

論文 超高強度繊維補強コンクリート梁部材の曲げ引張強度分布に関する研究

佐々木 一成^{*1}・野村 敏雄^{*2}

要旨：超高強度繊維補強コンクリートは、混入されている短繊維により高い引張性能を発揮するが、その引張特性は力が作用する方向に対する短繊維の状態により異なる。本稿では、梁部材を作製し、高さ方向に層状に分割した試験体についてそれぞれ上および下の面から曲げ载荷を行って、梁部材の高さ方向における曲げ強度の分布を確認した。その結果、下面に近いほど部材軸方向の引張強度が高く、部材の高さ方向にほぼ比例して部材軸方向の引張強度は低くなることが確認された。また、繊維の配向を考慮した FEM 解析について検討し、部材軸方向に向いている繊維量を層ごとに仮定して曲げ耐力を推定できることを確認した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、繊維配向、曲げ強度

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート (Ultra-high strength fiber reinforced concrete : 以下, UFC と表記) は混入されている短繊維により高い引張性能を発揮する。その引張特性は力が作用する方向に対する短繊維の状態により異なる。UFC は流動性が高く、自己充填が特長である一方、打込み時の流動が繊維配向に大きく影響することが、既往の研究¹⁾などから知られているが、部材の深さ方向の強度分布についてあまり研究されていない。

UFC の FEM 解析は一般的に引張軟化曲線²⁾を用いるが、繊維の配向は考慮していない。繊維の配向を考慮した解析は繊維 1 本 1 本をモデル化した手法により試みられている³⁾が、UFC は繊維の本数が多いため、実部材に適用するには解析規模がかなり大きくなると考えられる。

そこで、UFC 製梁部材を高さ方向に層状に分割した試験体についてそれぞれ上および下の面から曲げ载荷を行い、梁部材の高さ方向における曲げ強度の分布を確認した。また、実験結果を繊維の配向を考慮した FEM 解析によって载荷方向による曲げ強度の違いを再現することにより、適用性について検討した。

2. 実験方法

2.1 概要

図-1, 3 に示すように幅×高さ×長さ=100×100×400 および 100×200×1200 の梁部材を作製したうえで、高さ方向に 2 分割および 4 分割した。そして、分割していない試験体および切断した試験体を図-2, 4 に示す方法により打込位置に対して上または下の面から曲げ载荷試験を実施した。100×200×1200 の梁部材についてはポリプロピレン繊維 (以下, PP 繊維と表記) を用いた UFC でも作製し、実験した。

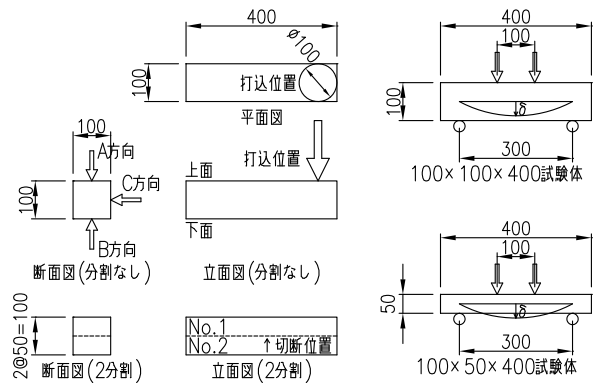


図-1 100×100×400 試験体

図-2 载荷条件

および切断位置

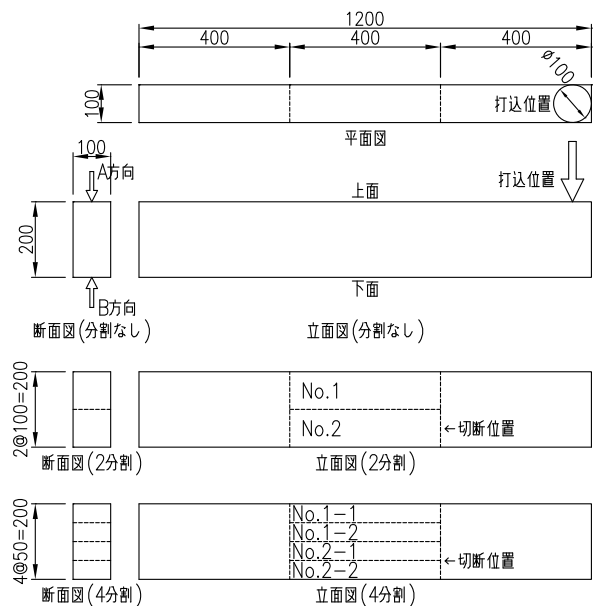


図-3 100×200×1200 試験体および切断位置

*1 (株)大林組 技術研究所 構造技術研究部 副主任研究員 修 (工) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 構造技術研究部 上席研究員 博 (工)

2.2 使用材料

(1) 鋼繊維を用いた UFC

本実験に使用した UFC はポルトランドセメント、ポゾラン材、無機粉体、粒径 5mm 以下の骨材、特殊高性能減水剤、水および鋼繊維から構成され、標準養生により材齢 28 日で圧縮強度 180N/mm^2 、引張強度 8.8N/mm^2 （いずれも特性値）を満足する材料である⁴⁾。使用した鋼繊維は直径 0.16mm、長さ 13mm、引張強度 2700N/mm^2 で 2vol.% 混入している。載荷実験時におけるテストピース（ $\phi 100 \times 200$ ）の圧縮強度は 192N/mm^2 、弾性係数は 47.4kN/mm^2 であった。打込時のモルタルフローは 265mm（スランプフローで 790mm 程度に相当）であった。

(2) PP 繊維を用いた UFC

マトリックス（モルタル）については鋼繊維を用いた UFC と同じである。使用した PP 繊維は直径 0.4mm、長さ 30mm、引張強度 500N/mm^2 で 2.5vol.% を混入している。載荷実験時におけるテストピースの圧縮強度は 127N/mm^2 、弾性係数は 42.1kN/mm^2 であった。打込時のスランプフローは 570mm であった。

2.3 試験体作製方法

試験体は図-1、3 に示す位置より写真-1 に示すようにスランプコーンを上下反転させて漏斗として用い、UFC を連続して流し込むことにより作製した。流量は鋼繊維 UFC が毎分 16 リットル、PP 繊維 UFC が毎分 4 リットル程度であった。24 時間気中養生し、脱型後 20°C の水中で養生した。硬化後、分割試験体については図-1、3 に示す位置で切断して成形し、厚さ 50mm および 100mm とした。

2.4 載荷方法

載荷条件を図-2、4 に、載荷状況を写真-2 に示す。変位は支点およびスパン中央で計測し、スパン中央の絶対変位から支点の絶対変位を除いた値を中央変位とした。図-1、3 に示すように試験体製作時の上面側から載荷する場合を A 方向載荷、下面側から載荷する場合を B 方向載荷、側面から載荷する場合を C 方向載荷とした。同じ方向に載荷した分割試験体は同じ梁から切り出している。なお、曲げ応力は、ひび割れの有無にかかわらず、載荷荷重から計算される発生曲げモーメント M を断面係数 Z で除した値である。

3. 鋼繊維を用いた試験体の実験結果

3.1 $100 \times 100 \times 400$ の曲げ強度

曲げ強度の一覧を表-1 に示す。一般的に規定された曲げ強度試験方法は C 方向から載荷する方法であり、強度は 39.6N/mm^2 であった。

UFC は繊維の架橋効果により、ひび割れ後も引張に抵抗することができるため、曲げ部材においては最外縁が



写真-1 100×200×1200 試験体 打込み状況

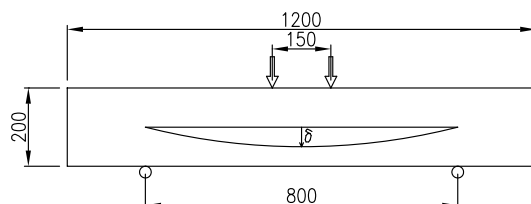


図-4 100×200×1200 試験体載荷条件



写真-2 100×200×1200 試験体 載荷状況

表-1 $100 \times 100 \times 400$ の曲げ強度 (N/mm^2)

分割なし			2分割	
A方向	B方向	C方向	A方向	B方向
42.8	35.1	39.6	No.1 21.7	33.3
			No.2 37.2	34.7



図-5 得られた曲げ強度を示す位置

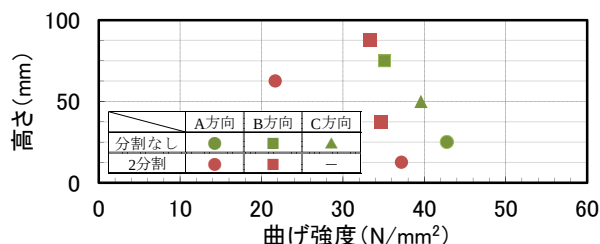


図-6 曲げ強度分布($100 \times 100 \times 400$)

ひび割れた後も RC 部材のように荷重を保持することができる。このことから、UFC の曲げ強度は、試験体の最外縁だけでなく、引張側半分の引張強度が大きく影響していると仮定し、図-5 のように引張側半分の中央（最外縁から試験体の高さの 1/4 の位置）における強度として整理した。結果を図-6 に示す。なお、C 方向から載荷した結果は梁の中央（高さ 50mm）における結果として整理した。下面で曲げ強度が高く、下面から離れるにつれて曲げ強度が低下するが、上面近傍では強度が若干高くなった。

3.2 100×200×1200 の曲げ強度

分割していない梁の曲げ応力-変位関係を図-7 に示す。A 方向載荷では曲げひび割れ発生後も荷重が増加し、ピーク後にひび割れが上に進展するにつれて急激に低下した。一方、B 方向載荷では曲げひび割れ発生後、A 方向載荷と同様に荷重が増加したが、増分は緩やかとなり、ピーク後の荷重低下も緩やかとなった。

曲げ強度の一覧を表-2 に、3.1 と同様の方法で整理した結果を図-8 に示す。下面で曲げ強度が高く、下面から離れるにつれて曲げ強度が低下する傾向は 100×100×400 と同様であった。また、分割数に関係なく同様の傾向がみられ、高さ方向に対しておおむね比例して曲げ強度が低下している。上面近傍では強度が若干高くなる傾向も 100×100×400 と同様であった。下面では繊維が型枠面に沿って流動させた部材軸方向に向いているため強度が高く、下面から離れるにつれて繊維が鉛直方向に向いていると考えられる。上面近傍においては繊維が表面から突き出すことはなく、表面に沿って配向しているため強度が若干高くなったと考えられる。

3.3 100×200×1200 の梁両端の曲げ強度分布

梁両端（打込位置に対して上流側および下流側）について中央部と同様の実験した結果を図-9 に示す。下面から離れるにつれて曲げ強度が低下する傾向は中央部と同じであるが、上流側（右）、下流側（左）とも中央部と比べると分布している曲げ強度は全体的に低い。中央部に比べて上流側は打込みによる影響、下流側は妻部で流れが止まることによる影響により繊維の方向が乱れ、部材軸方向に向いている繊維が若干少ないと考えられる。

4. PP 繊維を用いた UFC の実験結果

4.1 100×100×400 の曲げ強度

一般的に規定された曲げ強度試験方法（C 方向から載荷）で、19.8N/mm²であった。

4.2 100×200×1200 の曲げ強度

分割していない梁の曲げ応力-変位関係を図-10 に示す。A 方向載荷では曲げひび割れ発生後も荷重が増加し、ひび割れが複数入り、荷重の増減を繰り返しながら、

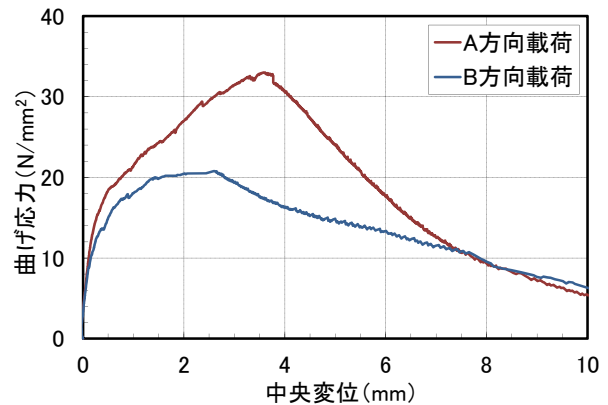


図-7 曲げ応力-中央変位関係
(100×200×1200・鋼繊維)

表-2 曲げ強度(N/mm²)
(100×200×1200・鋼繊維)

分割なし		2分割		4分割	
A方向	B方向	A方向	B方向	A方向	B方向
33.0	20.8	No.1	26.4	No.1-1	22.7
		No.2	50.6	No.1-2	29.5
			39.6	No.2-1	37.6
				No.2-2	47.4
					41.4

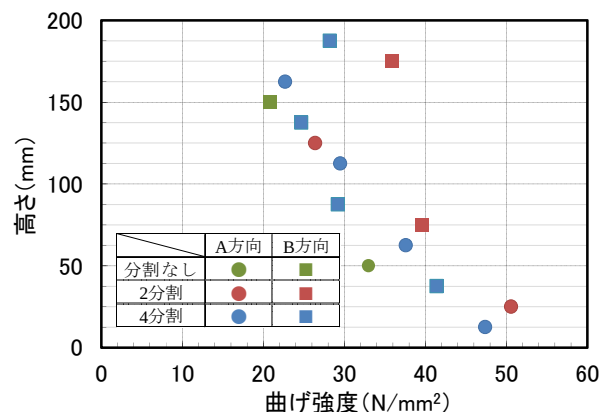


図-8 曲げ強度分布
(100×200×1200 中央・鋼繊維)

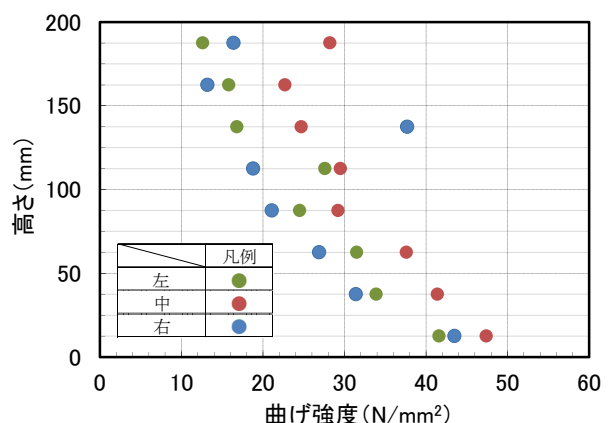


図-9 曲げ強度分布
(100×200×1200 左-中-右・鋼繊維)

ひび割れが上に進展するにつれて低下した。一方、B 方向載荷ではひび割れ本数が少なく、1 本のひび割れが拡大することにより荷重が低下した。

曲げ強度の一覧を表-3 に、3.と同様に整理した結果を図-11 に示す。下面で曲げ強度が高く、下面から離れるにつれて曲げ強度が低下する傾向は鋼繊維と同様であった。上面近傍では強度が若干高くなる傾向も鋼繊維と同様であった。下面に近いほど曲げ強度が高い理由として鋼繊維の場合は沈降の影響も考えられるが、比重が 0.89 と小さい PP 繊維も鋼繊維と同様に下面に近いほど曲げ強度が高いことから、繊維の向きが大きく影響しているものと考えられる。

4.3 鋼繊維 UFC との比較

曲げ強度分布の比較を図-12 に示す。鋼繊維 UFC と比べて強度分布は緩やかである。PP 繊維 UFC は曲げ強度が低いことや今回の実験では鋼繊維 UFC に比べて流動性が低く、繊維が流動方向に配向した割合が小さかったと考えられる。

5. 非線形 FEM 解析による検討

5.1 概要

UFC 梁部材の解析において、1 つの引張軟化特性を梁全体に適用した場合、載荷方向によって曲げ強度が異なることを同じモデルで再現することはできない。そこで、繊維が受け持つ引張を考慮するため、各要素の部材軸方向に埋込み鉄筋を適用し、鉄筋比を繊維の体積比とみなすことにより 2 次元非線形 FEM 解析を行った。埋込み鉄筋は、要素の基本特性をコンクリートで定義し、鉄筋が常にコンクリートと同一の変位を生じると仮定して要素内に鉄筋を取り込む方法であり、鉄筋とコンクリートの相対すべりは生じない。引き抜けにより破壊にいたる短繊維と鉄筋とは引張応力-ひずみ関係が異なるため、解析結果を実験結果にフィッティングさせることにより、繊維(埋込み鉄筋)の引張応力-ひずみ関係を仮定した。

なお、本検討では鋼繊維 UFC を対象とし、3.2 に示した $100 \times 200 \times 1200$ の梁中央を 4 分割した $50 \times 100 \times 400$ 試験体の曲げ載荷実験から得られた荷重-中央変位関係に解析結果をフィッティングさせることにより、各層の部材軸方向の体積あたり繊維量 (vol.%) を仮定した。

5.2 解析方法

下面に近いほど曲げ強度が高いという実験結果から、試験体の最下層で繊維が最も部材軸方向に向いていると考えられる。そこで最下層 (No.2-2 試験体の下半分) 部材軸方向の繊維量を 2.0vol.% と仮定し、図-19 に示すように A 方向載荷の No.2-2 の実験結果にフィッティングさせた。これにより、繊維の応力-ひずみ関係を図-14 のように設定した。繊維の引張強度は 2700N/mm^2 である

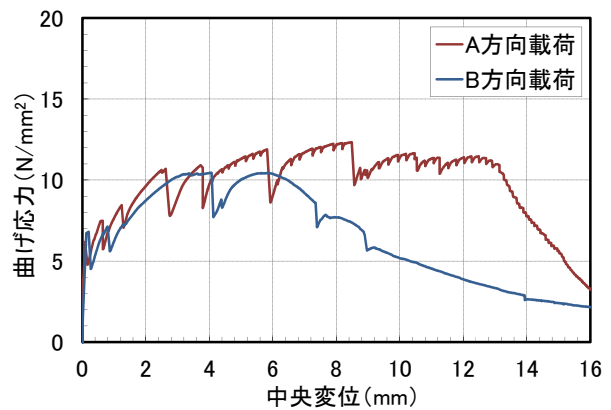


図-10 曲げ応力-中央変位関係
($100 \times 200 \times 1200$ ・PP 繊維)

表-3 曲げ強度(N/mm^2)
($100 \times 200 \times 1200$ ・PP 繊維)

分割なし		2分割		4分割	
A方向	B方向	A方向	B方向	A方向	B方向
12.3	10.5	No.1	10.4	No.1-1	10.2
		No.2	23.6	No.1-2	9.5
			20.8	No.2-1	13.7
				No.2-2	19.2
					16.2

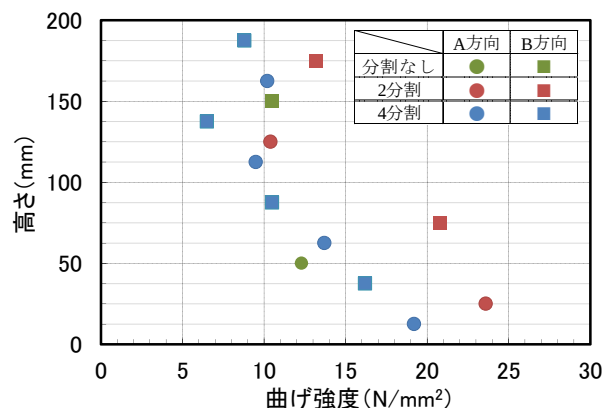


図-11 曲げ強度分布
($100 \times 200 \times 1200$ 中央・PP 繊維)

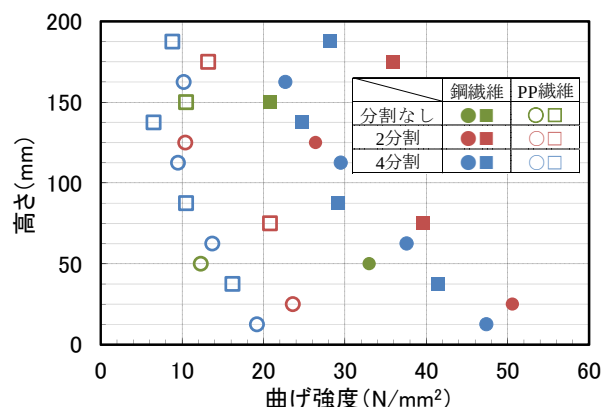


図-12 曲げ強度分布
($100 \times 200 \times 1200$)

が、曲げ破壊時に繊維が切断することではなく、抜出しており、 800N/mm^2 で付着が切れているものと考えられる。繊維の弾性係数は $2 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ とした。コンクリートの圧縮強度、弾性係数は今回使用した材料の試験値を使用した。ひび割れ発生強度は使用したUFCの既往の結果⁴⁾を参考に 9.4N/mm^2 とした。

解析に用いたメッシュは図-16～18のとおりである。2次元の対称モデルとし、すべてのモデルで高さ方向16分割、水平方向は要素の幅が10mm程度となるメッシュ割りとした。埋込み鉄筋は各要素中央の部材軸方向に設定し、各範囲にそれぞれ異なる繊維量（鉄筋量）を設定した。各要素の部材軸方向の引張応力-ひずみ関係は繊維量に応じて図-15のようになる。解析モデルの高さおよび幅は実験に用いた試験体の寸法を用いた。

5.3 検討結果

$50 \times 100 \times 400$ のフィッティングにより設定した各層の繊維量を図-13、解析結果を図-19、20に示す。軸方向の繊維量を変更することにより、A方向、B方向とも、おおむね荷重-変位をフィッティングできている。この繊維量分布を $100 \times 100 \times 400$ および $100 \times 200 \times 1200$ モデルに適用して解析した結果が図-21～23である。

$100 \times 100 \times 400$ モデルにおいて、A方向はNo.1で最大荷重が8割程度となっているものの実験結果の傾向をおおむね再現できている。一方、B方向はNo.1、No.2とも荷重-変位の傾向はあわらしているものの荷重の大きさが実験結果に比べて7割程度となっている。B方向は同じ梁から切出した試験体であるが、図-8からわかるように実験結果が4分割の試験体と比べて大きかったためと考えられ、梁作製時の個体差の可能性がある。

$100 \times 200 \times 1200$ モデルではひび割れ発生前の傾きもおおむね再現できしており、最大荷重も実験結果に比べて9割程度とよく再現できているが、ピーク以降の軟化域において差異があり、さらなる検討が必要である。なお、全断面2.0vol.%とした解析でもA方向の実験結果に近い結果となるが、B方向も全く同じ結果となり、载荷方向による差は再現できない。

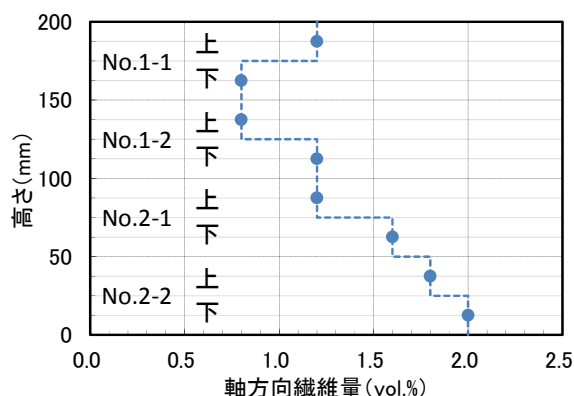


図-13 各層における軸方向繊維量の設定値

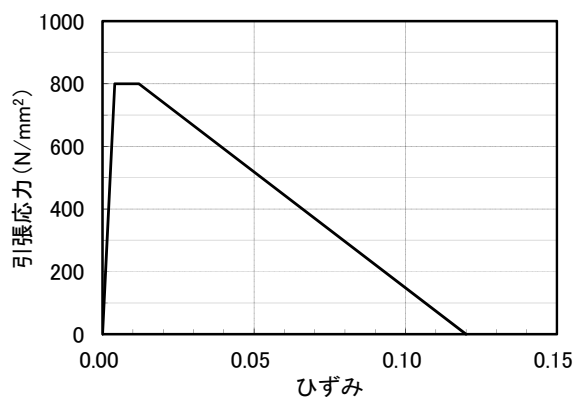


図-14 埋込み鉄筋の引張応力-ひずみ関係

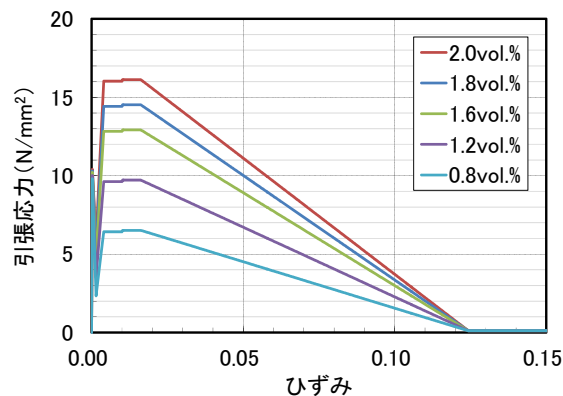


図-15 要素の部材軸方向の引張応力-ひずみ関係

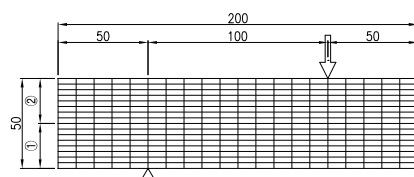


図-16 解析メッシュ (50×100×400)

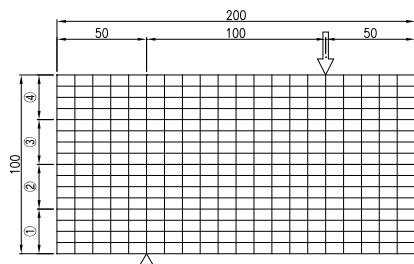


図-17 解析メッシュ (100×100×400)

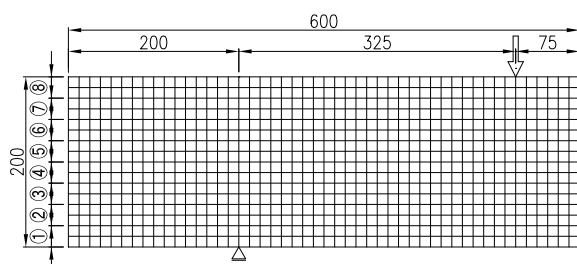


図-18 解析メッシュ (100×200×1200)

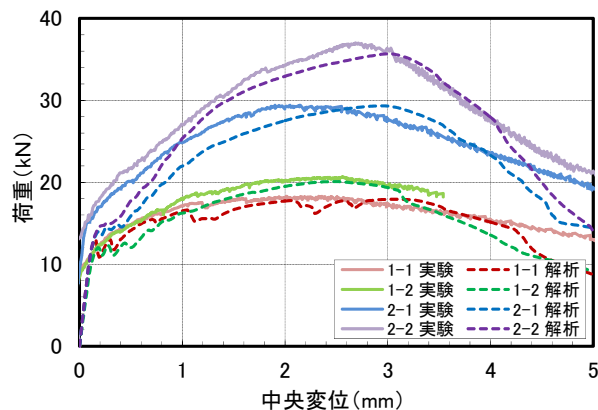


図-19 荷重-中央変位関係
(50×100×400・A方向載荷)

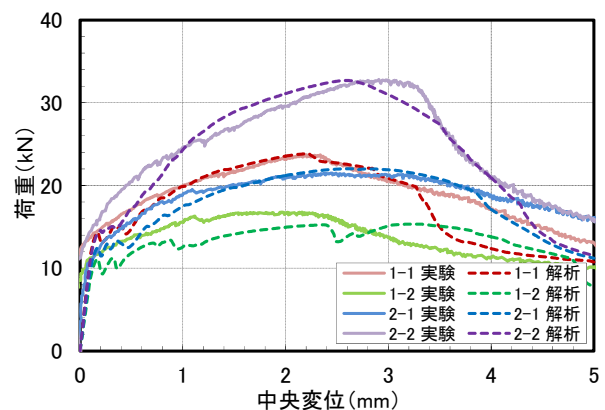


図-20 荷重-中央変位関係
(50×100×400・B方向載荷)

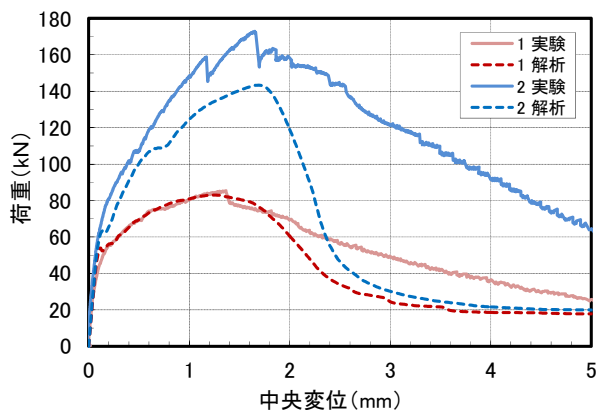


図-21 荷重-中央変位関係
(100×100×400・A方向載荷)

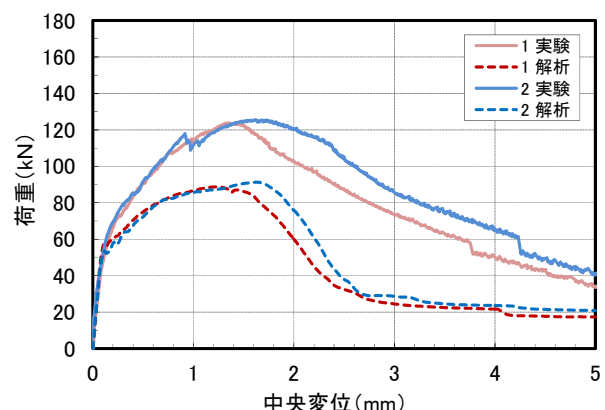


図-22 荷重-中央変位関係
(100×100×400・B方向載荷)

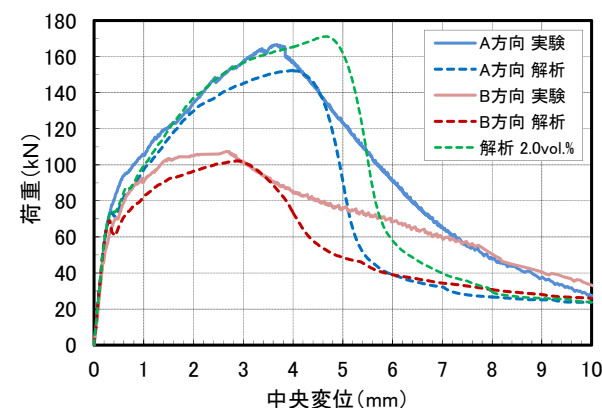


図-23 荷重-中央変位関係
(100×200×1200)

6. おわりに

繊維配向の影響を確認するため梁部材を作製し、層ごとに分割した試験体の曲げ実験および繊維量を考慮した解析を実施し、以下のことを確認した。

- ・下面に近いほど部材軸方向の引張強度が高い。
- ・部材の高さ方向にはほぼ比例して部材軸方向の引張強度は低くなる。
- ・上面は、上面直下よりも引張強度が高い。
- ・繊維配向を考慮した非線形 FEM 解析により実験をおおむね再現することができる。

なお、本検討では、実験結果のフィッティングにより、

繊維の応力-ひずみ特性および繊維量を仮定したが、繊維の引抜き応力と引抜き量の関係や実部材の繊維配向を把握することができれば、繊維配向を解析に反映させることにより、耐力の推定精度が向上すると考えられる。また、繊維を1方向のみの考慮ではなく、2次元、3次元での適用、異なる部材高さで比較することや、高さ方向の整理方法についても今後さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 周波, Ha Duy Nhi, 内田裕市: 超高強度繊維補強コンクリート曲げ供試体中の繊維の配向, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.268-273, 2012
- 2) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー, 第113号, 2004
- 3) 小倉大季, 国枝稔, 上田尚史, 中村光: メゾスケール解析による短繊維補強セメント系複合材料の力学特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.309-314, 2007
- 4) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書, 技術推進ライブラリー, No.10, 2012