 FRC の材料設計と開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.229-234, 1998.7
- 3) 稲熊唯史, 内田裕市, 六郷恵哲 : HPFRCC の曲げ挙動の寸法効果ならびに引張特性との関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.369-374, 2007.7
- 4)山田寛次, 三橋博三ほか ; 短繊維強化セメント系複合材料の引張強度の寸法効果に関する確率的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 540 号, pp.7-12, 2001