

# 論文 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散解析

武田 康司\*<sup>1</sup>・松岡 茂\*<sup>1</sup>・益田 彰久\*<sup>1</sup>・土井 至朗\*<sup>1</sup>

**要旨:** 鋼繊維を混入するとRC部材に発生するひび割れが分散することが知られている。鋼繊維補強コンクリート(SFRC)のひび割れ分散効果を定量的に評価するために、SFRCの引張破壊特性をモデル化した計算を行った。その結果、SFRCの引張破壊特性である引張軟化曲線を考慮した計算モデルにより、ひび割れ分散効果を推定することが可能であることが判明した。

**キーワード:** 鋼繊維, ひび割れ分散効果, 引張軟化曲線

## 1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート(SFRC)は、曲げ靱性、ひび割れ分散性に優れた特性を示し、これらの特性は鋼繊維の引張応力伝達によりひび割れ開口抵抗性が向上することに起因することが知られている。

一方、高強度コンクリートにおいては、引張強度が相対的に小さく脆性的に破壊することが知られており、引張に対する抵抗性が小さいと乾燥収縮、鉄筋発錆に伴うひび割れなどが生じやすく耐久性上の問題となる。

そこで本研究では、SFRCの優れた特性であるひび割れ分散性を活かすために、高強度コンクリートに鋼繊維補強した梁供試体による曲げ載荷試験を行い、ひび割れ分散性について検討を行った。ここでは、SFRCの引張破壊特性を表す指標である引張軟化曲線を考慮したFEM解析により、曲げ載荷試験のシミュレーションを行い、実験結果<sup>1)</sup>との比較検討から、SFRCのひび割れ分散効果について推定した。

なお、本研究はSQC構造物開発・普及協会鋼繊維部会の研究の一環として実施したものである。

## 2. 解析概要

### 2.1 材料のモデル化

コンクリートは4節点を有する平面応力要素

とし、圧縮応力-ひずみ曲線については、図-1に示すように圧縮強度に達するまでは二次曲線タイプの応力-ひずみ曲線を用い、それ以降はひずみの増大に伴い応力を一定に保持するモデルとした。また、引張強度に達する前のひび割れが発生していない応力-ひずみ関係は、式

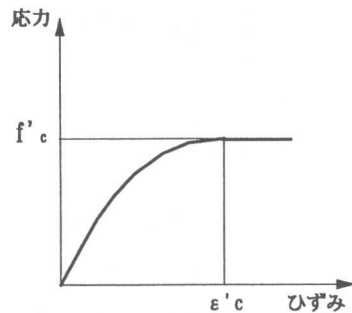


図-1 応力-ひずみ曲線

(1)の弾性係数を用いた。なお、コンクリートの圧縮強度におけるひずみ $\epsilon'_c$ は圧縮強度試験結果から定めた。

$$E_t = f'_c / 0.001 \quad (1)$$

ここに $E_t$ :引張側の弾性係数、 $f'_c$ :コンクリートの圧縮強度である。

また、引張応力によりひび割れが発生した要素におけるせん断剛性は式(2)に従うものとした。

$$G = \beta \cdot \frac{E_c}{2(1 + \nu)} \quad (2)$$

\* 1 鉄建建設(株)エンジニアリング本部技術研究所(正会員)

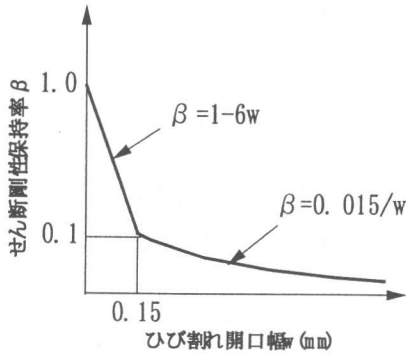


図-2 せん断剛性保持率

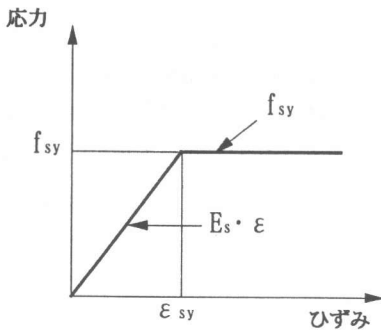


図-3 鉄筋の応力-ひずみ関係

ここに、 $G$ ：せん断剛性、 $E_c$ ：ひび割れ発生前の弾性係数、 $\beta$ ：せん断剛性保持率、 $\nu$ ：コンクリートのポアソン比である。せん断剛性保持率は、筆者ら<sup>2)</sup>が提案している図-2に示したひび割れが増加するに伴って減少する関係を用いた。

鉄筋の材料特性は、軸方向力のみを負担するトラス要素を用いて、図-3に示すように完全弾塑性体のパイリニア型とした。

## 2.2 引張軟化曲線のモデル化

### (1) プレーンコンクリートの引張軟化曲線

コンクリートの曲げ引張強度の寸法効果と引張破壊特性である引張軟化曲線とは相関があることが内田ら<sup>3)</sup>より報告されている。そこで、高強度コンクリートのひび割れ発生以後（ひび割れ先端の応力伝達）の挙動を決定することを目的に、図-4に示すように断面高さの違う4ケース（ $h=10, 15, 30, 45\text{cm}$ ）の梁の曲げ試験についてFEM解析を行った。

コンクリートの圧縮強度は、圧縮強度試験に

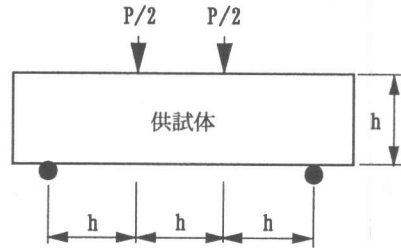


図-4 梁供試体断面図

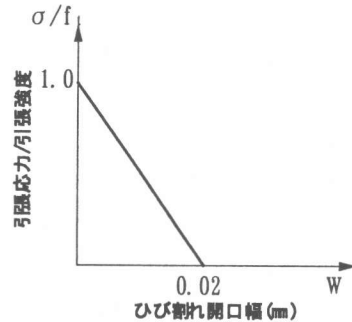


図-5 引張軟化曲線

より得られた結果を使用し、引張強度は圧縮強度から岡村の式<sup>4)</sup>(3)を用いて算出した値を用いた。

$$f_t = 0.58f_c^{2/3} \quad (\text{単位: kg/cm}^2) \quad (3)$$

コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線のモデル化については、図-1に示すように圧縮強度に達するまではコンクリート標準示方書の二次曲線タイプとし、それ以降はひずみの増大に伴い応力を一定に保持するモデルとした。また、コンクリートの引張軟化曲線については、図-5に示すように筆者ら<sup>2)</sup>がプレーンコンクリートの解析で用いている直線モデルとした。解析に必要な材料特性値を表-1に示す。

解析モデルについては、図-6に示すように供試体中央のみにひび割れが発生するものと仮定し、梁モデルの中央部に配置した水平バネの特

表-1 材料特性値

圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )
116.2	6.4

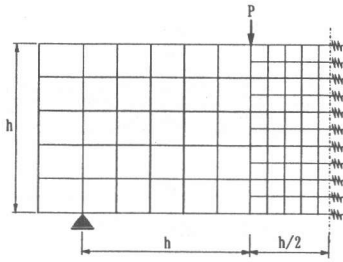


図-6 解析モデル

性を、引張軟化曲線に一致するように与えシミュレーションを行った。図-6 に3等分点荷重による曲げ試験を対象とした1/2モデルの要素分割および境界条件を示す。

FEM解析より得られる曲げ引張強度を、式(3)で算出した引張強度で無次元化したものと断面高さの関係について、実験結果によるものと比較を行い、適用した引張軟化曲線の妥当性について検証した。曲げ引張強度を引張強度で無次元化したものと断面高さの関係を図-7に示す。

図に示すようにFEM解析結果は、実験結果の傾向をよく再現しており、高強度コンクリートの引張軟化曲線に、式(3)により求められる引張強度を軟化開始点強度とした図-5の直線モデルを適用することにより、曲げ試験の最大荷重を近似することができるものと考えられる。よって、本解析ではプレーンコンクリートの引張軟化曲線に図-5の直線モデルを適用した。

## (2) SFRCの引張軟化曲線

Nanakorn ら<sup>5)</sup>は、鋼繊維の混入率が1.5%以下のSFRCにおける引張軟化曲線は2直線モデルにより近似することができるとしている。SFRCの引張軟化曲線の2直線モデルを図-8に示す。図のように2直線モデルの第1直線(ひび割れ発生後の直線)は、SFRCの母材である無筋コンクリートの特性を表し、第2直線(変曲点以降の直線)は鋼繊維による引張応力の伝達を示している。また、Nanakorn ら<sup>5)</sup>は引張軟化曲線を第2直線のみでモデル化することにより、SFRCの曲げ試験の最大荷重およびひび

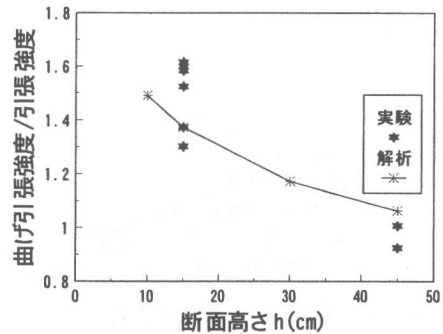


図-7 曲げ引張強度と断面高さ

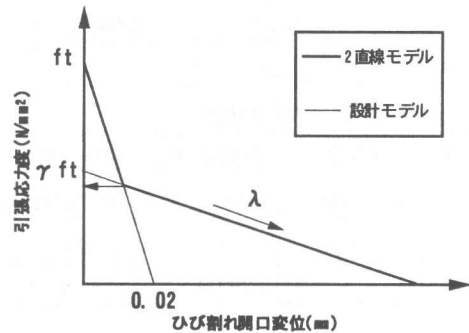


図-8 引張軟化曲線モデル

割れ発生後の挙動を精度よく近似することを指摘している。そこで、解析に用いる引張軟化曲線の第1直線は、ひび割れ発生強度を圧縮強度試験結果から式(3)により算定される引張強度とし、筆者ら<sup>2)</sup>が解析に用いた軟化勾配を有する直線とした。また、第2直線は筆者ら<sup>6)</sup>が提案している曲げ試験から引張軟化曲線を推定する手法により図-8の残留強度 $\gamma ft$ と勾配 $\lambda$ を求め定義した。図-9に実験から求めた引張軟化曲線を示す。また、表-2に実験から求めた残留強度 $\gamma ft$ および勾配 $\lambda$ を示す。実験から求めた鋼繊維混入率0.5%の勾配 $\lambda$ は、鋼繊維混入率1.0%の勾配 $\lambda$ より大きい結果となった。一方、残留強度率については鋼繊維混入率0.5%が鋼繊維混入率1.0%より小さい結果となった。本解析においては、SFRCの引張軟化曲線に、推定した図-9の2直線モデルを適用した。

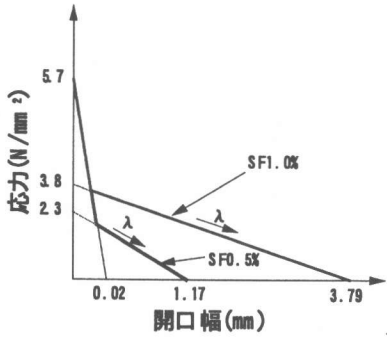


図-9 算定した引張軟化曲線

表-2 残留強度  $\gamma_{ft}$  と勾配  $\lambda$

混入率 (%)	残留強度 $\gamma_{ft}$ (N/mm <sup>2</sup> )	勾配 $\lambda$ (N/mm <sup>3</sup> )
0.5	2.29	-1.957
1.0	3.83	-1.011

表-3 材料特性値

材料種別	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $\times 10^4$ (N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	99.5	5.7	3.7
鉄筋	-	724.0	20.0

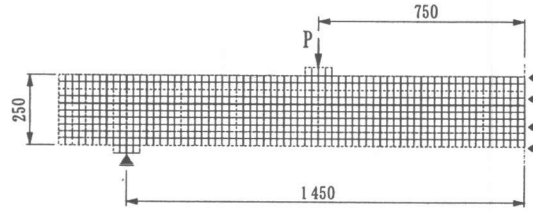


図-10 解析モデル

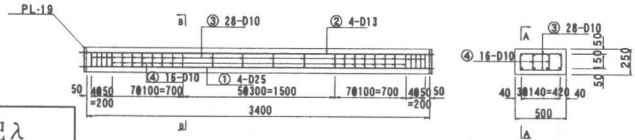


図-11 梁配筋図

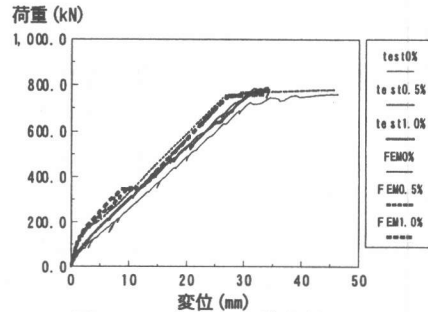


図-12 荷重-変位関係

## 2.3 解析モデル

SFRC梁の解析モデルは、図-10に示すように2点載荷による曲げ試験を想定した幅2.5cmのメッシュ分割を行った部材半分を対象としたモデルとした。なお、表-3に解析に用いた材料特性値を、図-11に梁配筋図を示す。

## 3. 解析結果

### 3.1 荷重-変位関係

FEM解析により得られた載荷点荷重と梁中央の変位量の関係を実験結果<sup>1)</sup>と併せて図-12に示す。図に示すように、解析による曲げ耐力に達したときの変位量については、実験で得られた結果と同じように、鋼繊維混入率による違いは認められなかった。また、解析による曲げ耐力は実験結果とほぼ一致しているが、初期荷重(200kN)以下では差が生じている。これは、コンクリートの初期弾性係数の違いと応力-ひずみ曲線の形状の違いによるものと考えられる。

### 3.2 ひび割れ開口変位

実験結果<sup>1)</sup>では、鋼繊維混入によるひび割れ分散効果は載荷荷重の小さい初期の段階で現れ、ひび割れ本数に違いを生じた後、各ひび割れの開口変位が増加する傾向が得られていることが報告されている。そこで、荷重が200kNのときの曲げスパンにおけるひずみ(各要素の節点ひずみ)分布について比較検討した。図-13に実験結果<sup>1)</sup>を、図-14に解析結果を示す。ただし、図中に示した実験結果<sup>1)</sup>は、ひび割れ開口変位量をパイ型変位計の標点距離(10cm)で割ったものをひずみとしてプロットしている。解析では、鋼繊維混入率により違いが顕著に現れ、鋼繊維混入率1.0%の最大ひずみが最も小さく、0.5%、0%の順に最大ひずみが大きくなる傾向を示した。また、実験結果においても混入率0.5%と1.0%の結果を注視すると顕著な違いは見受けられないが、全体的な傾向としては、鋼繊維を混入したものが最大ひずみは小さく、ひび割れの分散効

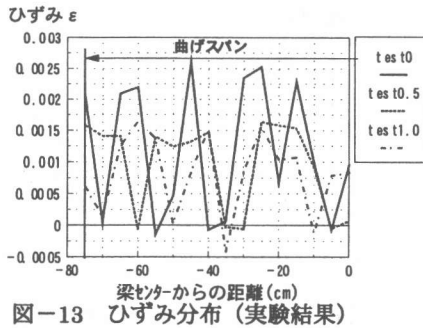


図-13 ひずみ分布 (実験結果)

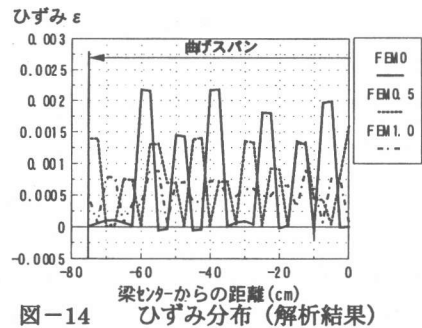


図-14 ひずみ分布 (解析結果)

果が発揮されている。また、FEM解析で得られた各ケースの最大ひずみは実験結果とほぼ一致している。本モデルを考慮した解析結果は、実験結果の傾向をよく近似しており、鋼繊維混入によるひび割れの分散効果を推定できるものと考えられる。

#### 4. ひび割れ分散性の評価

鋼繊維を混入することによりひび割れが分散し、各々の開口幅が小さくなれば、RC部材のひび割れ幅制限により決定される使用限界荷重を増加させることが可能であり、さらに同一設計荷重条件下であれば、鋼繊維混入により耐久性が向上するものと考えられる。

超高性能コンクリート構造物設計施工指針(案)<sup>7)</sup>では耐久性に対する曲げひび割れ幅の算定において、超高性能コンクリート、高強度鉄筋を用いた鉄筋コンクリート部材の曲げひび割れ発生は、普通強度のRC部材と変わらないものとして、引張強度の特性値が $500\text{N}/\text{mm}^2$ を超える高強度鉄筋を用いる場合についても、普通材料を用いたRC部材の曲げひび割れ幅の算定式を適用してもよいとしている。

そこで、超高性能コンクリート構造物設計施工指針(案)<sup>7)</sup>で定められている使用限界状態におけるひび割れ幅制限値から算定される荷重についてひび割れ幅の検討を行った。なお、ひび割れ幅の制限値は鋼材の腐食に対する環境条件が一般の環境として求めた。表-4に算定された荷重(133.1kN)において、実験により得られた最大ひび割れ開口幅を示す。また、図-15にひび

割れ開口幅と鋼繊維混入率との関係について示した。なお、図中には算定したひび割れ幅制限値もプロットしている。

図に示すように、鋼繊維混入率0.0%のひび割れ開口幅は使用限界状態におけるひび割れ幅制限値より小さく、設計施工指針に基づいて設計すれば鉄筋の腐食に対する安全性は確保することができると思われる。鋼繊維を混入すると、図-15に示すように同一荷重条件下でひび割れ

表-4 ひび割れ幅

ケース	SF0%	SF0.5%	SF1.0%
Test	0.165mm	0.084mm	0.099mm

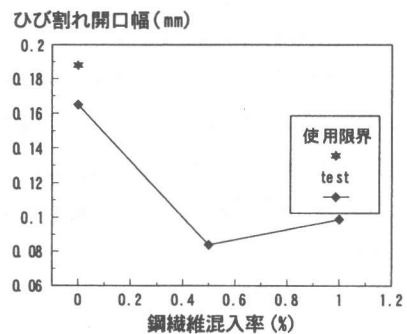


図-15 ひび割れ開口幅と鋼繊維混入率

幅が鋼繊維を混入しないものの約1/2となっている。なお、実験結果のひび割れ幅はパイ型変位計の標間距離(10cm)で生じた変位量であるため、ひび割れ1本当たりの変位ではない。図-16にひび割れ幅の制限値に到達した時の荷重を示す。図中にはFEMの計算結果を示しているが、FEM解析によるひび割れ幅は要素1個(2.5cm)

当りに生じるひび割れ幅の総和である。鋼繊維混入率 0.5%と 1.0%の実験結果では、ひび割れ幅制限値に達する荷重はプレーンコンクリートの約 1.5 倍であり、鋼繊維を混入することによりひび割れ幅を小さくする効果があることが実験的に確認された。FEM解析結果は、引張軟化曲線の残留強度率  $\gamma_{ft}$  が大きく、勾配入が小さいものに荷重増加が得られ、ひび割れ分散効果が生じている。しかし、鋼繊維を混入した FEM解析結果と実験結果は図に示すように差違が生じている。この原因としては、鋼繊維を混入していないものはひび割れの局所化が生じて、ひび割れ間隔が 94mm (曲げスパンのひび割れ本数 16 本) であるのに対し、鋼繊維を混入したものはひび割れ間隔が 68~83mm (曲げスパンのひび割れ本数 18~22 本) と小さく、ひび割れが分散しているため、標間距離 (10cm) で得られた開口幅に差が生じなかったものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 引張軟化曲線 (2 直線モデル) を考慮した FEM 解析により SFRC のひび割れ分散効果を推定することが可能であると考えられる。
- (2) SFRC のひび割れ分散性は引張軟化曲線の折れ点強度とプレーンコンクリートの引張強度の比 (残留強度率) が大きく、折れ点以降の勾配が小さいものがひび割れ分散性に優れていることが解析結果から判明した。

## [謝辞]

本研究は、SQC 構造物開発・普及協会鋼繊維部会として実施したものであり、ご指導して頂いた東京大学岡村甫教授、東京大学前川宏一教授、元東京大学小沢一雅助教授、(財) 鉄道総合技術研究所に謝意を表します。

鋼繊維部会構成会社 (50 音順)

鴻池組、神鋼建材工業、住友金属建材、錢高組、大同コンクリート工業、鉄建設、東急建

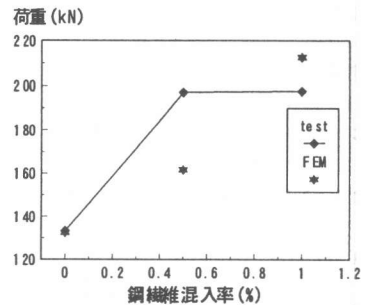


図-16 ひび割れ幅における荷重

設、東京製鋼、飛島建設、日鐵建材工業、日本冶金工業、フジタ、ブリヂストンカルファ、前田建設工業 (株)、(財) 省略

## 参考文献

- 1) 柳 博文, 松岡 茂, 武田康司, 松尾庄二: 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散に対する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 1998
- 2) 松岡 茂, 益田彰久, 土井至朗: 破壊力学に基づく耐震壁のせん断耐力解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 75-80, 1997
- 3) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳 治: コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, No. 442/V-16, pp. 101-107, 1982. 2
- 4) 岡村 甫: コンクリート構造の限界状態設計法, 共立出版, pp. 17-18, 1984
- 5) Nanakorn, P., Horii, H. and Matsuoka, S.: A FRACTURE MECHANICS-BASED DESIGN METHOD FOR SFRC TUNNEL LINING, J. Materials, Conc. Struct., Pavements, No. 532/V-30, pp. 221-233, February 1996.
- 6) 松岡 茂, 松尾庄二, 益田彰久, 柳 博文: 鋼繊維補強コンクリートの引張特性試験法に関する研究, 土木学会論文集, No. 564/V-35, pp. 145-153, 1997. 5
- 7) 超高性能コンクリート構造物設計施工指針に関する委員会: 超高性能コンクリート構造物設計施工指針 (案), 集文社, 1996. 7