

# 論文 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散効果に対する実験的研究

柳 博文\*<sup>1</sup>・松岡 茂\*<sup>1</sup>・武田 康司\*<sup>1</sup>・松尾 庄二\*<sup>1</sup>

**要旨：**ひび割れ開口幅により使用限界状態が決定されるRC部材では、高強度鉄筋・高強度コンクリートを用いても使用限界における荷重はほとんど増加しない。鋼繊維を混入することにより、RC部材に発生するひび割れは分散することが知られている。そこで、使用限界の設計荷重を増加させる目的で、鋼繊維によるひび割れ分散効果を実験により検討した。

**キーワード：**鋼繊維，使用限界，ひび割れ分散効果

## 1. はじめに

土木構造物では、鉄筋の腐食によるRC部材の劣化を防止する目的で、引張補強材である鉄筋の伸びにより発生するコンクリートのひび割れ開口幅をできるだけ小さくすることが重要である。鋼繊維補強コンクリート(SFRC)については、既往の研究により曲げ靱性、ひび割れ分散性に優れた特性を示すことが知られている。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。

本研究においては、SFRCの優れた特性であるひび割れ分散性に着目し、圧縮強度80N/mm<sup>2</sup>程度の高強度コンクリートを鋼繊維補強したケースについて、ひび割れ分散性を検討することを目的に、鋼繊維混入率をパラメータとした梁供試体による曲げ載荷試験を行った。

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. 実験概要

### 2.1 供試体

高強度コンクリートに鋼繊維を混入した場合

のひび割れ分散効果を確認するために、図-1に示すような梁供試体を用いて実験を行った。実験に使用した供試体は、断面幅：断面高さが2：1の矩形断面を有する同じ形状の鋼繊維で

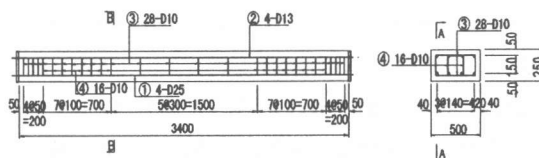


図-1 梁供試体断面図

補強した高強度コンクリート梁で、鋼繊維混入率は0%、0.5%、1.0%の3種類である。表-1に供試体の諸元を示す。供試体はすべて曲げスパン1500mm、せん断スパン比3.5とし、せん断耐力が曲げ耐力を上回るように帯鉄筋を配置した構造とした。

表-1 供試体諸元

断面寸法 (cm)	せん断補強筋 比 (%)	引張鉄筋比 (%)	せん断 スパン比
50×25	0.57	2.03	3.5

### 2.2 使用材料

実験に使用した鋼繊維は、表面にインデント加工が施された公称径0.6mm、繊維長30mのもの、混入率(コンクリート中の体積百分率)は0.5%

\* 1 鉄建建設(株) エンジニアリング本部技術研究所(正会員)

表-2 配合

Vf (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )
0.0	29	67.9	167	571	1039	510
0.5	31	67.4	177	571	1039	524
1.0	31	66.9	177	571	1039	537

表-3 コンクリートの強度特性

混入率 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 × 10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
0.0	99.6	3.77
0.5	91.4	3.75
1.0	78.1	3.22

1.0%とした。高強度コンクリートおよび高強度SFRCの配合を表-2に示す。最大骨材寸法は繊維長との関係から20mmとした。コンクリート打設後は空中で養生を行い、養生期間を56日以上とした。鉄筋は高強度鉄筋を使用し、主鉄筋は引張側にD25(USD685)を、圧縮側にD13(USD685)を使用した。また、帯鉄筋にはD10(USD785)を使用した。表-3に使用したコンクリートの強度特性を示す。

2.3 実験方法

実験方法は、荷重スパン1500mm、せん断スパン700mmの2点荷重実験である。荷重方法は、図-2に示すように変位制御による静的荷重とし、

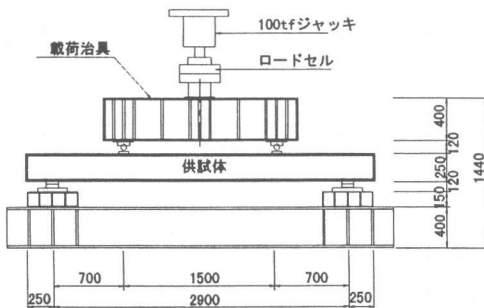


図-2 荷重装置

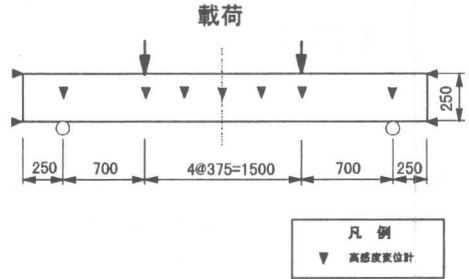


図-3 変位計測位置図

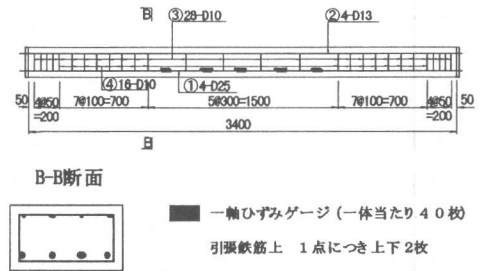


図-4 鉄筋ひずみ計測位置図

油圧ジャッキ1000kNにより荷重治具を介して最大荷重に達するまで単調に荷重を与えた。計測は、荷重荷重、鉛直変位、引張鉄筋のひずみ、コンクリートの圧縮側の表面ひずみ、ひび割れ開口幅についてそれぞれ行った。計測方法は、荷重についてはロードセルにより、変位は図-3に示すように、高感度変位計(CDP-50)により荷重点下、支承点上、梁中央部の計7点を計測した。鉄筋ひずみは、図-4に示すように曲げスパン内の引張鉄筋上下に金属用ひずみゲージ(5mm)を貼付し、引張ひずみを測定した。コンクリートの圧縮側のひずみは、梁中央の圧縮側表面に単軸のポリエステルゲージ(ゲージ長さ

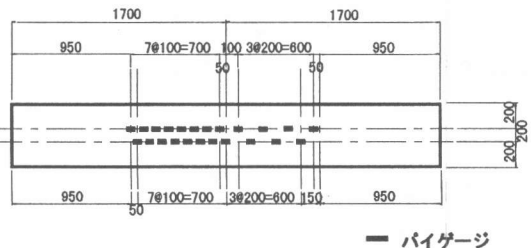


図-5 開口幅計測位置図

60mm) を3カ所取り付け計測を行った。ひび割れ開口幅は、図-5に示すように曲げスパン内の供試体下面に、標点距離100mmのパイ型変位計(PI-5)を貼付し計測を行った。貼付間隔については、梁中央から左半分に関しては5cmピッチで16箇所、右半分に関しては10cmピッチで7箇所の計23カ所である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 荷重-変位関係

実験結果は、いずれの供試体も曲げひび割れが進展し、引張鉄筋が降伏した後一定耐力を保持する曲げ破壊の性状を示した。図-6に荷重と供試体中央の変位量の間を、表-4に引張鉄筋降伏荷重と変位量を示す。図-6に示すように、曲げ耐力に達した時点(引張鉄筋降伏時)の梁中央部の変位量については、鋼繊維混入率の差違に関係なく各ケースともほぼ一致した結果となった。一方、曲げ耐力については、鋼繊維を混入したものが混入率0%のものより若干耐力の

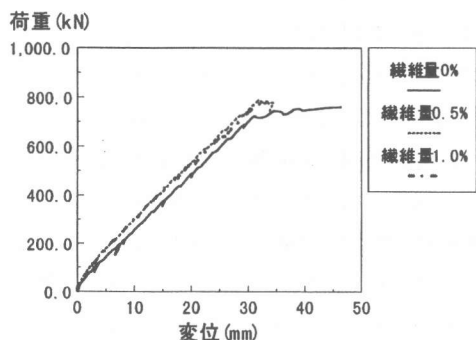


図-6 荷重-変位関係

表-4 降伏荷重-変位量

混入率 (%)	降伏荷重 (kN)	変位量 (mm)
0.0	723.9	31.1
0.5	786.2	31.8
1.0	781.3	32.8

増加が得られた。表-3に示すように試験当日における各ケースの圧縮強度に差違が生じており、その影響を受けているとも考えられるが、主な原因としては、ひび割れ面に架橋する鋼繊維による引張抵抗によって、鋼繊維を混入した部材の引張破壊エネルギーが鋼繊維を混入していない部材の引張破壊エネルギーに比較し大きくなったことが考えられる。また、鋼繊維混入率0.5%と1.0%の最大耐力は、ほぼ一致している。これは、鋼繊維混入率0.5%のものは1.0%のものと比較し、圧縮強度が17%大きいことから破壊エネルギーがほぼ同等になったものと考えられる。

#### 3.2 荷重-鉄筋ひずみ関係

ひび割れの分散性は主鉄筋のひずみ分布に直接影響するものと思われる。そこで、曲げスパン内の引張鉄筋のひずみ分布について検討した。図-7(a~d)に曲げスパン内の梁中央から荷重点までの範囲において、引張鉄筋のひずみ分布を荷重100kN、200kN、400kN、600kNの4ケースに

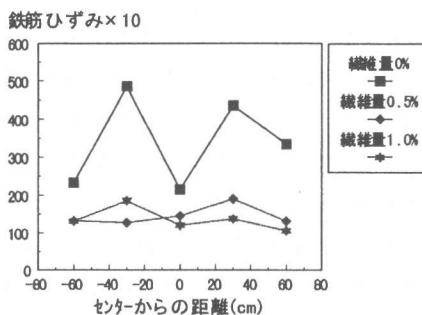


図-7a 荷重100kN時

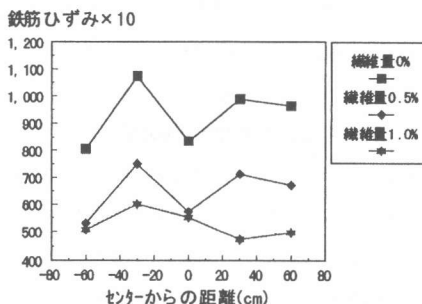


図-7b 荷重200kN時

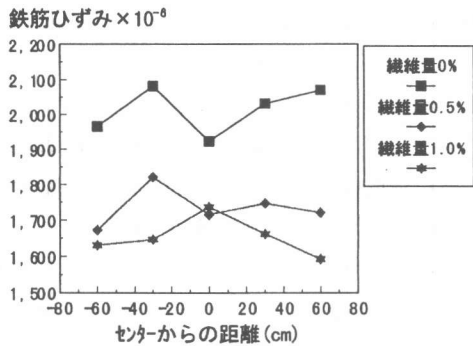


図-7c 400kN時

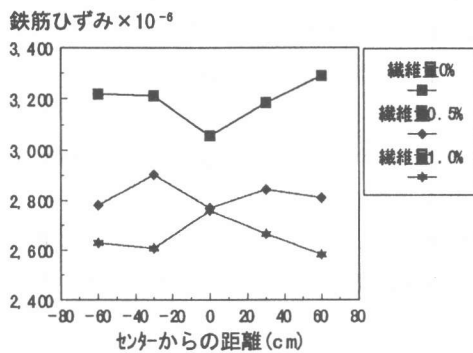


図-7d 600kN時

ついて示した。図に示すように曲げスパン内の鉄筋のひずみは、同一荷重において鋼繊維混入率が0.5%、1.0%のものが混入率0%のものより全体的に小さくなっていることがわかる。また、荷重600kNのときの各ケースにおける最大ひずみの差は200~300 $\mu$ であり、鋼繊維混入率が大きくなるにしたがい鉄筋のひずみは小さくなっている。荷重が増加するにしたがい各ケースの鉄筋ひずみの差が大きくなる傾向を示していることから、鋼繊維によりひび割れ面でも応力伝達があるために、引張側の鉄筋ひずみが小さくなったものと考えられる。

### 3.3 荷重-ひび割れ開口幅関係

実験における各ケースのコンクリートのひび割れ進展状況は、荷重が600kN付近まで梁中央部から複数のひび割れが荷重の増加に伴ってスパン内に発生、増加した後、最大耐力(曲げ耐力)までひび割れ開口幅が増加する結果となっ

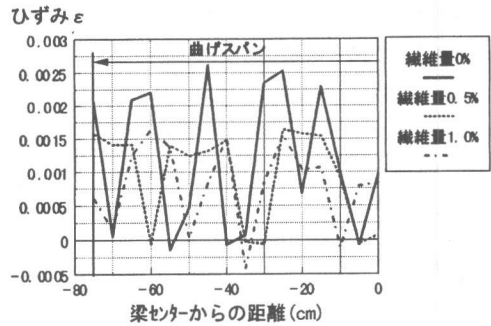


図-8 ひび割れ開口ひずみ(200kN)

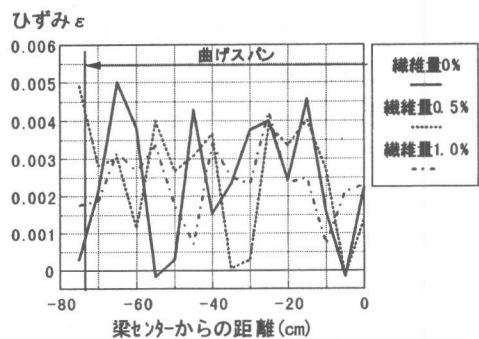


図-9 ひび割れ開口ひずみ(400kN)

た。実験により得られた荷重が200kN、400kN時の試験体の曲げスパン下縁における平均ひずみ(開口幅をパイ型変位計の標点距離で割ったもの)の分布を図-8,9に示す。図-8に示すように、荷重が200kNの鋼繊維混入率0%の最大ひずみが2610 $\mu$ であるのに対し、鋼繊維混入率0.5%、1.0%の最大ひずみは両者ほぼ1640 $\mu$ を示した。また、図-9に示すように荷重が400kNの鋼繊維混入率0%の最大ひずみが5010 $\mu$ であるのに対し、鋼繊維混入率0.5%が最大ひずみ4940 $\mu$ 、鋼繊維混入率1.0%が4250 $\mu$ を示した。鋼繊維混入率0%と0.5%はほぼ同じ程度のひずみとなり、1.0%はやや低いひずみが得られた。これより、荷重の初期段階において、コンクリートのひび割れ分散性が鋼繊維混入率に影響を受けていると推察される。荷重500~600kN付近以降では、各ケースともほぼ同じ最大ひずみを示しながら増大する傾向を示し、分散効果は見られなかった。最

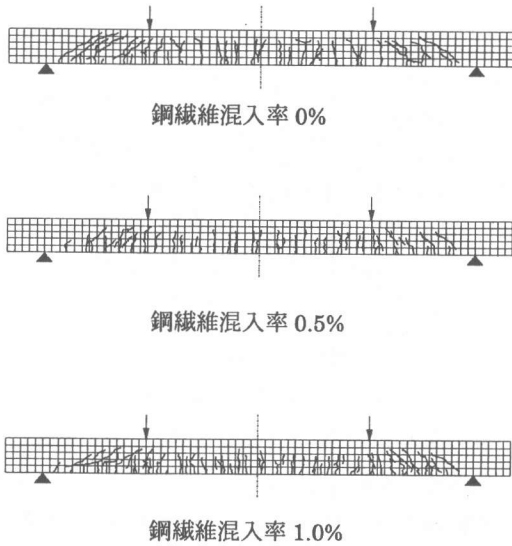


図-10 最終ひび割れ状況

大耐力時（引張鉄筋降伏時）における曲げスパン内の最終ひび割れ本数は、図-10 に示すように鋼繊維混入率 0%のものが 16 本、0.5%のものが 18 本、1.0%のものが 22 本と鋼繊維を混入したものに、ひび割れ面に架橋する鋼繊維の引張抵抗によるひび割れ分散効果が現れた結果となった。

#### 4. FEM解析による実験結果の検証

SFRCの引張破壊特性を把握するためには、ひび割れ開口幅と引張応力の関係である引張軟化曲線を評価することが重要であることが知られている。そこで、図-11 に示すようにSFRCの力学的パラメータである引張軟化曲線（2直線モデル）を考慮したFEM解析により曲げ試験のシミュレーションを試みた。ただし、解析においては各ケースとも、実験における鋼繊維混入率 0%の圧縮強度を用い、鋼繊維混入率 0%の引張破壊エネルギー（引張軟化曲線）については、筆者らが解析で用いた直線モデル<sup>1)</sup>を、鋼繊維混入率 1.0%の引張破壊エネルギー（引張軟化曲線）については、図-11 に示すような2直線モデルを用い、2直線モデルの折れ点強度

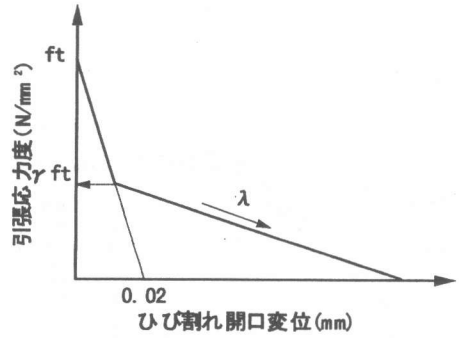


図-11 引張軟化曲線

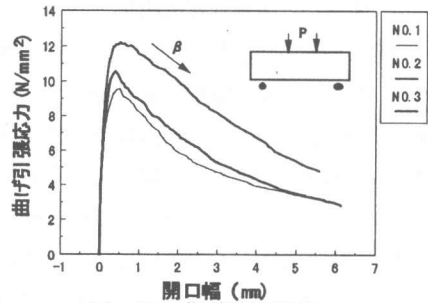


図-12 曲げ試験結果

表-5 引張破壊特性

混入率 (%)	残留強度 $\gamma ft$ ( $N/mm^2$ )	勾配 $\lambda$ ( $N/mm^3$ )
1.0	3.83	-1.011

$\gamma ft$  および第2直線の勾配  $\lambda$  は筆者らが提案している引張特性試験法<sup>2)</sup>に基づいて定めた。まず、15cm 角の曲げ試験供試体を作製し、次に図-12 に示す曲げ試験から与えられる曲げ引張応力とひび割れ開口幅曲線の勾配  $\beta$  と曲げ引張強度からSFRCの引張軟化曲線を算定した。このようにして求めたSFRCの引張破壊特性の一覧を表-5 に示す。図-13 に算定された引張軟化曲線を用いたFEM解析<sup>3)</sup>により得られた荷重と変位の関係を鋼繊維混入率 0%と 1.0%の2ケースについて示した。解析結果において、各ケースとも実験結果で見られた耐力の違いは認められず、最大耐力に達した時点での変位量にも違いが認められなかった。最大耐力は実験結果とほぼ一致しており、変位量については解析結果が若干小さい値を示したが、荷重-変位曲線

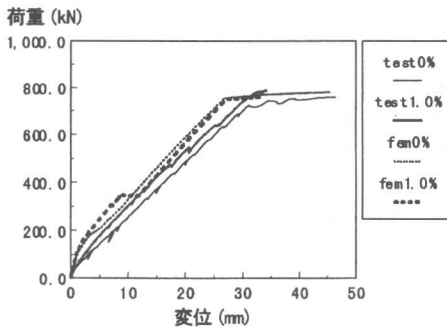


図-13 荷重-変位関係

の初期勾配が違うことからコンクリートの弾性係数および圧縮強度に達するまでの応力-ひずみ曲線の形状に起因しているものと考えられる。実験結果および解析結果が同様な傾向を示していることから、耐力および変位量は鋼繊維の混入率による影響はほとんど受けないと考えられる。また、図-14 に荷重 200kN における曲げスパン内のひずみ分布を示す。ただし、ひずみは部材下面の要素間の節点におけるひずみを示し、梁中央から荷点までの範囲で示した。図に示すように、解析結果は鋼繊維混入率 0%については最大ひずみが 2000 $\mu$ 程度を示し、1.0%については 1000 $\mu$ 程度を示した。解析結果においても実験結果(図-8)と同様に、荷重の初期段階において鋼繊維混入率の変化によるひずみの違いを生じた。曲げスパン内におけるひずみ分布に着目した結果、引張軟化曲線を考慮した FEM 解析結果は、荷重の初期段階におけるひずみ分布において、実験結果と同様な傾向を示した。

### 5. まとめ

- (1) 今回の鋼繊維を適用した梁部材の曲げ荷重試験では、鋼繊維混入率がコンクリートのひび割れ分散性能に影響を与えていると考えられる。
- (2) ひび割れの分散性は、荷重の初期段階(最大耐力の 50%まで)で現れ、鋼繊維混入率 1.0%の部材においてその特性が発揮された。
- (3) SFR C の引張破壊特性である引張軟化曲

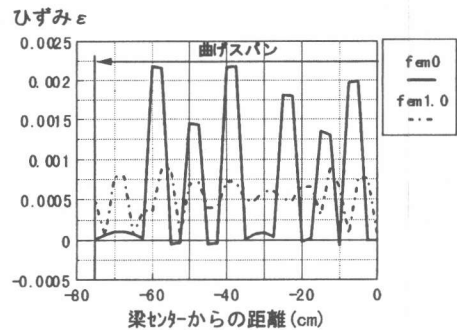


図-14 ひずみ分布(解析結果)

線の混入率の違いを考慮した FEM 解析結果は、実験結果を良く近似していることから、引張軟化曲線とひび割れの発生・進展の間には相関があるものと考えられる。

### 【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、銭高組、大同コンクリート工業、鉄建建設、東急建設、東京製鋼、飛鳥建設、日鐵建材工業、日本冶金工業、フジタ、ブリヂストンメタル、前田建設工業 (株)、(財)省略

### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 松岡茂ほか: 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.
- 3) 武田康司, 松岡茂, 益田彰久, 土井至朗: コンクリート工学年次論文報告集, 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散解析, 1998.