

鋼繊維補強コンクリートの曲げひび割れに関する研究

オリエンタル建設㈱	正会員	工学修士	○阿部 浩幸
日本道路公団	正会員		大城 壮司
オリエンタル建設㈱	正会員	工学博士	余 国雄
東京工業大学	正会員	工学博士	二羽淳一郎

1. はじめに

近年、コンクリート構造物を取り巻く環境条件の変化に伴い、コンクリート部材のひび割れに対する関心が高まっている。特に、鉄筋構造およびパーシャルプレストレス (PRC) 構造の設計においては、使用性および耐久性の面から曲げ引張部に発生するひび割れ幅の大きさを制御する手法が用いられ、各種規準に構造物の環境条件や耐用年数を考慮したひび割れ幅の制限値が設定されている。このように、ひび割れを制御することは極めて重要な項目のひとつであるが、コンクリート材料は、外的要因によって容易にひび割れを発生しやすく脆いという短所がある。このようなコンクリート材料の短所を改善するひとつに、鋼繊維補強コンクリート (SFRC ; Steel Fiber Reinforced Concrete)が上げられる。SFRC は、普通コンクリートに比べひび割れ抵抗性が高く、ひび割れ幅の制御に有効な材料であることはすでに周知のことである。しかし、SFRC のひび割れ幅やひび割れ間隔に関する研究報告は少なく、SFRC のひび割れに対する定量的な評価はほとんどなされていない。

本研究は、SFRC はり試験体のひび割れ間隔、ひび割れ幅および鉄筋応力に着目し、普通コンクリートとの比較実験を行ったので、その結果をここに報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体および実験要因

コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>に記載されたひび割れ幅算定式の構成要素の中で鉄筋径、水平配置間隔、垂直配置段数およびかぶりパラメータとして、図-1に示すような5種類の試験体を SFRC および普通コンクリート (以下、RC と記述) を用いて製作した。試験体引張鉄筋の鉄筋比は、一般的な実施工範囲を考慮して 0.38% ~1.35% とした。D19 および D25 を用いた試験体の鉄筋配置は、100mm 間隔とし、

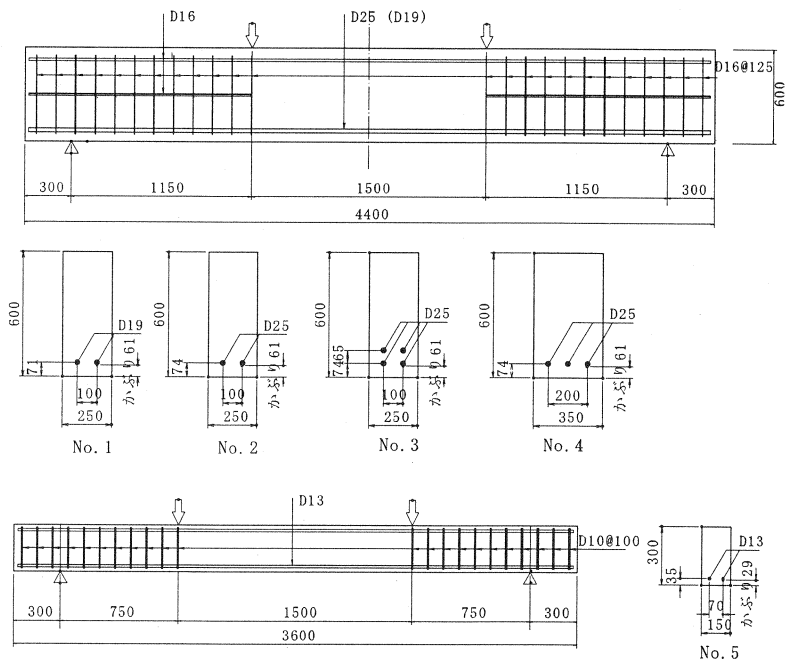


図-1 試験体形状寸法

D13 を用いた試験体は 70mm 間隔とした。試験体は、多くのひび割れを観察するため等曲げモーメント区間を 1500mm として、ひび割れ発生に対して主鉄筋以外の影響が混在しないようにせん断鉄筋および中段軸方向鉄筋を配置しないものとした。桁高は、主鉄筋が降伏以降に各試験体が破壊するように計画して決定し、主鉄筋 D19 および D25 を用いた 4 試験体 (No.1~No.4) は 600mm そして主鉄筋 D13 を用いた試験体 (No.5) は 300mm とした。いずれの試験体もせん断破壊しないように、せん断スパンのせん断鉄筋配置量を決定した。

2.2 使用材料

試験体に使用したコンクリート配合表を表-1に示す。SFRCに使用した鋼繊維は、長さ30mm、公称径0.6mm (アスペクト比50) のもので、コンクリート混入量は体積比率で1%とした。SFRC および RC 試験体に使用したコンクリートは同じセメント水比50%とし、SFRCは良好なワーカビリティを得

表-1 コンクリート配合表

種別	W/C (%)	細骨材率 (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	鋼繊維
SFRC	50	50.5	350	175	868	857	80
RC		44	330	165	787	1009	-

られるように RC 配合に比べ細骨材率を 6.5% 増加し、単位水量を 175kg/m<sup>3</sup> と決定した。載荷試験は、材齢 28 日以降に行った。試験時の各試験体に使用した鋼繊維混入コンクリートおよび普通コンクリートの強度試験結果を表-2に、鉄筋材料試験結果を表-3に示す。

表-2 コンクリート材料試験結果

種別	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
SFRC	47.2	29.5	4.87
RC	55.3	33.2	3.64

表-3 鉄筋材料試験結果

種別	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D13	397	183
D19	384	183
D25	370	185

2.3 実験方法と計測

実験は、図-1に示すように等曲げ区間 1500mm、せん断スパン 1150mm (No.1~4) および 750mm (No.5) とした単純曲げ載荷とし、破壊までの単調載荷を行った。計測位置を図-2に示す。等曲げモーメント区間の引張縁側鉄筋平均ひずみおよびひび割れ幅の計測を目的に、等曲げモーメント区間に計測間隔 100mm の  $\pi$  ゲージを並列に配置した。ひび割れ幅の平均値および最大値は、 $\pi$  ゲージ計測結果をもとに求めた。ひび割れ位置鉄筋ひずみ (最大ひずみ) の計測を目的に、引張鉄筋の内の下縁側かつ側面側に配置された 1 本について、等曲げ中央 320mm 区間の鉄筋に付着性能を損なわないように縦リブ位置に溝を設け、そこにひずみゲージを 20mm 間隔で配置した。各ゲージのリード線は、鉄筋に沿わせることなく上方に引き出し、桁高の半分の位置で束ね桁上面へ配線した。この計測結果の最大ひずみ位置とひび割れ発生位置とがほぼ一致していたことより、鉄筋最大ひずみをひび割れ位置鉄筋ひずみとして扱うこととした。

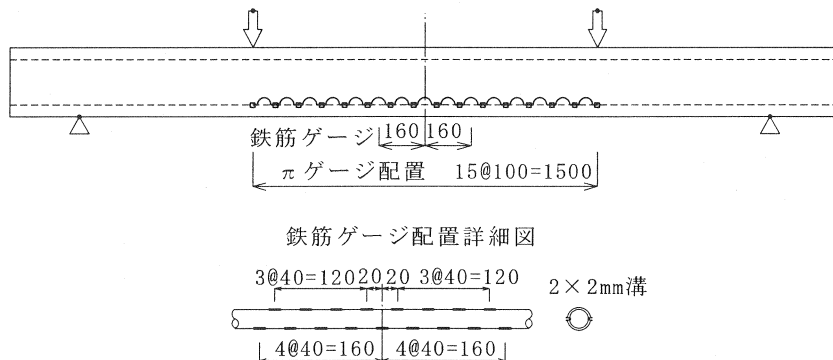


図-2  $\pi$ ゲージおよび鉄筋ゲージ計測位置図

3. 試験結果と考察

3.1 破壊荷重の比較

同一断面寸法で鉄筋量を変化させた試験体 No. 1 ~No. 3 の荷重と変位の関係を図-3 に示す。ひび割れ発生荷重は若干 SFRC の方が RC に比べ高いが、ひび割れが発生するまでの初期剛性は、SFRC および RC とともに差は見られない。ひび割れ発生から鉄筋が降伏して荷重がほとんど増加しなくなるまでの2次剛性は SFRC の方が大きく、また、鉄筋降伏荷重および最大荷重も SFRC の方が大きい結果となった。No. 4 および No. 5 試験体についても同様の結果が得られた。SFRC 試験体最大荷重の RC 試験体に対する比率は、1.3~1.1であった。

3.2 ひび割れ本数の比較

等曲げモーメント区間に発生したひび割れ本数が定常状態となる荷重において SFRC と RC 試験体それぞれの観測ひび割れ本数の比較を表-4 に示す。また、試験体 No.1 および No.2 のひび割れ発生状況を写真-1, 2 に示す。すべての試験体において、SFRC は RC に比べひび割れ本数が多く、RC に対する SFRC の割合は鉄筋のかぶりの大きい No.1~4 の方がかぶりの小さい No.5 に比べ大きな値を示した。ひび割れ本数が多い理由として、SFRC の鋼繊維の補強効果によるものと考えられる。図-4 に SFRC の引張軟化の例を示

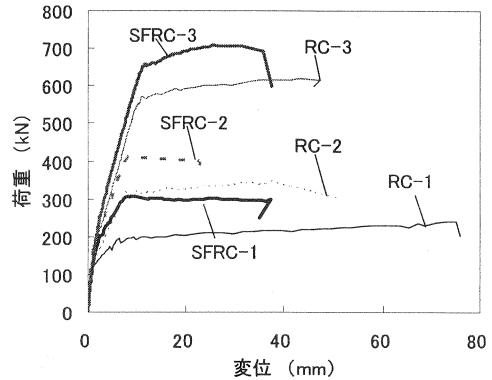


図-3 荷重と変位の関係

表-4 観測ひび割れ本数の比較

試験体名	計測時 荷重 (kN)	ひび割れ本数 (本)		比率 SFRC/RC
		SFRC	RC	
No. 1	200	9	7	1.29
No. 2	300	10	7	1.43
No. 3	500	10	8	1.25
No. 4	450	9	7	1.29
No. 5	50	11	10	1.10

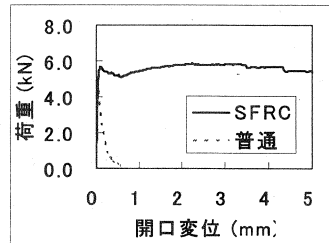
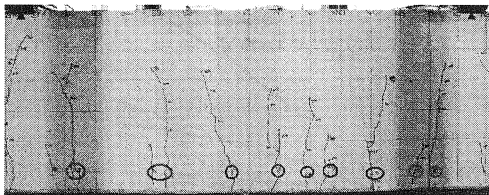
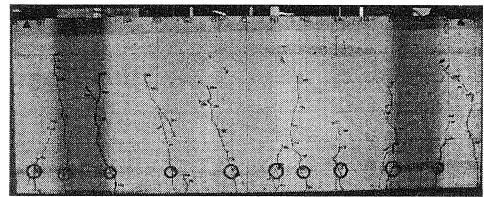


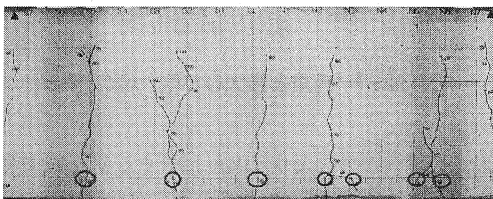
図-4 引張軟化曲線の例



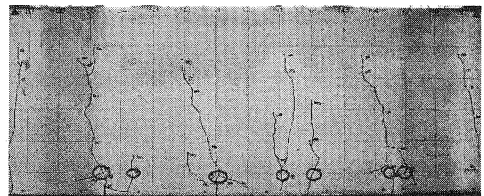
(1) SFRC-1



(1) SFRC-2



(2) RC-1



(2) RC-2

写真-1 No. 1 試験体ひび割れ比較

写真-2 No. 2 試験体ひび割れ比較

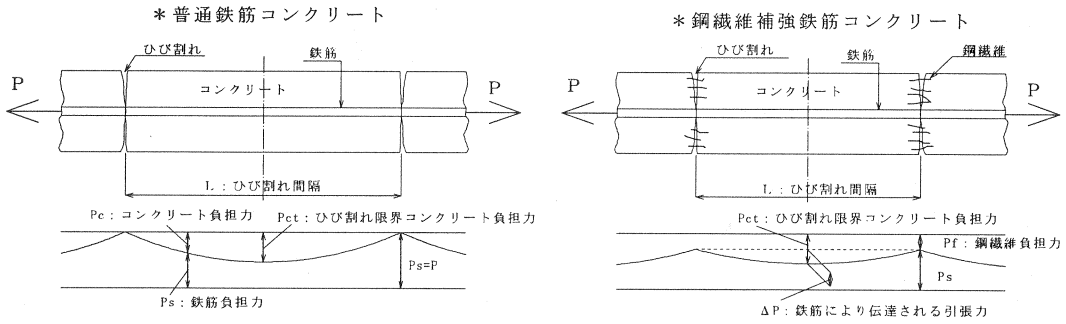


図-5 普通コンクリートと鋼繊維補強コンクリートのひび割れ発生モデル

すが、SFRC のひび割れ開口に対する抵抗は、RC に比べて大きい。このことから、図-5 に示すような鉄筋が配置された断面のひび割れ位置では、引張力を鉄筋とともにひび割れ位置に存在する鋼繊維が負担すると考えられる。ひび割れ間において、SFRC のひび割れ発生応力に達するまで引張応力の必要増加量は RC に比べ小さく、よって、SFRC のひび割れ間隔が小さくなると考えられる。宍戸らは、鉄筋を断面中央に配置した SFRC の引張試験を行い、ひび割れ間隔が小さくなることを報告している<sup>2)</sup>。かぶりによりひび割れ割合 (SFRC/RC) が異なる理由として、かぶりが小さいとその部分に存在する繊維が少なくなり繊維の補強効果が小さくなるのではないかと考えられる。

3.3 ひび割れ幅の比較

図-6 に No.1~3 の荷重と平均ひび割れ幅 (Wav) の関係を、図-7 に同試験体の荷重と最大ひび割れ幅 (Wmax) の関係を示す。これらの図より、SFRC は RC に比べ各 Wav および Wmax における載荷荷重が大きく、ひび割れ幅の増加に伴う荷重の増加率が大きいことがわかる。この傾向は、No.4 および No.5 試験体についても同様である。平均ひび割れ幅 0.1mm および 0.2mm 時の荷重の比率 (SFRC/RC) は、1.4~1.7 を示している。このことより、鋼繊維の補強効果によりひび割れ幅が抑えられていること、そして、その効果は最大ひび割れ部分およびその他の部分についても同様であると考えられる。

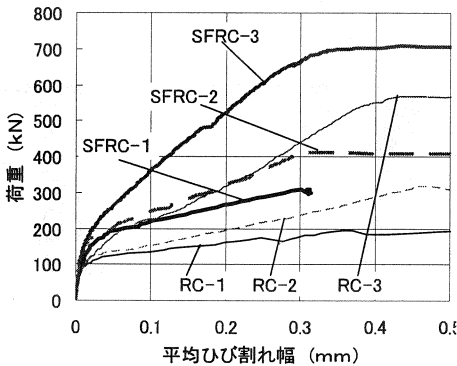


図-6 荷重と平均ひび割れ幅の比較

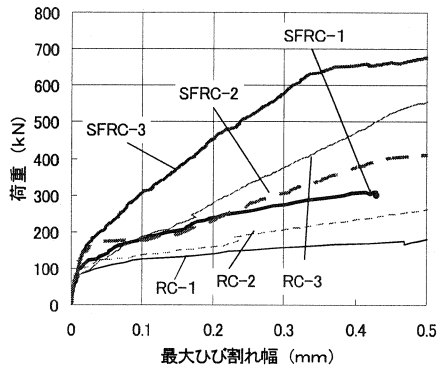


図-7 荷重と最大ひび割れ幅の比較

3.4 (最大ひび割れ幅/平均ひび割れ幅) の関係

図-8 に、Wmax と Wav の比率と最大鉄筋ひずみの関係を示す。この図より、Wav に対する Wmax の割合の変動は、SFRC および RC ともほぼ同じ挙動を示していることがわかる。ひび割れが定常状態と思われる最大鉄筋ひずみ 1500 μ 時の Wmax/Wav の値は、RC 試験体が平均で 1.41 (1.30~1.69) を示し、SFRC

試験体は平均で 1.41 (1.26~1.64) と同じ値を示した。これは、土木学会のひび割れ算定式で  $W_{max}/W_{av}$  値を 1.5 とし、角田らの報告<sup>4)</sup>では 1.45 としているのに対し、試験結果は概ね近い値を示している。これらのことから、 $W_{max}/W_{av}$  値は、SFRC においても RC と同様に一定の値に収束し、かつ、同じ比率が適用できるのではないかと考えられる。

### 3.5 平均ひび割れ幅と平均ひずみの関係

普通コンクリートのひび割れ幅算定式の基本として、平均ひび割れ幅  $W_{av}$ 、平均ひび割れ間隔  $L_{av}$  そして平均鉄筋ひずみ  $\epsilon_{av}$  の間には、

$$W_{av} = \epsilon_{av} \cdot L_{av} \quad (1)$$

の理論式が成り立つと言われている。この式は、普通コンクリートの場合に  $W_{av}$  と  $\epsilon_{av}$  とが比例関係にあることを示している。そこで、SFRC と RC の実験結果より得られた  $W_{av}$  と  $\epsilon_{av}$  の関係を図-9 に示す。SFRC および RC ともに  $W_{av}$  の増加とともに  $\epsilon_{av}$  がほぼ直線的に増加しており、概ね比例関係が見られる。したがって、SFRC においても(1)式の関係式が適用できると考えられる。図-9 より、各段階の  $\epsilon_{av}$  に対する  $W_{av}$  を SFRC と RC 試験体で比較した場合、SFRC の方が RC に比べ若干小さいひび割れ幅を示している。これは、鋼繊維の効果によりひび割れ幅が抑えられたためと考えられる。

### 3.6 平均ひび割れ間隔の比較

前項より、平均ひび割れ幅と平均ひずみの関係が SFRC においても線形関係にあることが示されたことより、ひび割れ間隔は次式で算出することができる。

$$L_{av} = W_{av} / \epsilon_{av} \quad (2)$$

実験より得られた平均鉄筋ひずみと平均ひび割れ幅を用いて算出された平均ひび割れ間隔を図-10 に示す。 $L_{av}$  は、SFRC および RC ともに最大ひずみの増加に伴い一定となる傾向を示している。ひび割れがほぼ定常状態となる最大鉄筋ひずみ 1500  $\mu$  の平均ひび割れ間隔は、RC は 147~268mm を示し、SFRC は 129~192mm と RC と比較して 0.7~0.9 と小さい傾向を示した。これは、前述した観察ひび割れ本数結果 (表-4 参照) と同じ傾向を示している。このことより、SFRC は RC に比べひび割れ分散性が向上することが判断できる。

平均ひび割れ間隔の算定式を土木学会では次式で示している。

$$L_{av} = K_1 K_2 (4c + 0.7e) / a \quad (3)$$

ここに、 $a=1.3$ 、 $K_1$  は鉄筋の付着性係数、 $K_2$

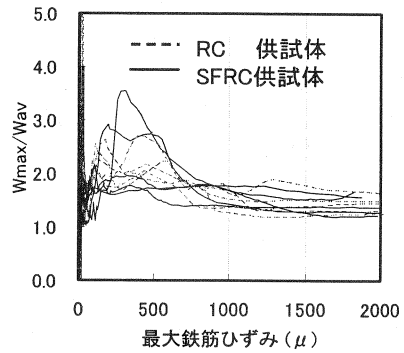


図-8 鉄筋平均ひずみと平均ひび割れ幅の比較

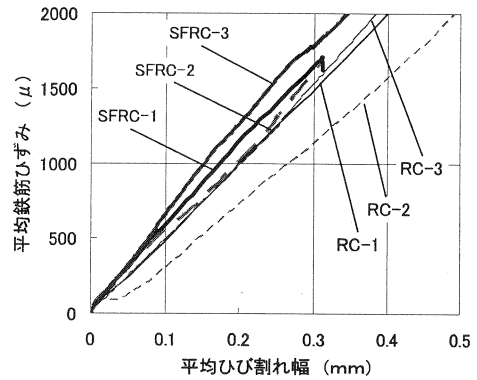


図-9 鉄筋平均ひずみと平均ひび割れ幅の比較

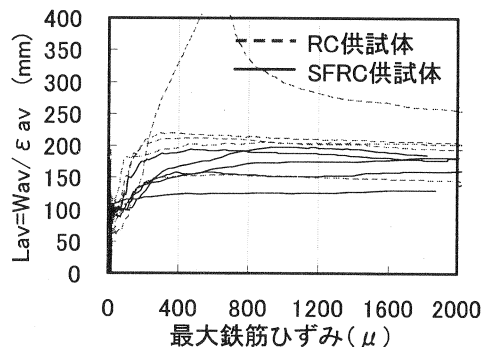


図-10 平均ひび割れ間隔と最大鉄筋ひずみの関係

$(=5(n+2)/(7n+8))$  は多段鉄筋の影響係数で  $n$  は鉄筋の段数,  $c(=3c_b+c_s)$  は換算かぶりで  $c_b$  は底面かぶりを  $c_s$  は側面かぶりを示す。図-11 に(3)式の計算値  $L_{av}$  (計算) と実験結果より得られた SFRC および RC の  $L_{av}$  (実験) との関係を示す。この図より, RC 試験体  $L_{av}$  (実験) は,  $L_{av}$  (計算) とほぼ一致する値を示しているが, SFRC 試験体  $L_{av}$  (実験) は  $L_{av}$  (計算) に比べ小さく No.5 を除く No.1~4 試験体  $L_{av}$  (実験) は  $L_{av}$  (計算) に対し約 0.8 の比率であった。このことから, 現行のひび割れ間隔算定式は鋼繊維補強コンクリートに対応していないこと, そして, 過大評価となる傾向があることが示された。

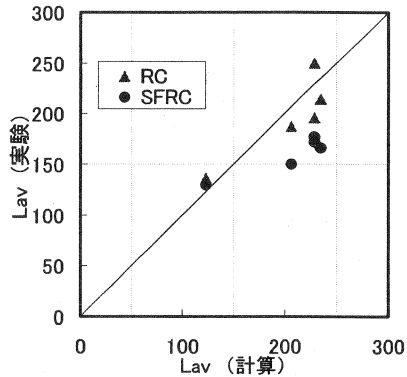


図-11 平均ひび割れ間隔の実験値と計算値の比較

#### 4. まとめ

SFRC の曲げ試験より次のような知見が得られた。

- (1) 普通コンクリート同様平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の関係は一定の値となる。
- (2) 平均ひび割れ幅は平均鉄筋ひずみと平均ひび割れ間隔の積で表される。
- (3) 鋼繊維の補強効果により, ひび割れ幅およびひび割れ間隔は普通コンクリートに比べ小さくなる。
- (4) 同じ引張鉄筋量の場合, SFRC 試験体の方が RC 試験体に比べ破壊荷重は大きくなる。

#### 参考文献

- [1]土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002
- [2]穴戸薫, 関口幹夫：鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散について, 都土木技研年報, 1978
- [3]角田与史雄：鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, 1970.9.