

[61] 鋼繊維補強コンクリートの曲げ破壊過程のシミュレーション

正会員 ○大 島 光 晴 (岐阜大学大学院)  
 正会員 岩 瀬 裕 之 (岐阜大学工学部)  
 正会員 六 郷 恵 哲 (岐阜大学工学部)  
 正会員 小 柳 洽 (岐阜大学工学部)

1. まえがき

鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRCと略す)は、破壊時における内部ひび割れの進展を鋼繊維が拘束するために、通常のコンクリートに比べ引張り強度、曲げ強度、および靱性に優れた材料である。特に高強度を持つマトリックスコンクリートにアスペクト比の小さな鋼繊維を多量に混入すれば、施工性を損なうことなく、高い曲げ強度( $\sigma_b > 200 \text{ kgf/cm}^2$ )と高い靱性を持つコンクリートが得られる。しかしSFRCは上記のような優れた性能を持つ反面、複合材料ゆえに、マトリックスコンクリートならびに混入する鋼繊維の各種要因により力学的特性(強度、靱性など)が多様に変化するが、その間の関係については今だ十分な把握がされているとはいえない。

SFRCを今後構造部材に適用する上では、SFRCの力学的特性に影響を及ぼす諸因子の解明もさることながら、構造部材として使用した場合の部材断面内でのSFRCの応力-ひずみ関係を把握することが重要であると考えられる。そこで本研究は主に、SFRCを対象として、マトリックスコンクリートおよび混入する鋼繊維の種類によって、SFRCの引張り域の応力-ひずみ関係がいかに変化するかについて、およびその応力-ひずみ関係を部材断面の解析に適用する場合の破壊域の大きさについて検討するために、曲げを受けるSFRC曲げ供試体の最大耐力点以降を含めた破壊過程のシミュレーションによる解析を行なった。

2. 研究概要

本研究では、SFRCのマトリックスに普通コンクリート、高強度コンクリート、あるいはレジンコンクリートを使用した場合、曲げを受ける部材断面内の引張り域の応力-ひずみ関係にどのような変化があるかを、曲げ破壊過程をシミュレートすることによって求めた。また、後半では、設定した応力-ひずみ関係と、荷重-変位関係を算定する際の破壊域の関連性についての考察を行なった。

なお、本研究において対象とした各種SFRCの使用鋼繊維は表-1の示すとおりである。また、荷重-変位曲線の変位とは、載荷点の荷重方向の変位である。

表-1 SFRCの種類

シリーズ名	マトリックス	鋼 繊 維			
		寸法(mm)	形状	引張り強度(kgf/mm <sup>2</sup> )	混入率(%)
A	普通コンクリート	φ0.5x30	インデント	140	2.0
B	高強度コンクリート	φ0.5x30	インデント	140	2.0
C	レジンコンクリート	φ1.0x40	フラット	150	2.0
D	レジンコンクリート	φ0.5x30	インデント	140	2.0

2-1 計算方法

本研究では、普通コンクリート、高強度コンクリートあるいはレジンコンクリートをマトリックスとしたSFRCについて、断面内のみかけの応力-ひずみ曲線モデルを設定し、以下に示す計算方法より得られる荷重-変位関係が、実測の荷重-変位曲線と一致するように応力-ひずみ曲線モデルの細部の修正を行なった。

応力-ひずみ曲線モデルの設定に際しては、マトリックスの破断からファイバーへの力の伝達という物理的意味

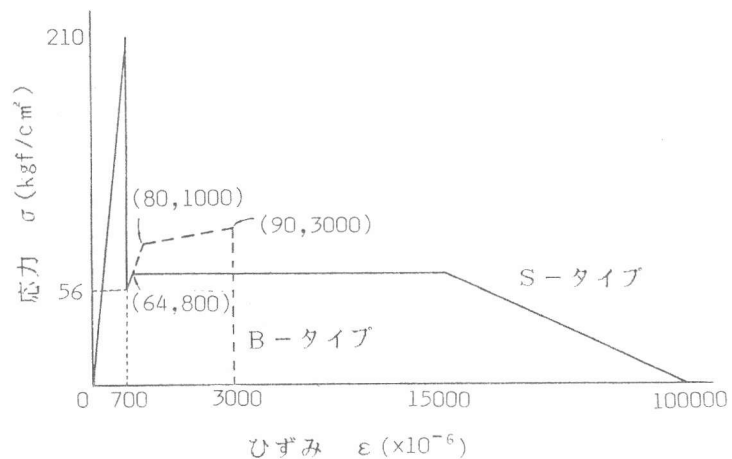


図-1 SFRC応力-ひずみ曲線モデル(引張り)

を加えている。すなわち、ひび割れが発生するまではマトリックスによって力が受け持たれ、ひび割れが進展した破壊断面内の荷重は鋼繊維のみで受け持たれると考えた。Cシリーズを例にとって、引張り域の応力-ひずみ曲線モデルの仮定例を図-1に示す。図-1において、B-タイプは破壊が進展していく上で鋼繊維が破断する場合、S-タイプはマトリックスから鋼繊維が抜け出す場合を示す。以上2つのモデルを用いて計算より得られた荷重-変位曲線を図-2に示す。図-2よりS-タイプが実測値とほぼ合致しているのがわかる。したがって、S-タイプの応力-ひずみ曲線モデルを修正することによってCシリーズのみかけの応力-ひずみ関係を求めた。

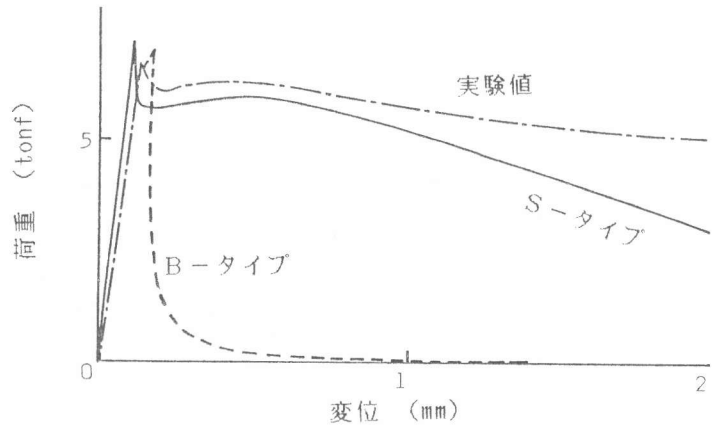


図-2 SFRC 荷重-変位曲線

計算において対象としたSFRC部材の寸法は、通常曲げ強度試験に使用する場合と同じく $10 \times 10 \times 40$  cmとし3等分点荷重(モーメントスパン: 10 cm)を考えた。計算手順としては、まずひび割れが進展する破壊域とそれ以外の弾性的な非破壊域を仮定し、破壊域については部材断面を垂直方向に50個の要素に分割して、引張りひずみ( $\epsilon$ )を設定し、中立軸( $x$ )を仮定することにより各要素のひずみ( $\epsilon_i, i=1 \sim 50$ )を求め、先に仮定したSFRC断面の圧縮、引張り応力-ひずみ曲線モデルより各要素の応力度を求め、力の釣り合いを満足する様に中立軸( $x$ )を仮定し直し、破壊域の曲げモーメントと曲率とを計算した。非破壊域については曲げモーメントと曲率が比例するものとした。そして、破壊域ならびに非破壊域についての断面の曲げモーメント-曲率関係より、曲げ供試体の荷重-変位関係を算定した。荷重-変位関係を算定する場合に設定する部材の破壊の領域の長さは便宜上鋼繊維の長さに等しいと仮定した。つまり、マトリックスが普通コンクリート(Aシリーズ)、高強度コンクリート(Bシリーズ)の場合は3 cm, レジンコンクリートではCシリーズが4 cm, Dシリーズが3 cmとした。以上の計算のフローチャートを図-3に示す。なお、破壊域の領域の長さに関する論議は後節で述べる。

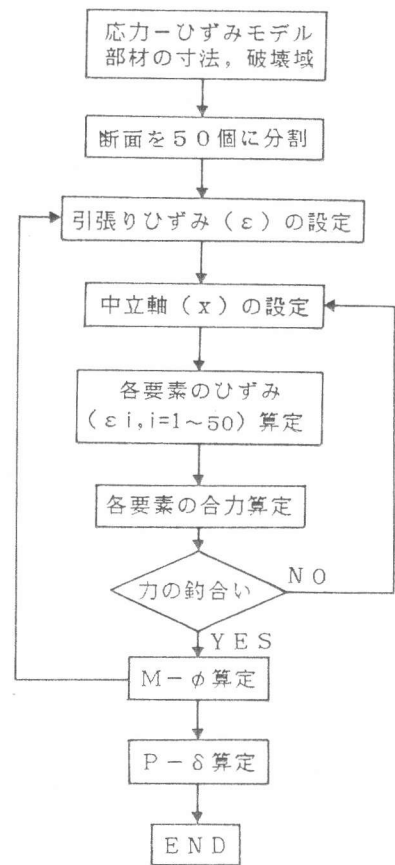


図-3 フローチャート

## 2-2 計算結果

各種SFRCについて、計算によって求めた荷重-変位曲線を実験値と合わせて図-4に示す。図-4に示すように本計算方法によって、実験値とほぼ等しい荷重-変位曲線を比較的容易に計算できた。また、その際仮定した4種類のSFRCのみかけの引張り応力-ひずみ曲線のモデルは図-5に示すような形状となった。図-5の応力-ひずみ曲線のうち、ひずみが $0 \sim 0.008$ の部分を拡大して図-6に示す。本研究においては、SFRCの引張り域における応力-ひずみ関係について検討することを目的としているので、圧縮域の応力-ひずみ曲線は、図-7に示す単純な形状とした。なお、各シリーズのSFRCに対して曲げ試験の後に破壊面の観察を行なったが、A, B, Cシリーズでは、マトリックス中の鋼繊維はほとんど抜け出していた。

図-6より、各シリーズとも、マトリックスの引張り強度によって定まるひび割れ発生点までは、応力とひずみの関係は直線である。ひび割れ発生直後、SFRC断面内の応力は一時低下するが、そ

の後鋼繊維補強の効果が現われ、マトリックスと鋼繊維との付着の影響により応力-ひずみ関係は変化している。

鋼繊維の種類および混入率を等しく設定したA, B, Dシリーズの応力-ひずみ関係はほぼ相似形となった。マトリックスが高強度をもつコンクリートの方が引張り強度が高くかつ付着が良好であることを示している。このことは、荷重-変位曲線を比較した場合、マトリックスをレジコンクリートとしたDシリーズがより高強度、高靱性を表わす要因となっていると考えられる。A, B, Dシリーズとも、供試体の引張り縁における引張り応力-ひずみ曲線モデルの勾配が負となる点（マトリックス中の鋼繊維が破断するか付着が切れる点と考えられる）付近で最大荷重に達した。また、荷重-変位曲線上の最大耐力点以降の荷重低下の度合は、応力-ひずみ曲線モデルの●印で示す点（荷重-変位曲線上の最大耐力点に対応する点）以降の勾配によって決定された。

表面形状がフラットな鋼繊維をレジコンクリートマトリックスに混入したCシリーズの実測の荷重-変位曲線を得るために計算に用いたみかけの応力-ひずみ曲線モデルにおいては、図-6からわかるように、表面をインデント加工した鋼繊維を混入したA, B, Dシリーズに比べ鋼繊維とマトリックスとの付着特性が異なるため、ひずみが0.001~0.005程度の区間で応力が高まる現象がみられなかった。

### 3. 破壊域と応力-ひずみ関係

本研究においては、SFRCの応力-ひずみ関係から求めたモーメント-曲率曲線より部材の荷重-変位曲線を計算す

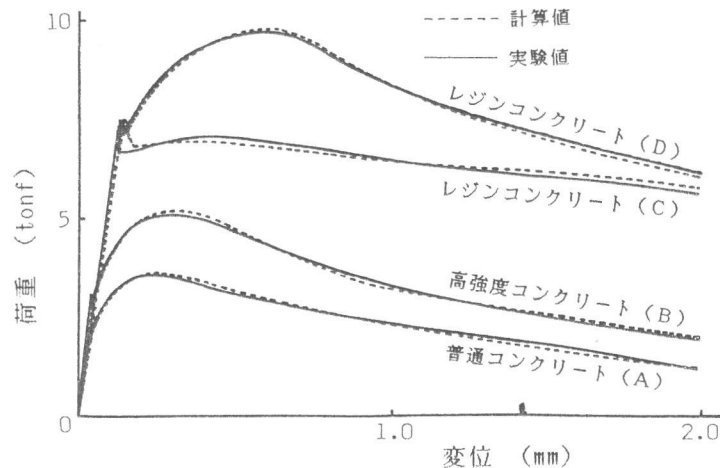


図-4 SFRC曲げ供試体の荷重-変位曲線

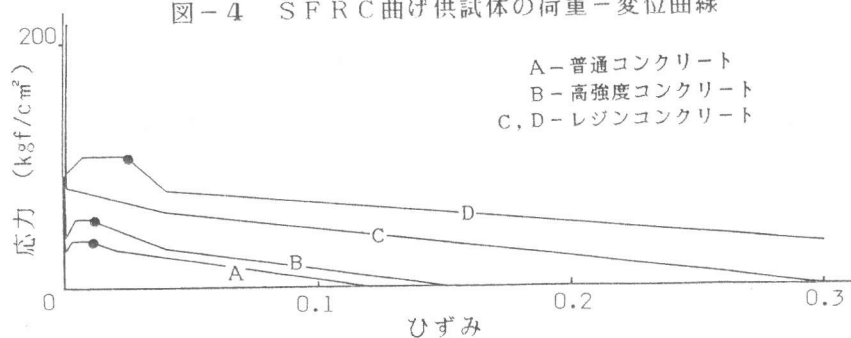


図-5 計算に用いた引張り応力-ひずみ曲線モデル

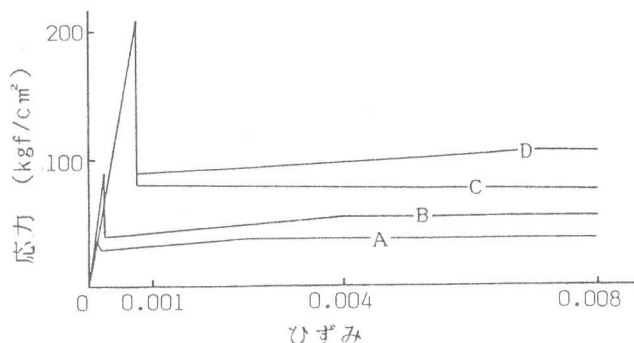


図-6 応力-ひずみ曲線モデルの拡大図

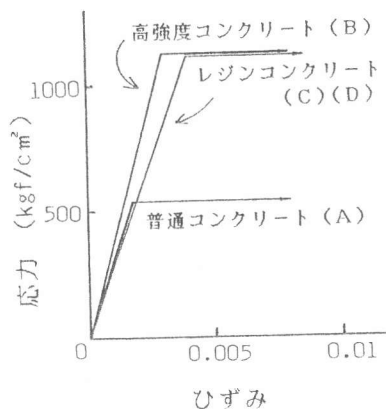


図-7 計算に用いた圧縮応力-ひずみ曲線モデル

る場合に設定する破壊域は、鋼繊維の全長に等しいと仮定した。しかし破壊域を変化させることによって、得られる荷重-変位曲線も横軸（変位）方向に変化する。

破壊靱性値は、破壊過程における吸収エネルギーであると定義される [1]。ここで、破壊靱性値を表面エネルギーと結びつけた形で  $2\gamma$  と表記することとする。部材断面の破壊靱性値 ( $2\gamma$ ) と、断面内のみかけの応力-ひずみ曲線下の全面積 ( $T$ ) と破壊域の長さ ( $L$ ) との間に次式の関係があるものと仮定する。

$$2\gamma = T \times L \quad (1)$$

なお、破壊靱性値 ( $2\gamma$ ) は、曲げ供試体の荷重-変位曲線下の全面積 ( $S$ ) を供試体の断面積 ( $A$ ) で除したもの ( $S/A$ ) であり、曲げ破壊において単位面積のひび割れが生ずるのに必要なエネルギーに相当する。

前節において算出した A, B, C シリーズの荷重-変位曲線下の全面積から求めた破壊靱性値 ( $2\gamma$ )、計算に用いた応力-ひずみ曲線下の全面積 ( $T$ )、ならびに破壊領域の長さ ( $L$ ) を表-2 に示す。これより、ほぼ (1) 式の関係が成立することがわかる。また、B シリーズの応力-ひずみモデルを横軸（ひずみ軸）のみを変化させて、面積 ( $T$ ) が  $1/2$ ,  $1/3$  になるように設定した応力-ひずみモデル B2, B3 によってモーメント-曲率関係を計算し、それぞれ破壊域の大きさ ( $L$ ) を 6 cm (2 倍), 9 cm (3 倍) と仮定して  $T$  と  $L$  の積を一定とした条件のもとで荷重-変位曲線を算出した。結果を B シリーズと合わせて図-8 に示す。

図-8 より、応力-ひずみ曲線の面積を変化させることによって、同時に曲線の勾配も変化するために、荷重が多少異なる値を示したが、ほぼ同じ形状の荷重-変位曲線が得られ、応力-ひずみ曲線下の面積を  $1/2$  倍,  $1/3$  倍したほどの差異はみられなかった。したがって荷重-変位関係を算定する際には、部材断面のみかけの応力-ひずみ関係を破壊域の長さで連動させて設定することにより、荷重-変位関係の算定におよぼす応力-ひずみ関係あるいは破壊域の長さの影響を小さくすることができる。

#### 4. 結論

本研究においては、曲げを受ける SFRC の破壊過程のシミュレーションを行なった。実験で得られる SFRC 曲げ供試体の荷重-変位曲線をシミュレートし得る引張り域の応力-ひずみ曲線は比較的容易に得られるとともに、この応力-ひずみ曲線をもとに SFRC の曲げ破壊性状の検討が可能であることを示した。

引張り域の SFRC の応力-ひずみ曲線下の面積 ( $T$ ) と破壊域の大きさ ( $L$ ) との積 ( $T \times L$ ) が、いわゆる破壊靱性値と対応するとともに、SFRC の曲げ供試体の荷重-変位曲線をシミュレートする場合には設定した破壊域の大きさに応じて応力-ひずみ曲線の形状を変化させる必要があることを示した。

#### 参考文献

[1] 小柳 治, 六郷恵哲: コンクリートの破壊と靱性評価, コンクリート工学, V20, No.4, 昭和 57 年 4 月, PP.8-14.

表-2

破壊靱性値, 応力 ( $\sigma$ ) - ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線下の全面積ならびに破壊域の長さ

シリーズ名	マトリックス	破壊靱性値 $2\gamma$ (kgf/cm)	$\sigma - \epsilon$ 曲線下の全面積 $T$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	破壊域の長さ $L$ (cm)
A	普通コンクリート	6.51	2.21	3
B	高強度コンクリート	9.66	3.44	3
C	レジンコンクリート	38.6	10.6	4

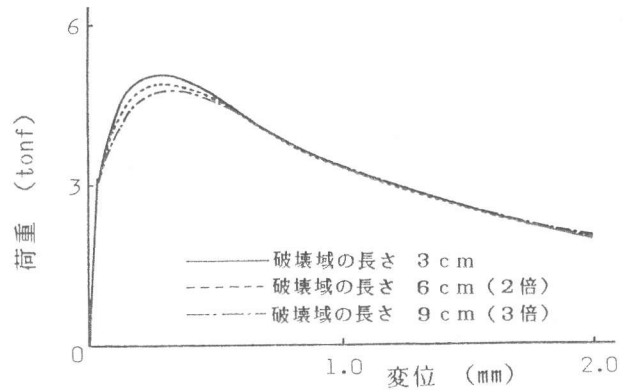


図-8 破壊域の長さが異なる場合の

荷重-変位曲線 (B シリーズ)