

短繊維補強コンクリートの構造性能推定に関する研究

佐々木 一成 野村 敏雄

Structural Performance Evaluation of Short Fiber Reinforced Concrete

Kazunari Sasaki Toshio Nomura

Abstract

Ultra-high-strength fiber reinforced concrete such as SLIM-Crete[®] has a high self-filling property. Therefore, the direction of the fiber is influenced by the direction of casting flow, and the bending strength varies depending on the casting method. In this study, a method to estimate the bending performance, using flow analysis to estimate fiber orientation and performing structural analysis based on fiber orientation, was investigated. We found that fiber orientation estimated by flow analysis is equivalent to data obtained from an X-ray photographed image. Bending strength estimated by structural analysis based on fiber orientation is equivalent to bending strength as confirmed by a load test.

概 要

短繊維補強コンクリートの引張強度は、混入している繊維の向き(配向)の影響を受ける。スリムクリート[®]をはじめとした超高強度繊維補強コンクリートは流動性が高いことから、繊維の向きは打込み時の流動方向が影響し、部材の曲げ耐力に影響する。耐力を把握するためには、実大部材を製作して載荷実験を実施する、または、部材を切り出して引張強度を確認する必要がある。そこで、部材の構造性能を解析的に推定する手法として、流動解析により繊維配向を推定し、その繊維配向を考慮した構造解析を実施することにより、部材の曲げ性能を推定する手法を検討した。本検討では、X線撮影した梁部材の画像から得られた繊維配向と流動解析による推定が同等であること、梁部材の曲げ載荷実験結果と繊維配向を考慮した構造解析結果が同等であることを確認した。これにより、実験をしなくとも解析的に短繊維補強コンクリートの曲げ性能を推定できることが示された。

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)は、鋼繊維を体積比で2%混入することにより、鉄筋を用いなくても引張に抵抗することができる特長がある一方、繊維配向が構造性能に大きく影響する。また、UFCは通常のコンクリートと比べて流動性が高く、繊維の向きは打込み時の材料の流動方向の影響を受ける。このことからUFCの構造性能は打込み方法により異なる。現状においてUFCの設計は土木学会から発刊されている「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」¹⁾(以下、UFC指針)に準拠している。この指針では、配向の影響を適切に考慮した材料係数を用いることで十分な安全性を確保している。しかし、実際の耐力を把握するためには、あらかじめ実大部材を製作して載荷実験を実施したり²⁾、実大部材を切り出して要素の引張強度を確認したりする必要があった。特に大林組と宇部興産で開発したUFC「スリムクリート[®]」³⁾は一般的なUFCと異なり、常温で強度発現し、場所打ちが可能であることから、現場で打込んだ構造物の性能把握が品質を確保する上で重要である。

短繊維補強コンクリートの構造性能推定に関連する既往の研究として、個別要素法による流動解析により繊維

配向の推定する手法が研究されている⁴⁾。また、剛体ばねモデルにより繊維1本1本をモデル化した構造解析による破壊挙動の推定手法も研究されている⁵⁾。しかし、いずれのモデルにおいても繊維1本1本をモデル化する必要がある、UFCのように繊維の本数が多い材料への適用は難しいと考えられる。

そこで、本研究では、UFCの梁部材を対象として繊維の向きを解析的に推定し、その繊維の向きを考慮した構造解析を実施することにより、部材の曲げ性能を推定する手法を検討した。同じ方法により作製した梁部材であっても載荷する方向によって曲げ耐力が異なることが既往の研究⁶⁾からわかっており、載荷方向の違いによる曲げ耐力の違いを解析的に再現することを試みた。

はじめに、実部材の性状を把握するため、梁部材を曲げ載荷実験用に2体、X線撮影用に1体作製し、曲げ載荷実験により、曲げの力学的性状、X線撮影により、繊維配向を把握した。次に繊維配向を解析的に推定するため流動解析を実施し、繊維配向推定の妥当性をX線撮影結果と比較することにより検証した。その後、梁部材の曲げ性状を解析的に推定するため、流動解析から得られた繊維配向情報を考慮したFEM解析を実施し、妥当性を載荷実験結果と比較することにより検証した。

2. 梁部材の曲げ载荷実験

2.1 使用材料

使用したスリムクリートの配合を Table 1 に示す。スリムクリートの設計基準強度は圧縮強度 180N/mm^2 、引張強度 8.8N/mm^2 であり、この強度を 20°C の標準養生28日で発現する材料である³⁾。補強用短繊維として直径 0.16mm 、長さ 13mm 、引張強度 2700N/mm^2 の鋼繊維を $2\text{vol.}\%$ 混入している。打込み時のモルタルフローは 285mm であった。打込み後5日間封緘養生した後、気中養生し、材齢36日で実験を行った。実験時の強度特性を Table 2 に示す。圧縮強度は JIS A 1108:2006、引張強度は JCI-S-001-2003、曲げ強度は JSCE-G 552-2010、ヤング係数は JIS A 1149:2010 に従って求めた値である。

2.2 試験体

実験に使用した試験体の概略を Fig. 1 に示す。試験体の寸法は長さ 1200mm 、幅 100mm 、高さ 200mm とし、型枠の端から1方向にスリムクリートを流し込んで作製した。作製状況を Photo 1 に示す。なお、1体の打込みに 100 秒程度要した。

2.3 载荷および計測方法

载荷条件を Fig. 2、载荷状況を Photo 2 に示す。载荷スパン 150mm 、支点スパン 800mm の4点曲げ载荷とした。試験体の载荷方向は打込み位置が上となる载荷をA方向载荷、反転して打込み位置が下となる载荷をB方向载荷とする。 3000kN アムスラーにより载荷し、ロードセルにより载荷荷重、変位計により中央および支点の変位を計測し、中央の絶対変位から支点の絶対変位を減じて中央変位を計算した。

2.4 実験結果

载荷荷重—中央変位関係を Fig. 3、最大荷重時のひび割れ発生状況を Photo 3、载荷終了後の試験体を Photo 4 に示す。

A方向载荷、B方向载荷で初期剛性に差はみられず、曲げひび割れ発生荷重はいずれも 50kN 程度で大きな差は見られなかった。最大荷重はA方向载荷で 145kN 、B方向载荷で 113kN であった。同様の方法で作製した梁であっても载荷する方向により曲げ耐力に3割程度の差が見られた。いずれも Photo 3 のように下面に複数のひび割れが発生し、最大荷重到達後、複数発生したひび割れのうち、Photo 4 のように1本のひび割れの幅が拡大して荷重が低下した。

なお、UFC指針に従って、材料強度には設計基準強度を用い、ファイバーモデルにより計算した荷重—中央変位関係を Fig. 3 にあわせて示している。耐力が低いB方向载荷であっても設計曲げ耐力は満足している。

3. X線撮影による繊維配向の把握と定量化

混入している短繊維の配向(向きや分布)を確認するため、試験体を Fig. 4 に示すように切断してX線撮影を行っ

Table 1 スリムクリートの配合
Mix Proportion of SLIM-Crete

単位量(kg/m^3)				膨張材 (kg/m^3)
水	粉体	骨材	減水剤	
230	1830	330	32	20

Table 2 実験に使用したスリムクリートの特性
Material Properties

圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)	ポアソン 比
183	11.0	36.2	4.54×10^4	0.23

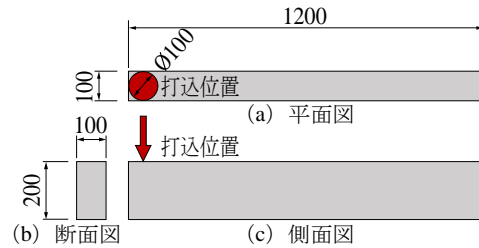


Fig. 1 試験体概要
Summary of Specimen



(a) 打込み開始後20秒 (b) 打込み開始後70秒
(矢印はスリムクリートの到達位置を示す)

Photo 1 試験体製作状況
Production of Specimen

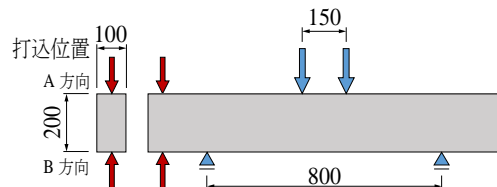


Fig. 2 载荷条件
Setup of Loading Test



Photo 2 試験体载荷状況
Loading Test

た。そして、撮影した画像を処理して繊維の角度を定量化した。

3.1 X線撮影

3.1.1 試験体 撮影対象は2章に示した試験体と同様の方法で作製した梁とし、撮影できる寸法に切断した。切断位置をFig. 4に示す。撮影対象は9体とした。撮影する分割試験体の厚さが20mmとなるように幅方向に5等分し、流動方向に対して左右対称で同じ配向になっていると仮定して、外面から中央までのL1, L2, Cを撮影対象とした。

3.1.2 使用機器 撮影にはX線透視検査装置を用いた。X線透視検査装置の概要をPhoto 5に示す。この装置には小焦点X線管が採用されており、そこからX線が照射されて試験体を通過し、CCDカメラにより入射X線が可視像に変換される。

3.1.3 撮影方法 分割試験体1体を10回に分けて撮影した。10枚に分割された画像に対して画像解析ソフト(Image-Pro Analyzer[®])を用いて、画像内の繊維を鮮明化させる処理を施し、1枚に結合することで鋼繊維分布を画像化した。

3.1.4 撮影結果 X線画像の一例をPhoto 6に、試験体側面をX線撮影した画像をPhoto 7に示す。

Photo 6に示すように鋼繊維が黒い線として映し出されており、繊維の向きを定性的に見ることができる。Photo 7の試験体中心に位置するFC, MC, RCの画像から、繊維はスリムクリートを流し込んだFC付近では渦を巻いており、全体的に底面では水平方向(部材軸方向)、表面に近づくにつれて鉛直方向に向いていることがわかる。打込みの始点では流れが乱れ、終点では型枠によって流れが遮られると考えられ、材料の流れが繊維の配向に影響したものと考えられる。

3.2 X線画像のデジタル画像処理と配向性の推定

3.2.1 X線画像のデジタル画像処理方法 本実験で用いた鋼繊維は直径0.16mm、長さ13mmと、一般的な鋼繊維補強コンクリートに使用される鋼繊維(例えば直径0.4mm、長さ30mm程度)と比べて非常に細く短いもので1本1本の繊維を確認し繊維配向として定量化することは難しい。しかし、Photo 6に示したように、撮影したX線画像をみると鋼繊維の配向が観察される。このことから、二値化処理の考えに基づいて、輝度の大きさから鋼繊維と見なすことができるオブジェクトに注目することで繊維配向をマクロに定量化することとした。分割領域は、Fig. 5に示すように、1体の分割試験体に対し、縦10(10×150 pixel=1500 pixel)、横20(20×145 pixel=2900 pixel)の計200領域とした。

繊維配向性定量化フローをFig. 6に示す。はじめに、画像解析ソフトを用いてオブジェクトの持つ面積、角度のデータを抽出した。次に、10°毎のそれぞれの角度(10~20°, 20~30°, …170~180°)を持つオブジェクトの

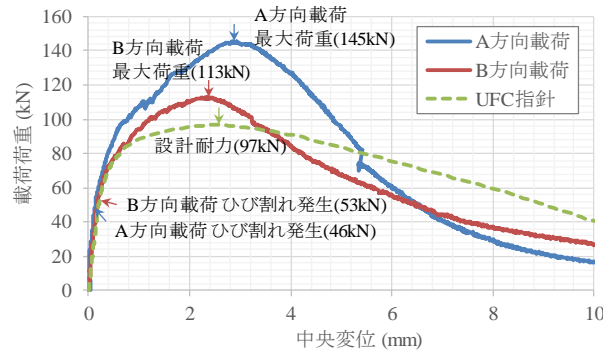


Fig. 3 載荷荷重-中央変位関係
Load - Displacement Relationship

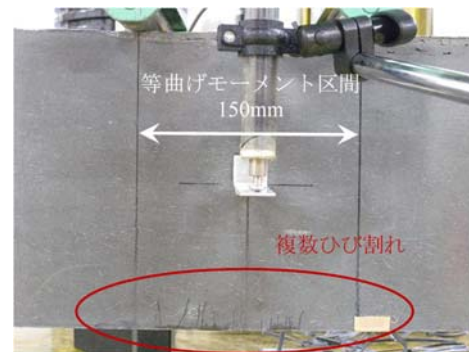


Photo 3 ひび割れ発生状況(A方向載荷 最大荷重時)
Crack at Maximum Load



(a) A方向載荷



(b) B方向載荷

Photo 4 載荷終了後の試験体(矢印は打込み位置)
Specimens of After Loading Test

面積の合計($A_{10}, A_{20}, \dots, A_{180}$)を求める。そして、最も面積が大きいときの角度を領域の配向を決定する支配的なオブジェクトと考え、繊維配向性として、角度の平均値(15°, 25°, …175°)を矢印として表した。しかし、領域内の繊維の向きは、必ずしも一方向に定まるものではない。そのため、X線画像から視覚的に捉えうる繊維配向性が、X線画像解析の際に反映される値として、2番目に面積が大きいものが最大の面積の8割以上ある場合には2本目の矢印、3番目に面積が大きいものが最大の面積の6割以上ある場合には3本の矢印で示すことにした。

3.2.2 X線画像を用いた鋼繊維の配向性の推定 繊維配向性定量化結果をFig. 7に示す。Photo 7で視覚的に確認できた繊維配向が矢印として表されている。型枠面に接しているFL1~RL1では繊維が比較的部材軸方向に向

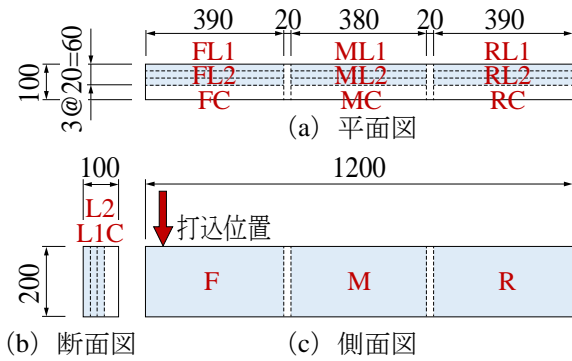


Fig. 4 試験体切断位置
Cutting Position of Specimen



Photo 5 X線撮影装置
X-ray Imaging Equipment

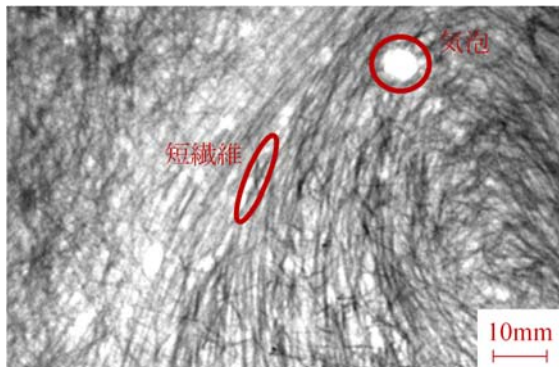


Photo 6 X線撮影された短繊維
X-ray Image of Fibers

いており、中心(FC~RC)では、渦をまいた配向や表面に近づくにつれて鉛直方向に向いている様子が定量的に示されており、定量化はおおむね妥当であると考えられる。

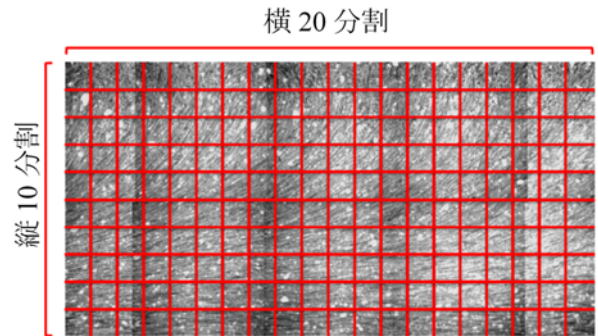


Fig. 5 画像の分割
Divide of Image

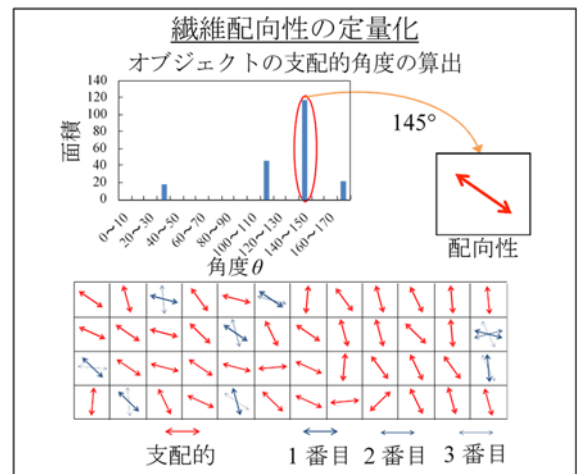
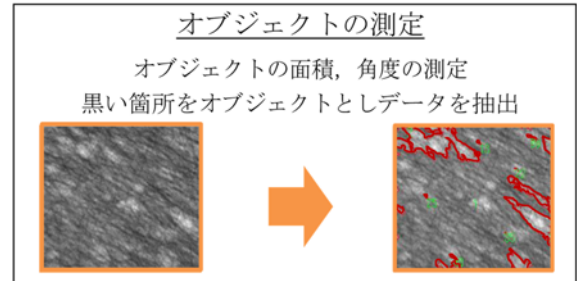
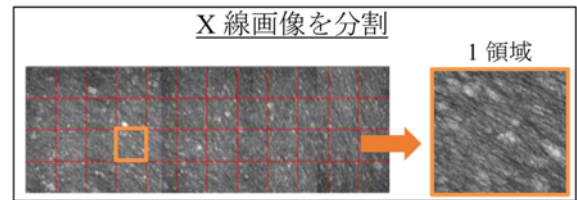


Fig. 6 繊維配向の定量化フロー
Flow of Quantification

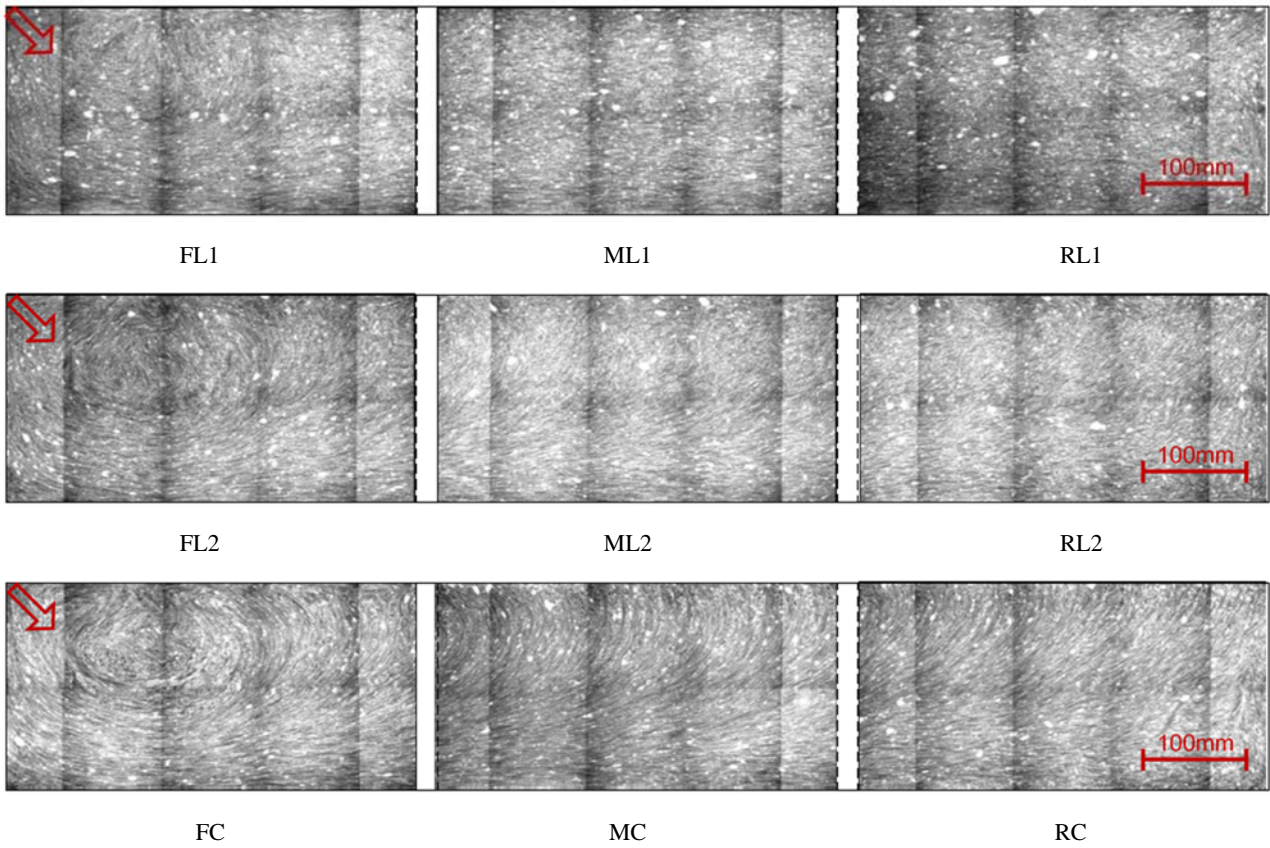


Photo 7 試験体のX線画像(矢印は打込み位置を示す)
X-ray Image of Specimens

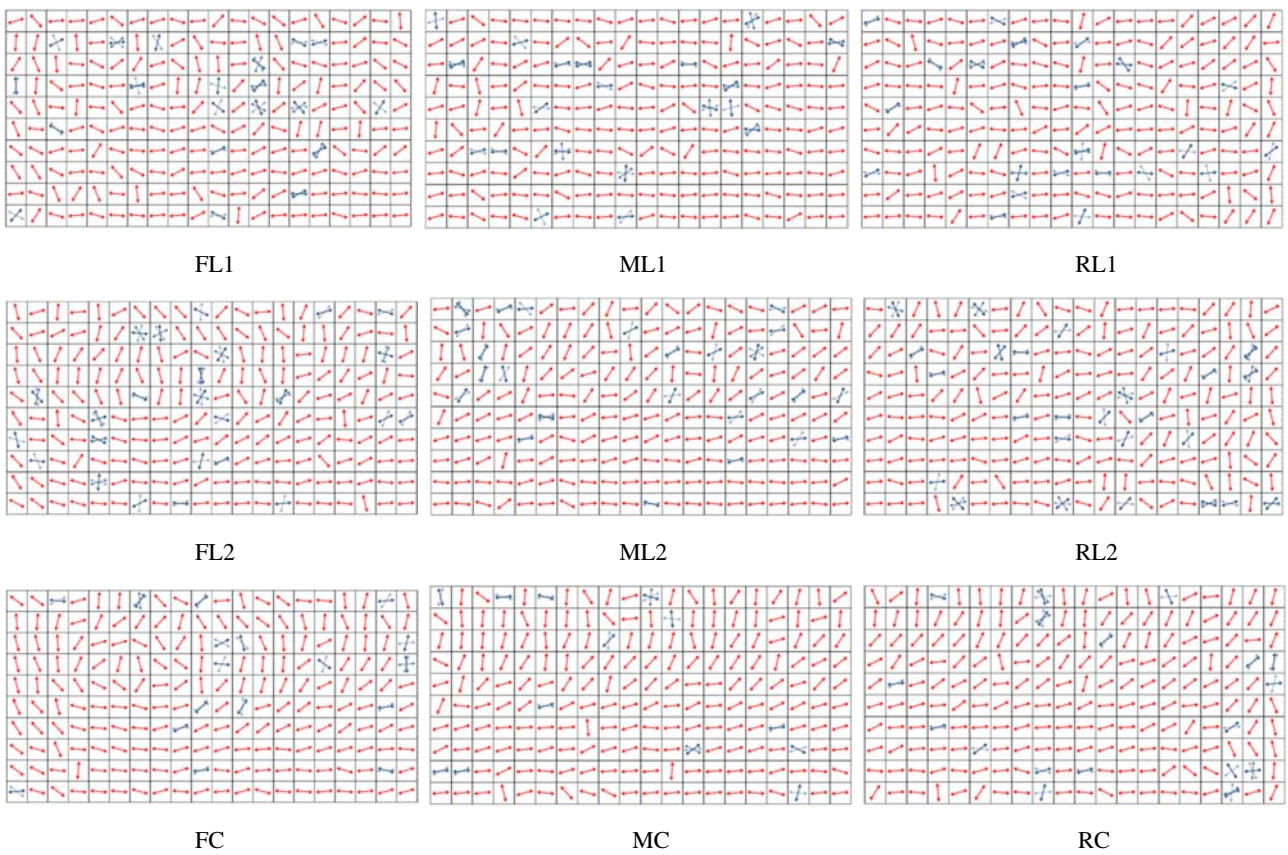


Fig. 7 繊維配向の定量化
Quantification of Fibers Direction

4. 流動解析による繊維配向の再現

4.1 解析方法

解析にはMoldex3D[®]を使用した。Moldex3Dは樹脂製部品を成形する際の繊維配向解析などに使用されており、基本的には射出成形に特化したシミュレーションソフトである。自己充填性が高く、打込み時に材料が流れるUFCは、繊維を混入した樹脂に近いことから、流動解析を用いてUFCの繊維配向の再現を試みた。このソフトは流れ場を表すNavier-Stokes方程式を3次元モデルとして扱っており、樹脂流動解析の結果得られる各タイムステップにおける流れ場(速度場)の情報をもとに、局所的な繊維配向が計算されている⁷⁾。この計算には繊維配向計算モデルであるiARD-RPR (Improved Anisotropic Rotary Diffusion-Retarding Principal Rate)モデル⁸⁾が適用されている。他の繊維配向計算モデルと比べてパラメータ数が3つ(繊維間の相互作用, 繊維-樹脂間の相互作用, 樹脂成分の影響)と少なく、計算安定性に優れている点の特徴である。

4.2 解析条件

解析モデルをFig. 8に示す。実験と同様に100 ×200 ×1200mmの型枠の端から直径100mmの投入口に材料を流し込む条件とした。材料の粘度は、練り上がり直後のスリムクリートの粘度を、レオストレスメーターを用いて計測した結果を参考に70Pa・sとした。

4.3 解析結果

解析により得られた繊維配向のコンターをFig. 9～11に示す。なお、ここでは部材軸方向:x, 部材軸直角方向:y, 鉛直方向:zとする。

コンターの大きさは各方向に向いている繊維の割合(以下、配向比率)を示しており、各要素3方向の配向比率を足すと1になる。x方向:0.048～0.863, y方向:0.057～0.703, z方向:0.041～0.803で分布している。

Fig. 9～11から、全体的に繊維がx方向に向いている割合が高いことがわかる。底面付近はx方向に繊維が向いている割合が0.8程度と高く、上面に近いほどz方向に向いている。y方向に向いている割合は全体的に低く0.2程度である。z方向については終点部付近では割合が0.7程度と高くなっており、終点部上面付近でy方向の割合も高くなっている。

4.4 X線画像解析結果との比較

流動解析およびX線画像解析による繊維配向を比較するため、梁中心のx方向の配向比率についてFig. 4に示す始点部(FL1, FL2, FC),中間部(ML1, ML2, MC),終点部(RL1, RL2, RC)における高さ方向10層のそれぞれの配向比率を平均して傾向を比較した。

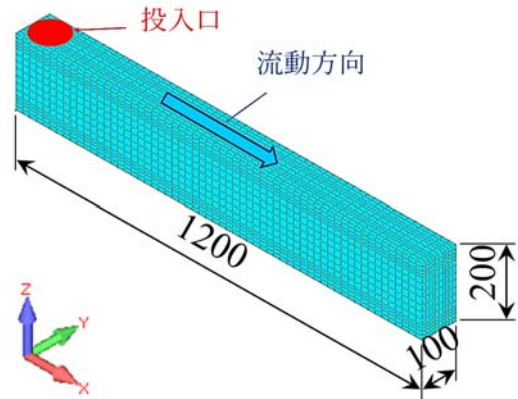


Fig. 8 流動解析モデル
Flow Analysis Model

X線画像解析から得られた繊維の配向は3章に示す方法で要素ごとに角度で整理しており、x方向に向いている配向比率を、x方向に対する繊維配向の角度 θ から、繊維がx方向に抵抗する分力($\cos\theta$)と繊維量($\cos\theta$)を考慮し⁹⁾、下式により計算した。

$$A_{11} = \cos^2\theta \quad (1)$$

A_{11} : x方向の配向の大きさ

θ : 繊維がx軸となす角度

なお、X線画像は2次元であり、y方向の配向比率は定量化できない。ここでは、1方向に流動させたUFC製の薄板において、流動方向と直角方向の配向比率が4:1とみなすことができたという既往の研究結果⁹⁾を参考に、上記の式から得られた値に一律4/5を乗じた値をx方向の配向比率として比較した。

流動解析から得られた繊維の配向は、X線画像解析の定量化と同じ分割でそれぞれ平均して、配向の大きさを計算した。梁の底面からの距離と配向の大きさの分布をFig. 12～14に示す。

始点部から中間部にかけて梁の下半分で流動解析の結果とX線画像解析による結果に大きな差はみられず差異は5～10%程度である。一方、梁の上半分では部材軸方向の配向比率が小さくなる傾向は同じであるものの、差異が大きく、流動解析結果はX線画像解析結果に比べて20～50%程度大きい。

終点部においては底面でも配向の大きさが小さいなど、流動解析結果はX線画像解析結果と同じ傾向が示されている。

流動解析結果は底面でのx方向への配向など定性的に再現できており、定量化した結果による比較においても底面でx方向に配向し、打込み面に近づくにつれてその度合いが小さくなっていることを再現していることが確認された。ただし、梁の上半分では差異が大きくなっているが、流れが一樣ではなく複雑で、ばらつきが大きくなるためと考えられる。

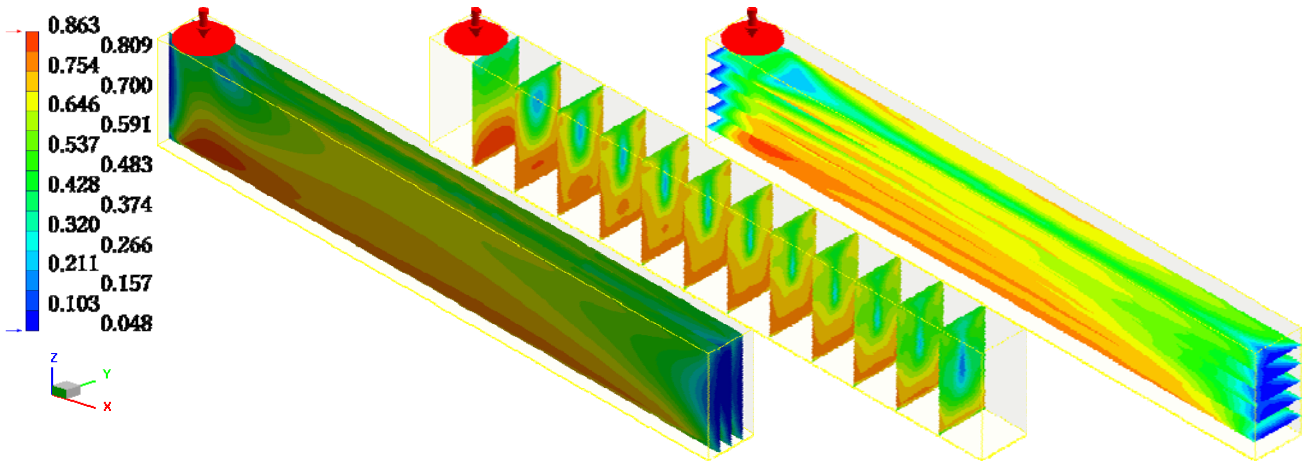


Fig. 9 x方向の繊維配向分布
Fiber Orientation Distribution in x Direction

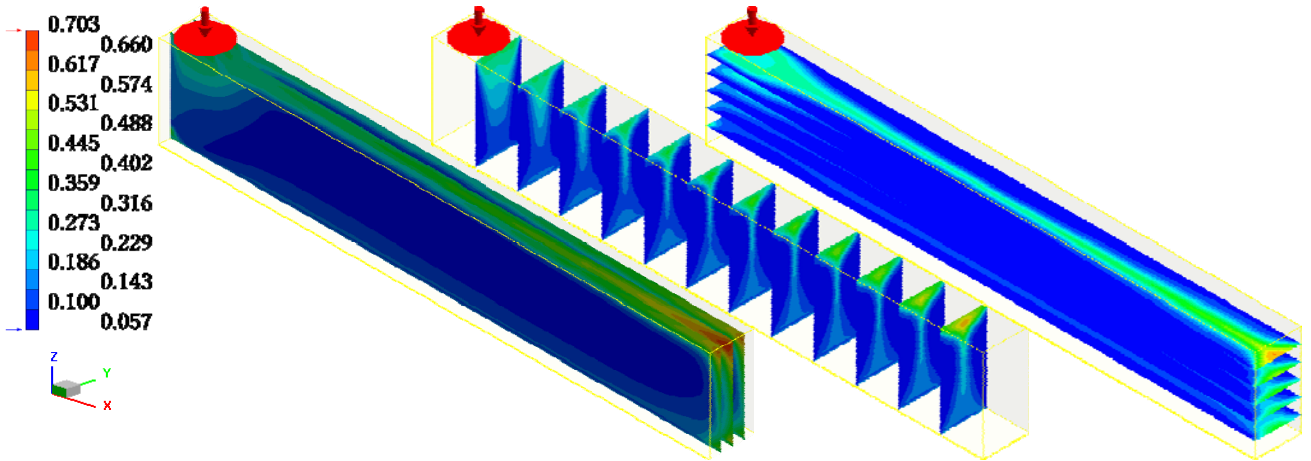


Fig. 10 y方向の配向分布
Fiber Orientation Distribution in y Direction

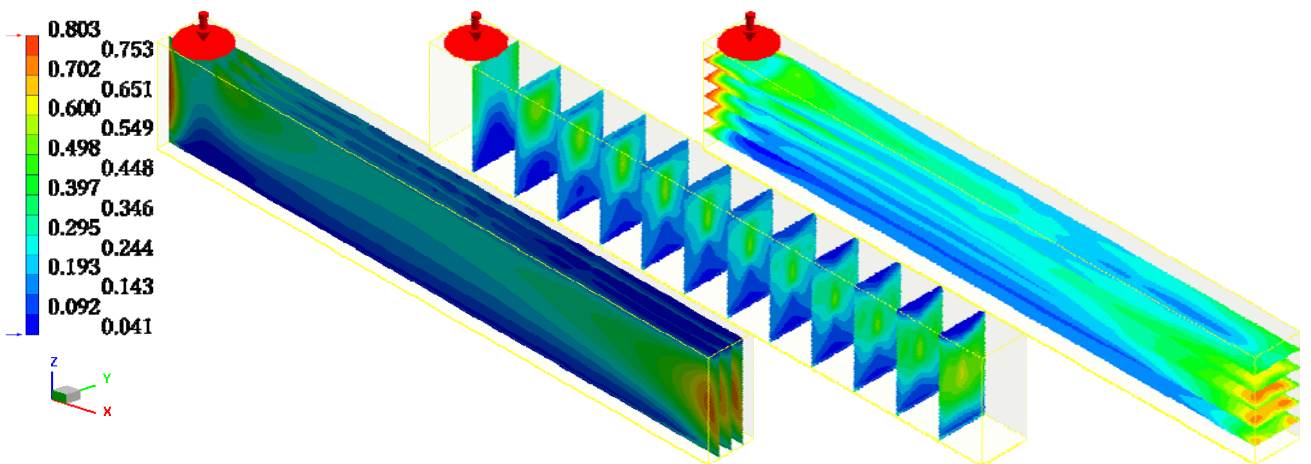


Fig. 11 z方向の配向分布
Fiber Orientation Distribution in z Direction

5. 繊維配向を考慮した構造解析

はじめにX線画像解析から得られた配向情報を利用した構造解析を2次元の簡略化したモデルにより実施し、流動解析から得られた配向情報による結果と比較した。次に流動解析から得られる3次元の配向情報を利用した3次元の構造解析を実施し、その精度を確認した。

5.1 配向情報の違いによる結果の比較

5.1.1 解析方法 解析にはコンクリートを対象とした非線形FEM解析ソフトFinal[®]を使用した。

一般的に繊維補強コンクリートの構造解析において繊維の架橋による引張特性はコンクリートの引張応力-ひずみ関係として設定して計算する。この方法で繊維配向の影響を考慮するためには要素ごとに繊維の向きに応じた応力-ひずみ関係を求めて異方性を持たせて与える必要があり計算が煩雑となる。そこで、各方向に向いている繊維量を各要素の埋込み鉄筋量として設定することにより、繊維による引張特性を考慮することを検討した。

埋込み鉄筋に定義した引張応力-ひずみ関係をFig. 15に示す。実験に使用している繊維は2700N/mm²と高強度であり、破壊時に繊維が破断することはなく、マトリックスから抜出す挙動を示す。この抜出しの挙動を埋込み鉄筋の引張応力-ひずみ関係として仮定した。仮定にあたってはスリムクリートの曲げ載荷実験結果に解析結果をフィッティングすることにより求めた既往の研究⁹⁾を参考にした。なお、ヤング係数は $2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とした。

埋込み鉄筋量は要素の各方向の繊維配向比率に繊維混入率を乗じた量となる。本検討では部材が単純な形状であり繊維の偏りは生じにくいと考えられることから、均等に分散されているものとして、要素の場所に寄らず一律に繊維混入率2.0vol.%を乗じることとした。

コンクリートの構成則について、引張側はひび割れまで線形を仮定し、ひび割れ後は出雲モデル¹⁰⁾により引張軟化特性を考慮した。圧縮側は修正Ahmadモデル¹¹⁾を用いた。コンクリートの圧縮強度、ヤング係数は今回実施したTable 2に示す材料試験結果、引張強度はスリムクリートの既往のデータ³⁾よりひび割れ発生強度の平均値 9.4 N/mm^2 とした。

構造解析に用いたメッシュをFig. 16に示す。モデルを簡略化するため対称モデルとし、要素数はx方向48分割、z方向20分割の計960要素とした。埋込み鉄筋量は4.4節で平均化した中間部のx方向の配向比率に繊維混入率2.0vol.%を乗じた値を10層に分けてx方向にのみ設定した。設定した繊維量をTable 3に示す。

5.1.2 解析結果 解析から得られた載荷荷重-中央変位関係をFig. 17, 18に示す。なお、流動解析から得られた配向情報を利用した構造解析を解析(a)、X線画像解析から得られた配向情報を利用した構造解析を解析(b)とする。

A方向載荷では解析(a)、解析(b)、いずれも最大荷重に

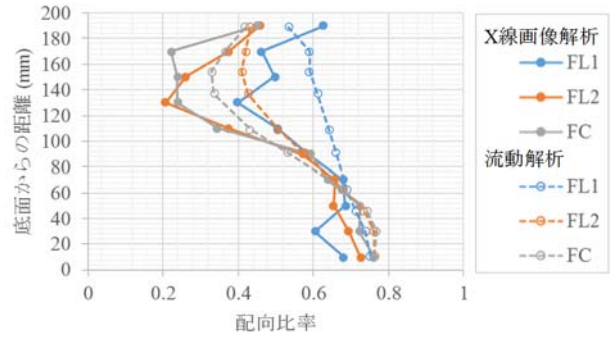


Fig. 12 始点部における繊維配向分布の比較
Fiber Orientation Distribution in the Starting Part

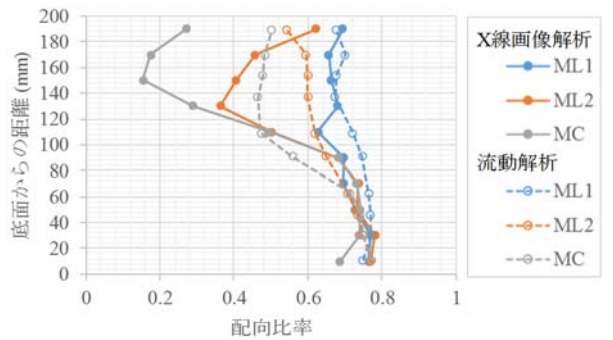


Fig. 13 中間部における繊維配向分布の比較
Fiber Orientation Distribution in the Middle Part

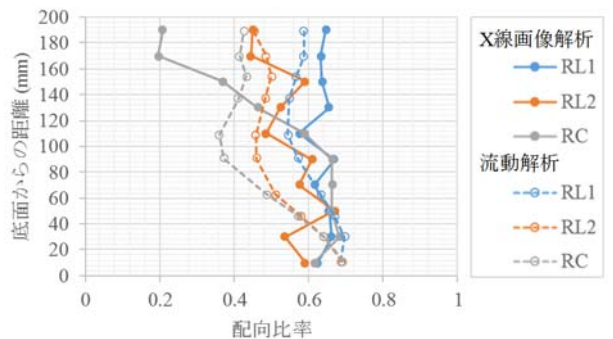


Fig. 14 終点部における繊維配向分布の比較
Fiber Orientation Distribution in the End Part

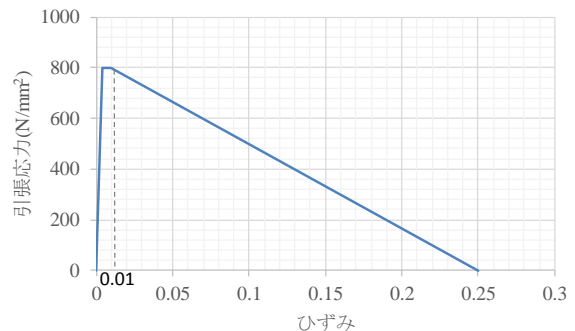


Fig. 15 埋込み鉄筋に定義した引張応力-ひずみ関係
Tensile Stress - Strain Relationship for Fiber

おける実験結果との差異が2%程度であり、初期剛性から最大荷重、軟化域までおおむね再現できている。4章に示したようにA方向荷重で引張側となる底面付近でX線画像解析および流動解析から得られた繊維配向に大きな差が見られなかったため、両者の差もみられなかったと考えられる。

B方向荷重では解析(b)が実験結果に比較的近い結果となり、最大荷重の差異は5%程度であった。一方、解析(a)は実験結果に対して14%ほど高い結果となった。X線画像解析、流動解析いずれも梁の上半分におけるx方向の配向比率が小さくなり、表層で若干大きくなる現象が確認されていた。しかし、梁の上半分の領域において流動解析による配向比率はX線画像解析による配向比率と比べて2割程度高かったため、構造解析において最大荷重が高い結果になったと考えられる。

5.2 流動解析による3次元の繊維配向を考慮した解析

5.2.1 解析方法

流動解析ではx, y, z方向の配向比率が得られることから、構造解析にもその繊維配向情報を反映するために3次元のFEM解析を実施した。解析に用いたソフトおよび材料構成則は5.1節と同様とした。解析モデルをFig. 19に示す。要素数はx方向60分割、y方向10分割、z方向15分割の計9000要素とした。ただし、要素タイプは解析上、各要素に設定できる数に制限があるため、x方向6分割、y方向分割なし、z方向15分割の計90種類とし、各範囲における要素の配向比率をx, y, z方向ごとにそれぞれ平均した値を用いた。

5.2.2 解析結果

解析から得られた荷重荷重-中央変位関係をFig. 20に、ひび割れ分布をFig. 21, 22に示す。配向情報をより細かく3次元に反映したが、荷重荷重-中央変位関係に5.1節の結果と大きな差はみられなかった。本検討は曲げ引張破壊する梁が対象で、x方向の引張特性の影響が大きく、2次元の簡易なモデルとの差があらわれなかったものと考えられる。ひび割れ性状は、最大荷重までひび割れが複数発生し、最大荷重後に複数あるひび割れのうちの1本のひび割れ幅が広がるといった実現象が再現できていると考えられる。本検討では解析の都合上要素の種類を90種類としたが、要素ごとに配向比率が反映できれば、より弱いところから損傷が進むため曲げ耐力は小さく計算される傾向になると考えられる。

6. まとめ

スリムクリートを用いた梁部材を対象に流動解析から繊維の配向を予測し、繊維配向を考慮した構造解析により部材の構造性能を予測する手法を検討した。その結果、以下のことが確認された。

- ・ 梁の底面では部材軸方向、上面に近づくにつれて鉛直方向に向くといった繊維配向が流動解析により再現できた。このことから流動解析によりUFCの繊維配向を推定することが可能である。

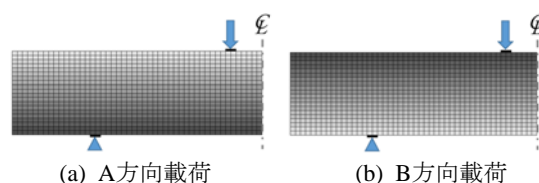


Fig. 16 構造解析モデル
Finite Element Mesh for Specimen

Table 3 各層に設定した繊維量(%)
The Fiber Amount Set for Each Layer

要素	X線画像解析	流動解析
■	1.16	1.18
■	0.96	1.23
■	0.92	1.21
■	0.95	1.20
■	1.10	1.26
■	1.38	1.34
■	1.44	1.46
■	1.46	1.50
■	1.53	1.51
■	1.50	1.52

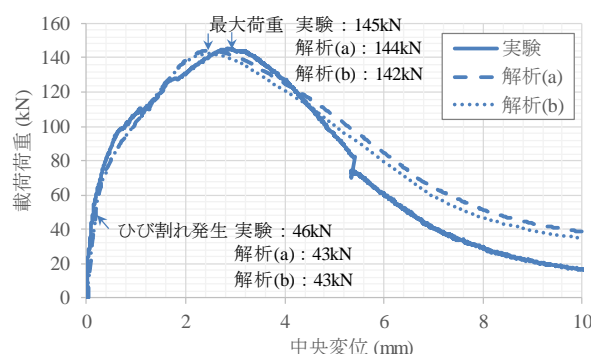


Fig. 17 荷重荷重-中央変位関係(A方向荷重)
Load-Displacement Relationship (A)

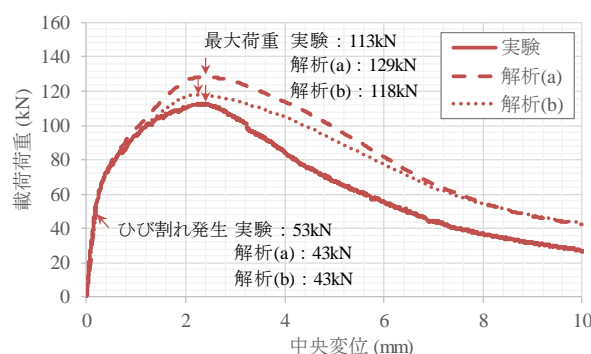


Fig. 18 荷重荷重-中央変位関係(B方向荷重)
Load-Displacement Relationship (B)

- ・ 繊維が負担する引張特性を埋込み鉄筋として非線形FEM解析に考慮することにより、繊維配向の影響を考慮した構造解析が可能である。これにより実際に近い耐力の推定が可能となる。今回検討した流動解析と構造解析は、あらかじめ品

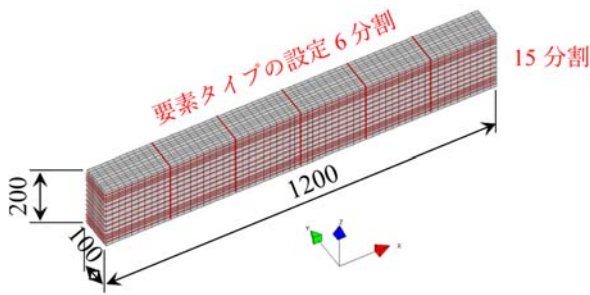


Fig. 19 3次元モデル
Finite Element Mesh for Specimen

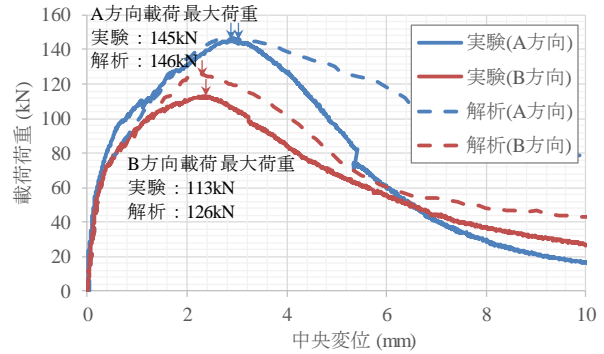


Fig. 20 3次元モデルによる載荷荷重-中央変位関係
Load-Displacement Relationship

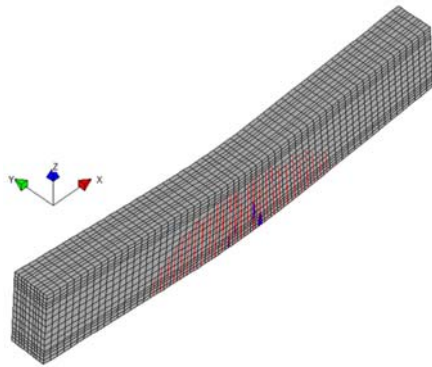


Fig. 21 ひび割れ分布(A方向載荷-中央変位3mm)
Crack Distribution (A)

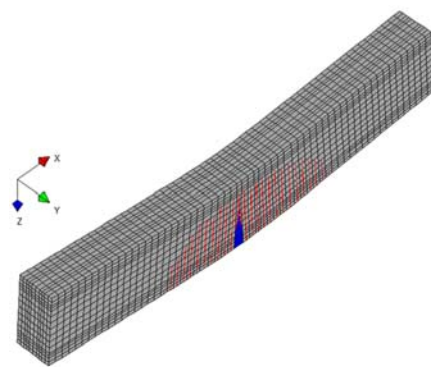


Fig. 22 ひび割れ分布(B方向載荷-中央変位3mm)
Crack Distribution (B)

質が低下しそうな場所を解析的に特定し、対策することができれば、より均等な品質を確保することができる技術である。載荷実験により実施していた品質確認を解析的に実施することによりコストの低減を見込むこともできる。

謝辞

X線撮影による繊維配向の可視化および定量化にあたっては早稲田大学秋山研究室の皆様にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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113, 2004.9
- 2) 一宮利通, 他：超高強度繊維補強コンクリートを用いた床板の打設方法が構造性能に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 1453-1458, 2008.7
- 3) 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, 2012.3
- 4) 加藤勝秀, 他：3次元個別要素法による短繊維補強材料の流動解析モデルの構築, コンクリート工学年次

- 論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1228-1233, 2012.7
- 5) 国枝稔, 他：短繊維を離散化した3次元メソスケール解析手法によるひずみ硬化型モルタルの引張破壊解析, 土木学会論文集E, Vol. 66, No. 2, pp. 193-206, 2010.3
- 6) 佐々木一成, 他：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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 1309-1314, 2016.7
- 7) 株式会社JSOL エンジニアリング本部：長繊維を用いた樹脂パーツ開発におけるシミュレーション技術, Polyfile, Vol. 49, No. 575, pp. 31-35, 2012.1
- 8) Peter H. Foss, et al. : Prediction of Fiber Orientation Distribution in Injection Molded Parts Using Moldex3D Simulation, Polymer Composites, 2014.4
- 9) 佐々木一成, 他：UFCの繊維混入率および繊維配向に着目した曲げ引張性能に関する実験的検討, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, pp.1173-1174, 2016.9
- 10) 出雲淳一, 他：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp. 107-120, 1987.9
- 11) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp.163-170, 1995.8