

# メゾスケール解析による短繊維補強コンクリートの曲げ破壊挙動の検討

清水建設 技術研究所 正会員 ○小倉 大季, 吉武 謙二  
 名古屋大学大学院 正会員 国枝 稔

## 1. はじめに

短繊維補強セメント系材料は、繊維の材質、長さ、マトリクスの特性などの組合せ次第で様々な性能の材料を開発できるが、組合せが無数に存在するため配合の最適化は難しい。このため、選択した組合せで構成された材料の引張強度や曲げタフネスを定量的に予測できる手法が必要となる。本研究では繊維の混入率や長さを変動させた短繊維補強コンクリートの曲げ試験を対象に、メゾスケール解析手法を用いて繊維の引抜き挙動の観点から破壊挙動を検討することにより、材料の高性能化を目的とした検証を試みた。

## 2. 解析手法

本研究では、解析手法として3次元剛体-バネモデル(RBSM)を用いた。図-1に要素剛性マトリクスを構成する1組のヴォロノイセルを示す。各セルの境界面に境界と垂直、平行、回転方向にばねを配置し、コンクリートの材料特性(引張強度、破壊エネルギー)を用いて垂直、平行ばねをモデル化した<sup>1)</sup>。

短繊維は、所定の長さ、径の繊維を要素中に離散的にモデル化した。繊維による補強効果は、セル境界面(ひび割れ面に相当)を跨ぐ各繊維位置に長さ0のばねを配置し(図-2)、このばねに繊維の付着特性を考慮して算出した架橋力を作用させることで表現した<sup>2)</sup>。

## 3. 実験および解析概要

本研究では、PET繊維補強コンクリートの3等分点曲げ試験を解析対象とした。実験は、短繊維の混入量を0.3、0.5と変動させて作成した100×100×400mmの供試体を用いて行った。短繊維は、繊維長45mm、繊維径0.7mm、破断強度350MPaのPET繊維である。

解析に用いたモデルを図-3に示す。ひび割れ進展の要素依存性軽減のためにヴォロノイ分割を用いてモデル化し、繊維は要素中に所定の繊維本数をランダムに分散させた。荷重は、荷重板位置の要素を変位制御することにより行った。表-1に解析に使用した材料諸元と解析ケースを示す。繊維-マトリクス間の付着特性に関する諸元は、図-4に示す単繊維引抜き試験<sup>3)</sup>の結果から同定した<sup>2)</sup>。同定した諸元を用いて行った単

繊維引抜き解析の結果を図-4の荷重-変位関係に併せて示す。埋込み長 $l$ が15mmの場合、繊維の引抜き過程で繊維破断が発生するモデルであることがわかる。

## 4. 解析結果

図-5に解析より得られた荷重-変位関係を実験結果と併せて示す。変位は、実験における計測位置と同

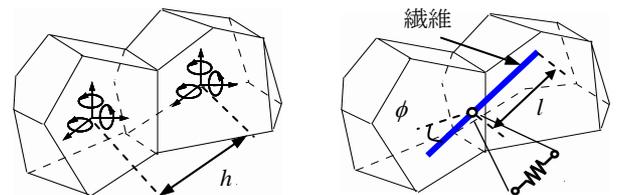


図-1 ヴォロノイセル 図-2 繊維の離散モデル

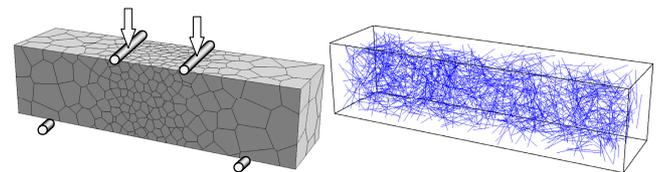


図-3 解析モデル(繊維混入率0.5%)

表-1 解析に用いたパラメータ

解析ケース		V-0	V-0.3	V-0.5
短繊維	混入率 $V_f$ (%)	0	0.3	0.5
	繊維長 $L_f$ (mm)	45		
	繊維径 $d_f$ (mm)	0.7		
	弾性係数 $E_f$ (GPa)	20		
	破断強度 $\sigma_{fu}$ (MPa)	350		
マトリクス	引張強度 $\sigma_{mu}$ (MPa)	4.1	4.4	4.2
	弾性係数 $E_m$ (GPa)	38.3	39.6	39.6
	破壊エネルギー $G_{ft}$ (N/m)	100		
繊維・マトリクス界面	摩擦付着強度 $\tau_i$ (MPa)	4.0		
	化学付着強度 $\tau_s$ (MPa)	7.0		
	付着剛性 $G$ (MPa/mm)	95		

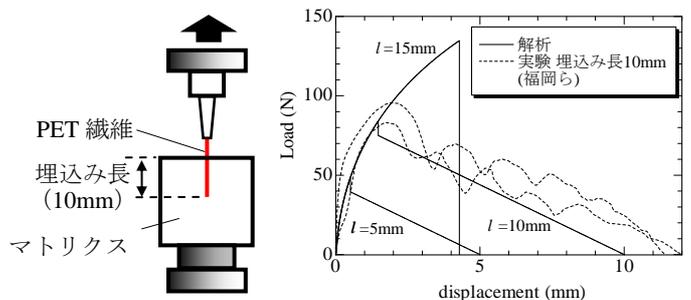


図-4 単繊維引抜き試験  
 (左: 試験概要, 右: 引抜き荷重-変位関係)

キーワード 短繊維補強コンクリート, メゾスケール解析, 剛体-バネモデル, 曲げタフネス, PET 繊維  
 連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL 03-3820-6415

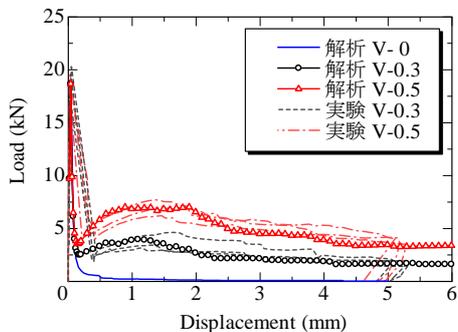
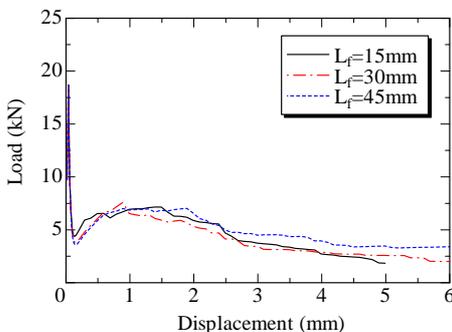
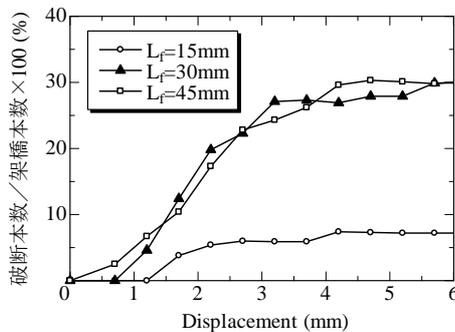


図-5 荷重-変位関係



(a) 荷重-変位関係



(b) 繊維の破断率

図-7 繊維長が曲げ挙動に及ぼす影響 ( $\sigma_{fu}=350\text{MPa}$ ,  $V_f=0.5\%$ )

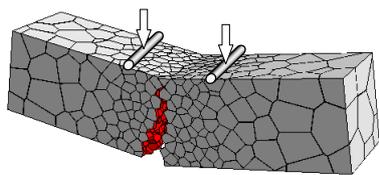
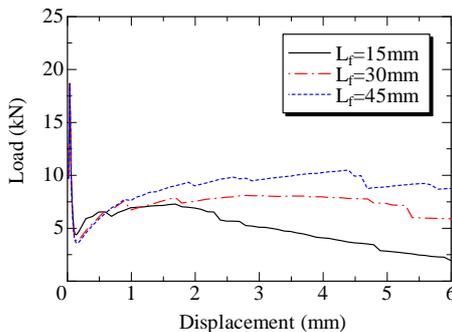
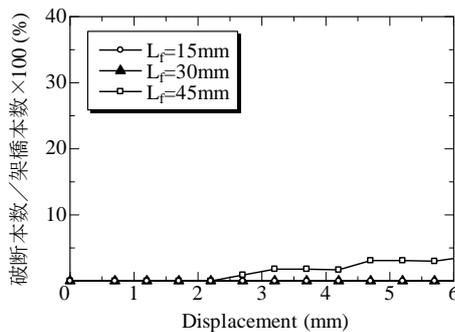


図-6 ひび割れ図  
(変位 3mm 時)



(a) 荷重-変位関係



(b) 繊維の破断率

図-8 繊維長が曲げ挙動に及ぼす影響 ( $\sigma_{fu}=700\text{MPa}$ ,  $V_f=0.5\%$ )

様に載荷点変位である。また、解析より求まったひび割れ状況を図-6に示す。解析結果は、ひび割れ発生後、繊維の架橋により荷重が再上昇する挙動が認められ、実験結果をよく再現している。

実験では混入率のみを変動させたが、ここでは短繊維による補強メカニズムをより明細に検証するため、V-0.5ケースに対して繊維長を15, 30, 45mmと変動させたパラメトリック解析を行った。図-7(a)に荷重-変位関係を示す。また、各変位におけるひび割れを架橋する繊維本数ならびに破断した繊維本数を算出し、その比率(以下、繊維破断率)をプロットしたのが図-7(b)である。図より、繊維長の違いが荷重-変位関係に与える影響は小さいものの繊維破断率の割合は大きく異なり、繊維長30mm以上の場合はひび割れを架橋する繊維のうち3割程度が変位4mm時に破断していることがわかる。これは、荷重低下のメカニズムが30mm以上の場合は繊維の破断が卓越したことによるものであるのに対し、15mmの場合は繊維の抜出しが助長したことによるものであることを示す。すなわち、繊維長30mm以上の場合、繊維強度を改善することができれば曲げタフネスをさらに向上できる余地があることを示唆するものである。

そこで、V-0.5ケースに対して繊維強度を700MPaとして解析を行った。解析結果を図-8に示す。繊維強度

350MPaと比較して、繊維長の違いによる荷重-変位関係の相違が大きく、繊維長45mmの場合に曲げタフネスは最大となる。これは、繊維強度の向上により、図-4の埋込み長15mmのように繊維の引抜き過程で破断することなく、架橋力を負担できたためである。以上のように、繊維を離散的にモデル化した本解析手法を用いることで、各繊維の引抜き挙動を把握できるなど、繊維による補強メカニズムを明細に検証でき、材料の高性能化に向けた手掛かりを得ることが可能になる。

### 5. まとめ

本論文では短繊維を離散化した3次元メゾスケール解析を用いて、短繊維補強コンクリートの曲げ破壊解析を行い、短繊維による補強メカニズムを検討した。その結果、ひび割れ進展に伴う各繊維の引抜き挙動を評価できるとともに、その評価から材料の高性能化へに向けた手掛かりを得ることができると示した。

#### 【参考文献】

- 1) Bolander, J.E. and Berton, S.: Cohesive Zone Modeling of Fracture in Irregular Lattices, Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp.989-994, 2004
- 2) 小倉大季ほか: 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報告集, Vol.29, No.1, pp.309-314, 2007
- 3) 福岡賢紀ほか: 再生PET繊維の力学特性と保護工・覆工への適用性の検討, 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol. 34, pp.507-512, 2005