

鋼繊維補強コンクリート部材の曲げひび割れ幅の評価に関する研究

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

1. はじめに

ひび割れ発生後に示す脆性破壊挙動がコンクリートの短所である。鋼繊維の混入によりそれは改善されることがよく知られている。鋼繊維補強コンクリート (以下 SFC) は引張、曲げ、靱性、耐衝撃などの性状が向上し、トンネル法面の吹付け、道路や空港の舗装などに数多く適用されている。しかしながら、構造部材としての鋼繊維補強鉄筋コンクリート (以下 SFRC) の適用例はあまり多くない。その原因のひとつとして、SFRC 部材のひび割れ幅に対する定量的な評価手法が明らかにされていないためと考えられる。そのため、著者らは SFRC と RC のはりの曲げ荷重実験を行い、ひび割れ性状の比較を報告した¹⁾。本論文は、従来の RC 部材に関するひび割れ幅の評価の考え方にに基づき^{2), 3), 4), 5)}, SFRC 部材におけるひび割れ幅を定量的に評価することを試みた。

2. ひび割れ幅算定の基本式

図-1に示すように、ひび割れ間隔が与えられたとき、RC 部材か SFRC 部材かに関わらず、ひび割れ幅はそのひび割れ間において、鉄筋の伸びと表面コンクリートの伸びの差であり、一般に次の式により表すことができる。これはひび割れ幅算定の基本式となる³⁾。

$$w = (\bar{\epsilon}_s - \bar{\epsilon}_c) l = (\bar{\epsilon}_s - \bar{\epsilon}'_c - \epsilon_\phi) l \quad (1)$$

ここに、 w と l はひび割れ幅とひび割れ間隔である。 $\bar{\epsilon}_s$ はひび割れ間の鉄筋平均ひずみ、 $\bar{\epsilon}_c = \bar{\epsilon}'_c + \epsilon_\phi$ はコンクリート表面の平均ひずみ、 $\bar{\epsilon}'_c$ は荷重によって生じたひずみ、 ϵ_ϕ はクリープおよび収縮によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値である。

3. 実験による SFRC 部材に関するひび割れの特性

3. 1 実験の概要

文献 1 に SFRC 部材曲げ実験を行い、SFRC 試験体のひび割れ特性を報告した。この実験では、図-2に示すような5種類の試験体を SFRC および RC について製作をした。SFRC に使用した鋼繊維は、長さ 30mm、

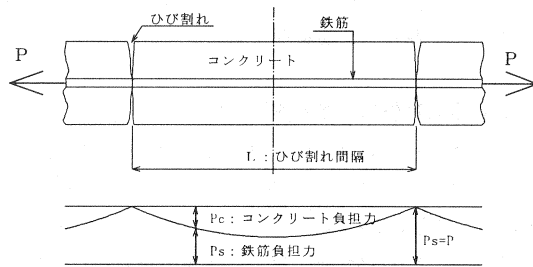


図-1 ひび割れ間の要素模型図

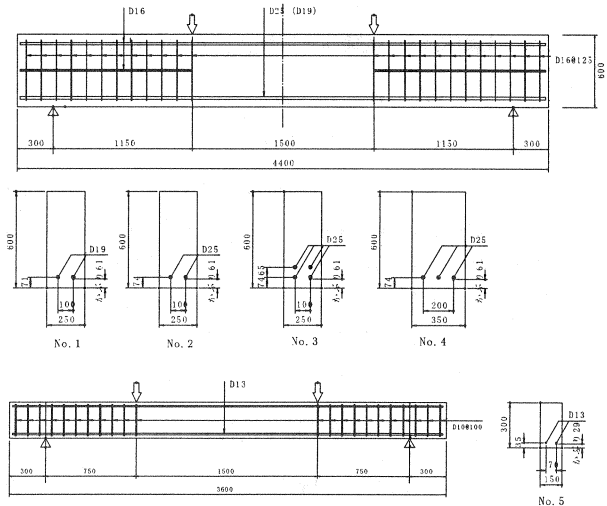


図-2 試験体形状寸法

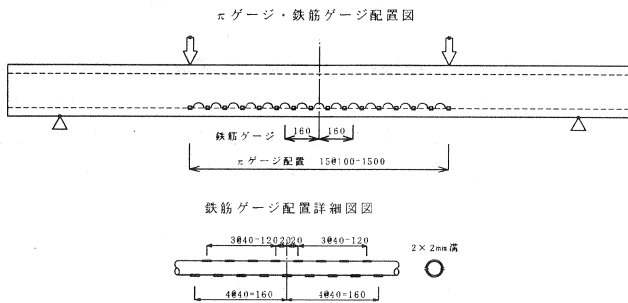


図-3 πゲージおよび鉄筋ゲージ計測位置図

表-1 コンクリート材料試験結果

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

表-2 鉄筋材料試験結果

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

公称径 0.6mm (アスペクト比 50) のもので、混入量は体積比で 1%とした。実験時のコンクリート材料試験結果を表-1に、鉄筋材料試験結果を表-2に示す。

ひび割れ幅を計測するために、図-3に示すように等曲げ区間に引張鉄筋の高さでコンクリート表面に計測間隔 100mm のπゲージを並列に配置した。また、最大鉄筋ひずみを計測するために、図-3に示すように支間中央 320mm 区間に、鉄筋の付着性能を損なわないように縦リブに溝を設け、そこにひずみゲージを 20mm 間隔で貼付した。載荷は単調載荷とした。

3.2 ひび割れ特性に関する実験結果

実験により SFRC 部材の曲げひび割れ特性を検証した結果¹⁾、以下の知見が得られた。

- (1) SFRC 試験体は RC 試験体と同様に、荷重によって生じたコンクリート表面の平均ひずみ $\bar{\epsilon}_s'$ が他の成分と比較してひび割れ幅に対する寄与が小さく無視できると考えられる。このコンクリート表面ひずみを無視した場合、ひび割れ幅に対する評価が安全側になる。よって、ひび割れ幅算定の基本である式(1)は以下のようになる。

$$w = (\bar{\epsilon}_s - \epsilon_\phi) l \tag{2}$$

- (2) SFRC 試験体は RC 試験体と同様に、角田の提案した平均鉄筋ひずみ式が成立する³⁾。

$$\bar{\epsilon}_s = \frac{\bar{\sigma}}{E_s} = \frac{\sigma_{s \max}}{E_s} - \frac{\sigma_{cm}}{E_s p_e} \tag{3}$$

ここに、 $\sigma_{s \max}$ 、 E_s 、 p_e は鉄筋の最大応力、ヤング係数、有効鉄筋比である。 σ_{cm} はひび割れ間の付着による鉄筋応力の減少量をコンクリート有効面積の平均引張応力に換算したものである。

- (3) SFRC 部材のひび割れ間隔は RC 部材より短縮する。この原因としては、鋼繊維の架橋効果およびその架橋効果により鉄筋とコンクリートの付着が高くなるためであると考えられる。RC 部材の平均ひび割れ間隔における土木学会式^{2), 4), 5)}にひび割れ間隔に対する鋼繊維架橋効果影響係数 α を導入して、SFRC 部材の平均ひび割れ間隔を評価できると考えられる。

$$L_{av} = \alpha \frac{1}{1.3} k_1 k_2 (4c + 0.7e) \tag{4}$$

ここに、 k_1 は鉄筋の付着性状係数、 k_2 は多段鉄筋影響係数、 e は鉄筋純間隔、 c は鉄筋かぶりである。RC 部材においては $\alpha=1$ 、SFRC 部材においては α の値は鋼繊維の混入量、鉄筋のかぶりに影響されると思われるが、つねに $\alpha < 1.0$ が成立する。本実験では SFRC-No. 1~SFRC-No. 4 試験体と SFRC-No. 5 試験体

において鉄筋かぶり異なるため、前者において α が約0.8であり、後者において α が約1.0である¹⁾。
 (4) SFRC 試験体はRC 試験体と同様に、平均ひび割れ幅と平均鉄筋ひずみは概ね比例関係である^{4),5)}。平均ひび割れ幅 w_{av} と平均ひび割れ間隔 l_{av} の関係において、式(2)も成立することが実験により確認された。

$$w_{av} = (\bar{\epsilon}_s - \epsilon_\phi) l_{av} \quad (5)$$

(5) SFRC 試験体はRC 試験体と同様に、最大ひび割れ幅 w_{max} は平均ひび割れ幅の1.5倍である^{4),5)}。

$$w_{max} = 1.5w_{av} \quad (6)$$

4. SFRCにおけるひび割れ幅の評価

以上に述べたように鋼繊維の架橋効果によりひび割れ間隔が短縮することおよび引張に対して鋼繊維の負担により鉄筋応力が減少することで、SFRC 部材はRC 部材よりひび割れ幅が減少する。よって上述の曲げ実験¹⁾で得られた知見から、式(3)と(4)を式(5)に代入して、式(7)のようにRC 部材における土学会ひび割れ幅の計算式に係数 α を導入する形で、SFRC 部材のひび割れ幅を評価できると考える。

$$w_{av} = \alpha \frac{1}{1.3} k_1 k_2 (4c + 0.7e) \left(\frac{\sigma_{smax}}{E_s} - \frac{\sigma_{cm}}{E_s p_e} - \epsilon_\phi \right) \quad (7)$$

$$w_{max} = 1.5w_{av} \quad (8)$$

ここに、 α はひび割れ間隔に対する鋼繊維の架橋効果影響係数である。鉄筋の応力に対する鋼繊維の架橋効果の影響については、以下の節に述べられるように、 σ_{smax} は引張に対して鋼繊維の抵抗を考慮して計算される。

ϵ_ϕ はクリープおよび収縮によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値であり、SFRCの方がRCより小さくなるため⁶⁾、安全側となることを考慮し、RCにおける規定値を使用できると考えられる。

その曲げ実験では、試験体鉄筋のかぶりは一定としたが、著者らは試験体鉄筋のかぶりを変化させ、軸引張実験を行った⁷⁾。その実験によっても、ひび割れ幅と鉄筋かぶりと鉄筋応力の3者の関係が式(7)のように $w = kc\epsilon_s$ であることを確認した。

以下には曲げ実験による最大鉄筋ひずみおよびひび割れ幅結果を用いて、式(7)を検証する。

5. 断面計算による最大鉄筋応力の算出

式(7)から分かるように、最大鉄筋応力を正確に評価することが曲げ部材のひび割れ幅評価において重要となる。

設計断面の曲げモーメントと軸力が与えられたとき、断面縦方向に層を分け、内力と外力が一致するまで、以下のプロセスを繰り返すことで、断面内のコンクリートおよび鉄筋のひずみと応力を計算できる。①断面の曲率と中立軸を仮定する。②各層のひずみを計算する。③各層の応力および内力を計算する。④各層の力を合計して、外力との比較を行う。以上に述べられた計算手法は断面計算と言われている。図-4にSFRC 部材とRC 部材の断面応力分布を示す。なお、本研究の試験体において、コンクリート断面を縦方向に2000層に分割して計算を行った。

断面計算を行う時、普通コンクリートとSFCにおいて、引張応力とひび割れ幅の関係から、引張応力と引張ひずみの関係を求める必要がある。

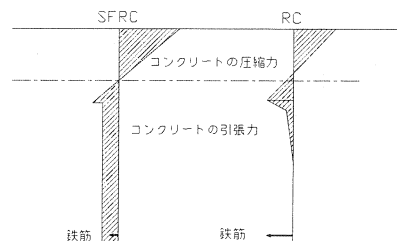


図-4 断面計算における応力分布図

5. 1 引張応力とひび割れ幅および引張応力と引張ひずみ関係

SFC に関する引張応力とひび割れ幅との関係は鋼繊維のタイプおよび混入量に影響される。その関係を記述するモデルにおいて、図-5に示すように土木学会モデル⁸⁾または、Drop-constant⁹⁾モデルなどがある。

土木学会モデルにおいて、 $w_k = 1.4 + 100 / f_{tk}'$, $\mu = 0.55$ 。

本研究において、曲げ実験試験体と同じ普通コンクリートおよびSFCを用いて、曲げタフネス試験体を製作した。普通コンクリートとSFCにおけるJCIの破壊エネルギー試験法^{10),11)}に従って、曲げタフネス試験を行った。図-6はその曲げタフネス試験供試体形状を示す。試験で得られた荷重変位曲線のデータを用い、多直線近似解析法により引張応力とひび割れ幅関係曲線を推定した¹²⁾。

本研究の曲げタフネス実験による結果および土木学会モデル、Drop-constant モデルを図-7に示す。土木学会モデルは曲げタフネス実験による結果より小さく、安全側となる。Drop-constant モデルは概ね実験値と一致している。以下、SFRC曲げ試験体の断面計算においてはDrop-constant モデルを用いることとする。

普通コンクリートにおいて、土木学会コンクリート標準示方書に規定されるモデル (以下1/4モデル) がある。本研究の普通コンクリート引張軟化曲線において、曲げタフネス実験による結果と1/4モデルを図-8に示す。ひび割れ幅が0.05mm以上の範囲では実験値と1/4モデルがよく一致している。以下、RC曲げ試験体の断面計算においては1/4モデルを用いる。

以下の式を用いて、ひび割れ幅をひび割れ発生後のひずみに変換することにより、引張応力と引張ひずみの関係が求められる。

$$\varepsilon = \frac{f_{tk}}{E_c} + \frac{w}{l_{max}} \quad (9)$$

ここに、 f_{tk} はコンクリートの引張強度、 E_c はコンクリートのヤング係数である。 l_{max} は最大ひび割れ間隔であり、式(4)により計算される平均ひび割れ間隔の1.5倍となる。

5. 2 最大鉄筋応力と平均ひび割れ幅の計算結果

図-9に断面計算により最大鉄筋ひずみの結果を示す。No. 5試験体については、主鉄筋径は細く、溝切り作業が困難であるため、最大鉄筋ひずみを計測しなかった。そのために、図-9にはNo. 5試験体の結果を含んでいない。結果としてRC-No. 1試験体を除いて、鉄筋最大ひずみにおける計算値と実験値は概ね一致している。RC-No. 1試験体は、図-3に示している溝切り範囲外に最初のひび割れが発生し、その後、溝切り範囲内にひび割れが発生した。そのため、同じ荷重において、最大鉄筋

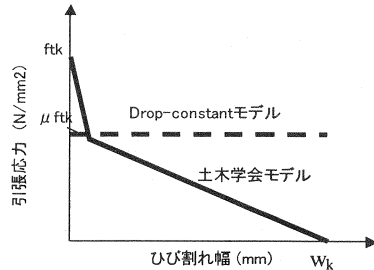


図-5 SFCにおける引張応力とひび割れ幅の関係

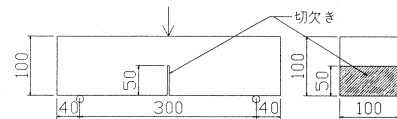


図-6 曲げタフネス試験供試体形状

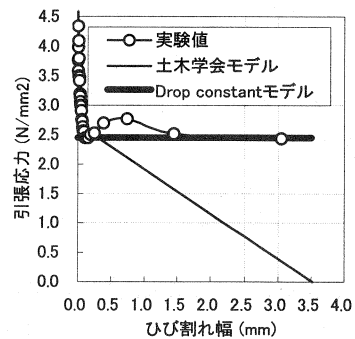


図-7 SFCにおける軟化曲線の比較

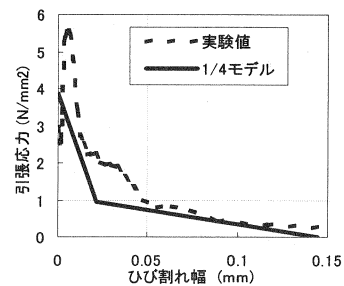


図-8 普通コンクリートにおける軟化曲線の比較

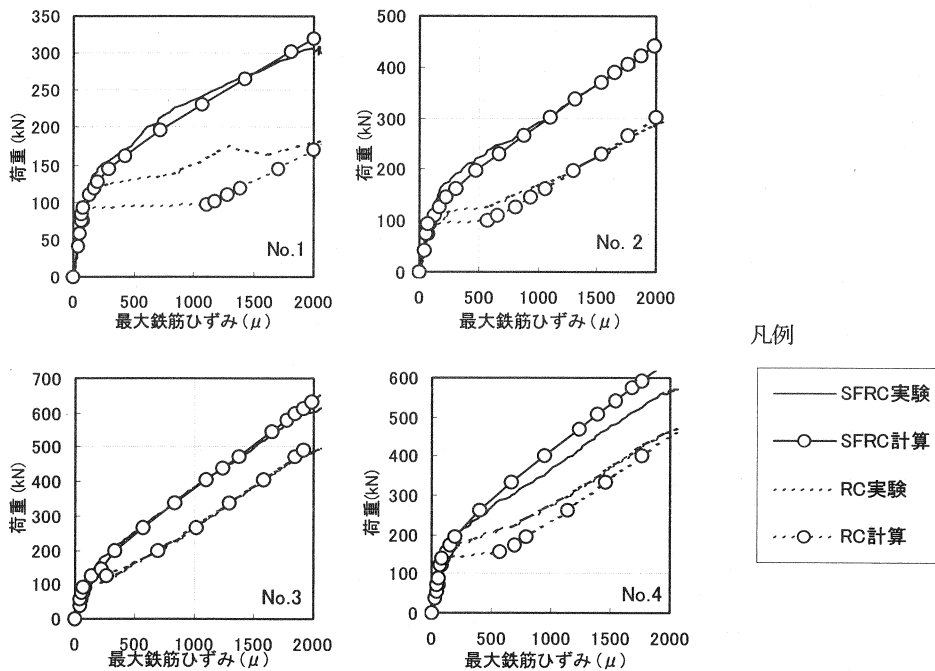


図-9 荷重と最大鉄筋応力関係

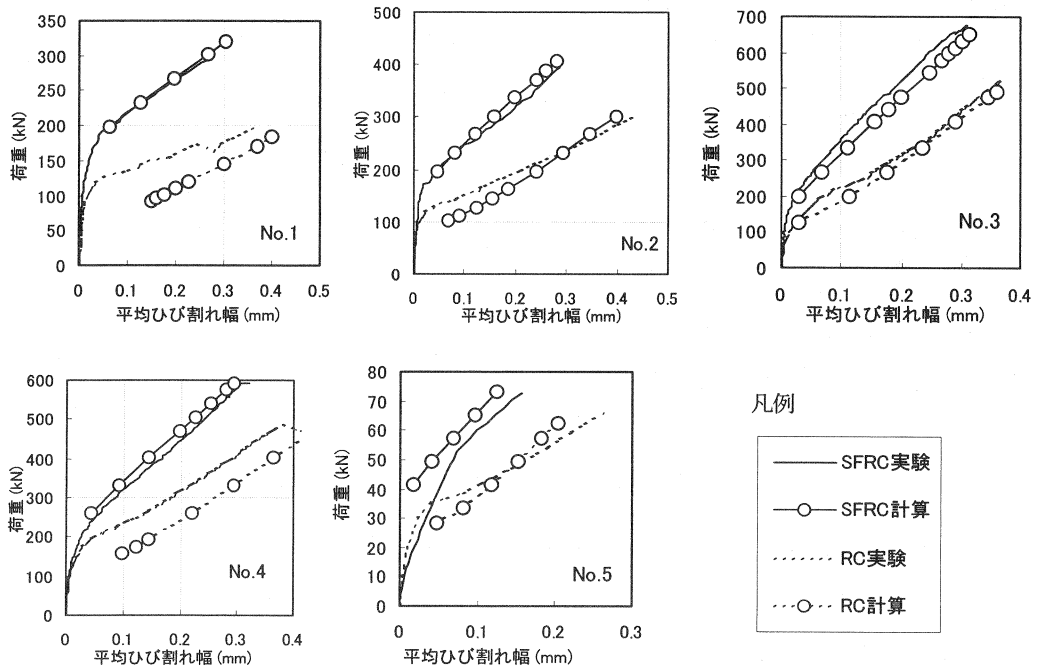


図-10 荷重と平均ひび割れ幅関係

ひずみの計算値の方が実験値より大きくなっている。

式(7)を用いて、断面計算による最大鉄筋ひずみから平均ひび割れ幅を計算した。その際、試験体 SFRC-No. 1～SFRC-No. 4 において、 α を 0.8 とし、SFRC-No. 5 および RC-No. 1～RC-No. 5 において、 α を 1.0 とした。計算結果を図-10 に示す。全ての SFRC 試験体および RC-No. 2, RC-No. 3, RC-No. 5 試験体において、計算値と実験値が概ね一致している。RC-No. 1 および RC-No. 4 において、同じ荷重に対して、計算値は実験値より若干大きくなり、安全側となっている。

6. まとめ

SFRC 部材の曲げひび割れ幅を評価することを試みた。

RC 部材の曲げひび割れ幅と同様に、SFRC 部材の曲げひび割れ幅が主にひび割れ間隔と鉄筋応力に決められる。そのひび割れ間隔と鉄筋応力を正確に評価できれば、SFRC 部材の曲げひび割れ幅を正確に評価できると考えられる。

鋼繊維の混入によって、鋼繊維の架橋効果およびその架橋効果により鉄筋とコンクリートの付着が高くなるため、RC 部材と比べて SFRC 部材の曲げひび割れ間隔が減少する。本論文に述べられたひび割れ間隔に対する鋼繊維の架橋効果影響係数 α が鋼繊維の混入量および鉄筋かぶりに影響されると推測する。本研究において、鉄筋かぶりは 61mm の試験体の場合、その係数は約 0.8 である。その係数を確立するためには、より多くの実験検証が望ましいが、理論的につねに $\alpha < 1.0$ が成立するので、 α を 1.0 とする場合、安全側に SFRC 部材の曲げひび割れ幅を評価することになる。

SFC の引張応力とひびわれ幅の関係が SFRC 部材の鉄筋応力の評価を大きく影響する。SFRC に関する本実験の鉄筋ひずみと、Drop-constant モデルを用いて鋼繊維の引張抵抗を考慮した断面計算から得られた鉄筋ひずみは概ね一致する結果となった。

参考文献

- 1) 阿部浩幸, 大城壮司, 余国雄, 二羽淳一郎: 鋼繊維補強コンクリートの曲げひび割れ性状に関する実験的検討, 第13回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2004
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書「構造性能照査編」, 2002
- 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, pp. 1～10, 1970
- 4) 趙唯堅, 丸山久一: 多段配筋を有する鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 490, V-23, pp. 137～145, 1994. 5
- 5) 趙唯堅, 丸山久一: 鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ幅算定式の再評価, 土木学会論文集, No. 490, V-23, pp. 147～156, 1994. 5
- 6) Kiang-Hwee Tan, P. Paramasivam and Kah-Chal Tan, “Creep and Shrinkage Deflection of RC Beam with Steel Fibers”, Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, Vol. 6, No. 4, pp. 474-494, November 1994
- 7) 阿部浩幸, 大城壮司, 余国雄, 武知勉: 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, pp. 1507～1512, 2004
- 8) 土木学会: 「鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案)」, コンクリートライブラリー, 1999
- 9) RILEM TC 162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete, Materials and Structures, Vol. 35, pp. 262-278, June 2002
- 10) 日本コンクリート工学協会: 「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案)」, 2003
- 11) 日本コンクリート工学協会: 「繊維コンクリートの切欠きはり試験体の荷重-変位曲線の計測方法およびタフネスの評価方法(案)」, 2003
- 12) 日本コンクリート工学協会: 「コンクリートの引張軟化曲線の評価方法(案)」, 2003