鋼繊維補強コンクリートばりの変形挙動に関する一弾塑性解析

メタデータ	言語: Japanese
	出版者:
	公開日: 2017-10-03
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 梶川, 康男, 江上, 良三
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/24480

鋼繊維補強コンクリートばりの変形挙動に関する一弾塑性解析

AN ANALYSIS OF FLEXURAL BEHAVIOR ON STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS

梶川康男*・江上良二**

By Yasuo KAJIKAWA and Ryohji EGAMI

Steel fiber reinforced concrete may improve the mechanical properties tensile strength, crack arrest, toughness and impact strength of plane concrete. These characteristics are caused by the bond between steel fibers and concrete matrix. This bond characteristic may be recognized obviously after the concrete matrix cracks in tensile region. From this, the stress-strain relationship after the cracks in tensile region can be assumed. In this study the stress-strain relationship with descending parts where the steel fiber are gradually pulled out is constructed based on the test of axially reinforced specimen. Using this stress-strain relationship with the descending parts and assuming the continuous stress releasing, the flexural behavior on steel fiber reinforced concrete beams is analysed by means of elastis-plastic finite element method. The load-deflection curves and the crack propergation are compared experimentally and analytically.

1．まえがき

引張りに弱いというコンクリートの欠陥を改善する鋼繊維補強コンクリートは、近年、土木学会より「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）」[1] が出され、今後、よりいっそう利用頻度も多くなり、また適用範囲も広がっていくものと思われる。従来、鋼繊維補強コンクリートの基礎的な材料特性や施工法などを把握するための研究[2),3)]が盛んに行われてきたが、構造部材に適用した場合の力学的特性に関する研究[3),4)]は、比較的少なく、さらに、有限要素法などの解析手法に鋼繊維の特性を考慮したものも少ないのが現状である。今後、構造部材としての適用が拡大していく鋼繊維補強コンクリート構造の解析においても鋼繊維の特性を考慮した弾塑性有限要素法が有力な解析手法の１つになるものと考えられる。

そこで、著者らは、鋼繊維補強コンクリートの変形挙動について弾塑性有限要素法の適用の妥当性を検討することとした。本研究では、まず鋼繊維補強コンクリートの引張両引き試験と鋼繊維補強した、コンクリートばりと鉄筋コンクリートばりの曲げ試験を行い、その特性について比較検討した。そして、現在広く用いられている弾塑性有限要素法に、鋼繊維補強コンクリートの特徴を組入れ、解析的にその挙動を追跡する一解析手法を提案するものである。

---

* 工博　金沢大学教授　工学部土木建設工学科（〒９２０金沢市小立野２－４０－２０）

** 工修　（株）熊谷組技術研究所第３技術部　（〒１６２東京都新宿区津久戸町１７－１）

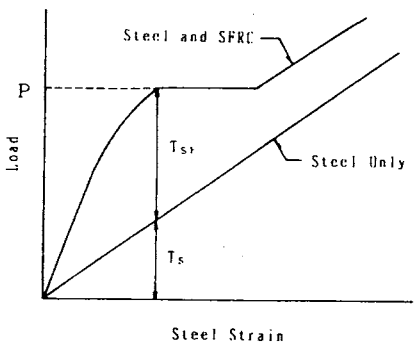
土木学会構造工学論文集，33巻Ａ，頁265～274（1987）より再録

２．鋼繊維補強コンクリートの応力－ひずみ関係

鋼繊維補強コンクリート（Steel Fiber Reinforced Concrete,以下ＳＦＲＣと略記）の圧縮応力－ひずみ関係は、最大応力到達後の応力下降域において鋼繊維混入による効果が少しみられる。しかし、弾性係数や圧縮強度は普通コンクリートと大差がなく、本研究で解析の対象としている構造の非線形性は、圧縮域での応力－ひずみ関係の非線形性よりも、ひび割れ発生による非線形性が支配的であると考えられるため、圧縮応力－ひずみ関係は最大応力到達後も普通コンクリートと同様に脆性体として扱うことにした。

一方、引張応力－ひずみ関係は、ＳＦＲＣの挙動を支配し、解析においても最も重要なものとなる。その関係は普通コンクリートと異なるところがあり、図－１の供試体に対し小林らの提案した両引き試験[5)]を行い、その結果より求めた。すなわち、鉄筋とコンクリートの付着を除く区間を中央に設け、単軸引張応力状態を作り出し、あらかじめ切欠きを設けた位置に支配的なひび割れがはいるようにするものである。鉄筋に貼付したひずみゲージの値と引張荷重との関係を図示すると、図－２のようになる。鉄筋が弾性体であるとすると、ある荷重Ｐは鉄筋によりＴs が、ＳＦＲＣによりＴsfが分担される。したがって、あらかじめ鉄筋の荷重－ひずみ関係を求めておけば、ＳＦＲＣの分担力Ｔsfを知ることができる。

実験に用いた鋼繊維の諸元を表１に示す。供試体はマトリックスをモルタルとし、水セメント比 52 %、標準砂を使用し、砂とセメントを２：１の重量比で混ぜあわせた鋼繊維補強モルタルとした。この供試体と後で示す曲げ供試体とでは骨材の影響による鋼繊維の分散状況は多少異なるが、付着性状はそれほど変化がないものと考えた。図－２の原理に従って、ＳＦＲＣの分担力を求め、その分担力をコンクリートの断面積で除したものを応力とし、その応力と鉄筋ひずみの関係を示すと、図－３のように表わされる。すなわち、この図より、鋼繊維補強コンクリートでは、マトリックスにひび割れが生じた後において、鋼繊維とマトリックスとの付着により、徐々に耐力を低下させながら鋼繊維が引き抜けていく傾向を捉らえることができる。なお、ここでのひずみには、ひび割れ幅をも含めているので、厳密な意味でのひずみとはいえないが、鉄筋ひずみをＳＦＲＣのひずみとした。図－３より、ＳＦＲＣの引張応力－ひずみモデルとしては、図－４のようにモデル化することが可能[6)]である。この図より特徴的なことは、引張りひび割れ開始後、応力低下がみられることであり、有限要素法を用いて解析を行う場合には、さらにつぎに述べるようなモデル化が必要となる。

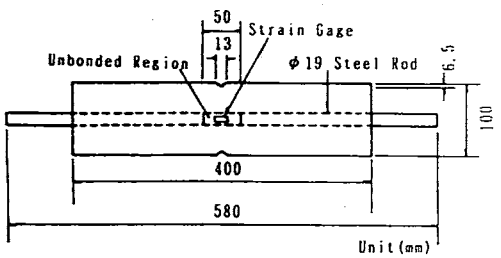


図－２　両引き試験での荷重とひずみ

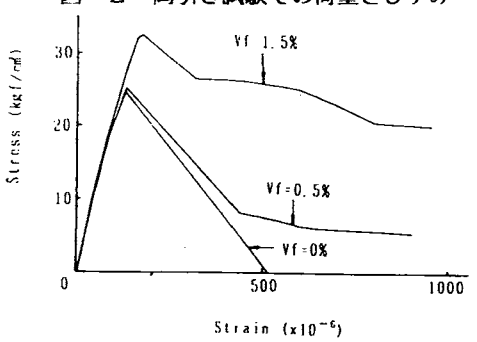
表１　使用した鋼繊維の諸元

公称長さ mm	断面 mm	公称断面積 mm²	アスペクト比	重量 mg
30	0.5X0.5	0.250	53	59

冷間圧延鋼板切断によるフラットなもの



図－１　両引き試験供試体



図－３　ＳＦＲＣの応力－ひずみ関係（実験結果）

3．応力低下域のモデル化と計算法

図－4における応力低下は、ＳＦＲＣの引張応力－ひずみ関係におけるひずみ軟化挙動とみることができる。一般にひずみ軟化材料においては、全ポテンシャルエネルギー関数はいくつもの局所最小点を持つことが予想され、それをたどって挙動するものであると考えられる。園田[7),8)]は、図－5に示すような、軸ひずみ ε_y で軟化がおこり、ε_{cr} で全応力を開放する材料について、トラスを例に全ポテンシャルエネルギー増分関数の最小化問題として、非線形計画手法によって解いている。この方法では応力低下域をφという線形軟化係数で表わしている。そして、ある値以上のφを持つ材料においては飛び移り現象がおこるとされている。そこで本解析では図－5の破線のように、$\varphi=\infty$ と考え、飛び移り現象がおこる点での不釣り合いな応力 $\sigma'=\sigma_y/n$ をn回繰り返し解放していくものとして解析を行った。その解析方法は以下の通りである。

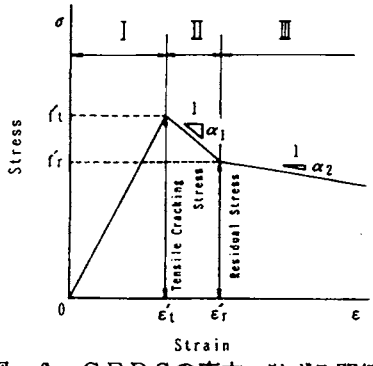
（1）まず、変位増分によって生ずる応力が σ_y に達したならば、$\sigma'=\sigma_y/n$ を不釣り合い応力として、σ' を構造物が変形しないようにして除く。この段階で、釣り合いを保つためには、σ' を生じさせる節点力に等価な拘束力を一時的に作用させなければならない。

（2）実際には、そのような力は存在しないので、大きさが等しく反対方向の力を作用させる。このとき、増分変位を与えていた節点は拘束節点としておく。

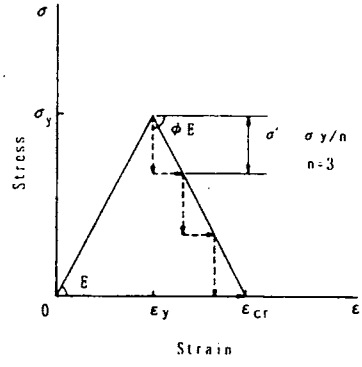
（3）（2）の結果生じた応力と節点力を、前段階までの応力と節点力に加える。

（4）つぎの段階で、あらたに変位増分を加えるとき、軟化域での剛性はゼロとみなす。

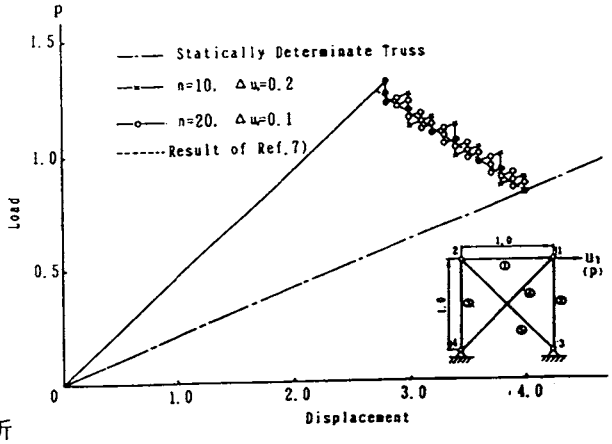
ここで、この解析方法の妥当性を検証するために文献7)のトラスを対象に解析を行った。 $EA=1.0$ ，$\sigma_y A=1.0$ ，$\varepsilon_y=1.0$ とすると $P=1.268$ ，$u_1=2.707$ で部材 ④ が最初に軟化領域に入る。図－5において、$\varphi=1$ とした場合の解析結果を図－6に示す。図中の一点鎖線は、部材 ④ がない静定トラスの場合の弾性解析結果であり、図中の×印は $n=10$ 、変位増分 $\Delta u_1=0.2$、○印は $n=20$、 $\Delta u_1=0.1$ とした場合の結果を示している。ここに、Δu_1 は節点1の水平変位増分である。また、図－6には文献7)の結果も示してあるが、本解析における各飛び移り点の中央を通っている。本数値計算法によって、Δu_1 を十分小さくとれば、ひずみ軟化構造の変位挙動を推定できることがわかった。



図－4　ＳＦＲＣの応力－ひずみ関係の理想化（文献6）



図－5　ひずみ軟化域での取り扱い



図－6　不静定トラスに対する解析例

4．弾塑性有限要素法を用いた解析モデル

鋼繊維補強コンクリートの解析にあたり，解析対象であるはりを，２次元の平面応力問題として

扱い、有限要素法を用いて解析することにした。以下に解析で仮定した材料のモデルを示す。

（1）コンクリートの塑性理論モデル

ここで用いた手法は、材料の応力ーひずみ関係を弾性成分と塑性成分に分け、塑性ポテンシャルを仮定し、構成則を流れ則と硬化則によって展開したものである。

a）降伏条件と構成則

鋼繊維コンクリートの降伏条件は通常のコンクリートと変らないものとし、のちに示す破壊条件に相似であるとした。具体的には次式で示されるような Drucker-Prager の降伏条件を用いた。[9]

$$f(I_1,J_2)=\alpha I_1+\sqrt{J_2}-k=0 \qquad (1)$$

ここに、 $I_1=\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z=\sigma_{ij}$ で3次元応力を σ_{ij} としたときの応力第1不変量であり、J_2 は $S_{ij}=\sigma_{ij}-1/3\sigma_{kk}\delta_{ij}$（ δ_{ij} はクロネッカーのデルタ）として表わされる偏差応力を用いて、$J_2=1/2S_{ij}S_{ji}$ で表わされる偏差応力第2不変量である。$f=0$ は塑性状態を、$f<0$ は弾性状態を示す。ここで、SFRCの圧縮挙動は通常のコンクリートと変らないとし、2次元応力平面にこの降伏曲面を Kupfer ら[10]の実験結果より得られた破壊条件を参考にして、1軸降伏強度 f'_c と等2軸降伏強度 $f'_{bc}=1.16f_c'$ とにおいてマッチングさせると、 $\alpha=0.07$, $k=0.507f_c'$ となる。

つぎに、塑性理論より、塑性時の増分応力$\{d\sigma\}$と増分ひずみ$\{d\varepsilon\}$の関係は、塑性ポテンシャルが降伏条件式と等しいとする Associated Flow Rule の仮定を用いると次式のように表される。

$$\{d\sigma\}=\left([D^e]-\frac{[D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T[D^e]}{H'+\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T[D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}}\right)\{d\varepsilon\} \qquad (2)$$

ここに、$[D^e]$ は弾性応力ーひずみマトリックスであり、また、H' はひずみ硬化率で、相当応力 $\bar{\sigma}$ と、相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_p$ の勾配（$d\bar{\sigma}/d\bar{\varepsilon}_p$）より求まる。ここでは、相当応力、相当塑性ひずみを1軸応力ーひずみ関係に帰着できるように、次式で定義した。

$$\bar{\sigma}=\frac{\sqrt{3}\,\alpha I_1+\sqrt{3J_2}}{1+\sqrt{3}\,\alpha} \qquad (3)$$

$$d\bar{\varepsilon}_p=\frac{\alpha+\frac{1}{\sqrt{3}}}{\sqrt{3\alpha^2+\frac{1}{2}}}\sqrt{d\varepsilon_{ij}^P\,d\varepsilon_{ij}^P} \qquad (4a)$$

$$d\varepsilon_{ij}^P=\{d\varepsilon_p\}=\frac{\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T[D^e]}{H'+\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T[D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}}\{d\varepsilon\} \qquad (4b)$$

$$\bar{\varepsilon}_p=\int d\bar{\varepsilon}_p \qquad (4c)$$

そして、1軸圧縮における$\bar{\sigma}$と $\bar{\varepsilon}_p$ の関係をSFRCの圧縮試験よりもとめ、次式で表わされる指数型曲線で近似した。

$$\bar{\sigma}=\tau_0+(\tau_u-\tau_0)\left\{1-\exp\left(-\frac{E'}{\tau_u-\tau_0}\bar{\varepsilon}_p\right)\right\} \qquad (5)$$

ここに、 τ_0= 初期降伏曲面に対する相当応力

τ_u= 破壊曲面に対する相当応力

E' = 初期接線弾性係数

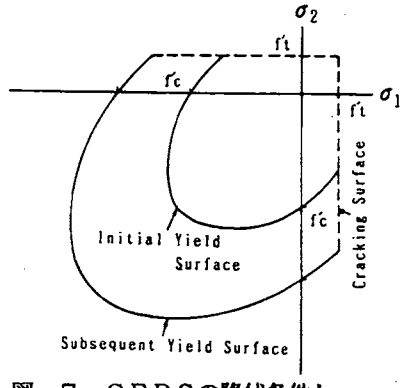
また、ＳＦＲＣでは、最大圧縮応力到達後に下降部を有するが、ここでは最大圧縮応力で圧潰するとした。

ｂ）ひび割れ条件とひび割れのモデル化

鋼繊維補強コンクリートの引張主応力の最大値が、図－４のひび割れ開始応力 f_t' になると、マトリックスに引張主応力と直角方向にひび割れが生ずるとした。すなわち、次式で表される条件式を用いることとした。

$$f(I_1,J_2,\theta)=2\sqrt{3}\sqrt{J_2}\cos\theta+I_1-3f_t'=0 \qquad (6)$$

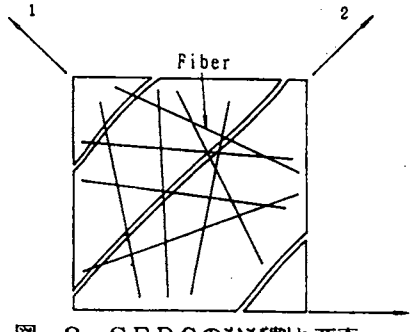
ここに、I_1, J_2 は前述のものであり、θ はJ_3が $S_{ij}S_{jk}S_{ki}/3$ であらわされるとき $\cos3\theta=3\sqrt{3}J_3/2J_2^{3/2}$ で表わされるθ である。２次元主応力平面に降伏条件と、ひび割れ条件を図示すると、図－７のようになる。なお、本研究では、ひずみ硬化率 H' を持った等方硬化を仮定している。



図－７　ＳＦＲＣの降伏条件とひび割れ条件

つぎに、ひび割れのモデル化は、ひび割れ要素を直交異方性化し、要素全体にひび割れが入るとする Smeared Crack モデル[9]を用い、マトリックスにひび割れが生じた後の構成式は、つぎのように表されるものとした。

$$\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \tau_{12}\end{Bmatrix}\begin{bmatrix}0&0&0\\0&E&0\\0&0&\beta G\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \gamma_{12}\end{Bmatrix} \qquad (7)$$

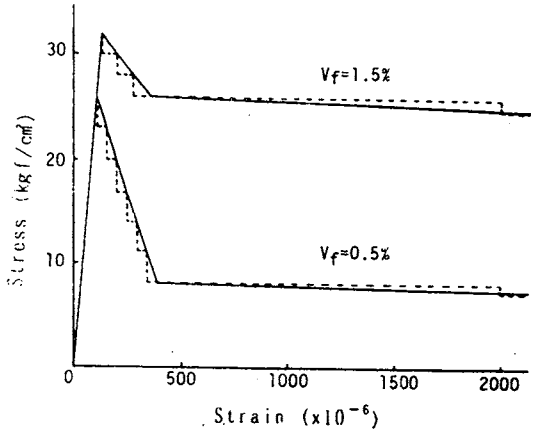


図－８　ＳＦＲＣのひび割れ要素での直交異方性化

ここに、σ_1，σ_2は図－８のように主応力方向を示し、E は弾性係数、G はせん断弾性係数をしめす。なお、β はせん断剛性の低下率で、$0\leqq\beta\leqq1$ の値をとる。この値は骨材のかみ合い作用や鋼繊維による影響などによりはっきりとは決めることができないが、ここでは、ひび割れ直角方向のひずみが 400μまでをβ=0.6、それ以上ではβ=0.2 とした。

（２）鋼繊維を含む要素のモデル化

つぎに、図－３より得られるＳＦＲＣの引張応力－ひずみ関係は、マトリックスにひび割れがはいった後においても、鋼繊維とマトリックスの間の付着のため応力－ひずみ関係に下降域を示すという特徴を有する。そこで、３．で示した応力低下域に対する解析方法を適用することにした。まず、図－３で得られた応力－ひずみ関係を、図－９の実線のように理想化した。したがって、この図はひび割れ直角方向の応力－ひずみ関係をモデル化したことになり、マトリックスにひび割れがはいった後は、図中の破線のように、σ_{cn} を不釣り合い応力として、σ_{cn} を等価な節点力になおし



図－９　解析に用いたＳＦＲＣの応力－ひずみ関係

順次解放するという手法をとった。すなわち、解析のある段階におけるひび割れ直角方向の応力が、$\sigma_n=\sigma_{cn}+\sigma_{rn}$ であるとすると、要素内応力は、

$$\{\sigma\}_n=\{\sigma_c\}_n+\{\sigma_r\}_n \qquad (8)$$

と表わされる。そして、この $\{\sigma_c\}_n$ が不釣り合いな応力であり、節点力におきかわる解放応力ベクトルとなる。本解析では、変位制御による増分解析をおこない、解放応力を作用させるときは変位増分をさせずに等価な節点力のみを作用させた。

（３）鉄筋のモデル化

鉄筋に対しても、前述のように降伏条件を定め、塑性理論より Associated Flow Rule の仮定を用い構成則を表わした。まず、降伏条件であるが、金属などに広く用いられている次式で示される von-Mises の降伏条件式を用いた。

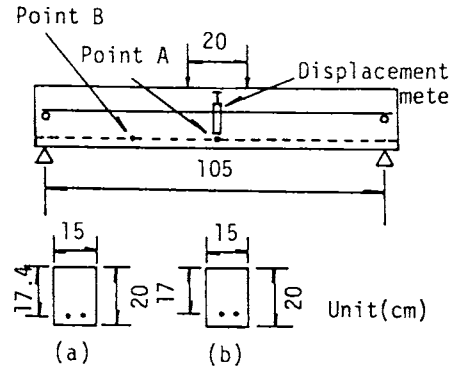
$$f(J_2)=\sqrt{3J_2}-\sigma_y=0 \qquad (9)$$

ここに、σ_y は１軸降伏応力である。また、構成則は式（９）での f を式（２）に代入することによって得られる。ここでは、鉄筋の応力－ひずみ関係は bi-linear であるとし、ひずみ硬化率 H' は一定であるとした。

５．鋼繊維補強コンクリートばりの曲げ試験

今回、図－１０に示すような、断面20cm x15cm、長さ120cm の単鉄筋矩形ばりを用いた。図－１０(a) は鉄筋に異形鉄筋 D-13(SD-30)を２本、(b)は D-19を２本用いたものであり、(a) の供試体では、鉄筋比が　0.845 %、(b)では 1.91%である。また今回は、解析手法の妥当性を検討するために、鋼繊維の種類は表１の一種類のみとした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、骨材の最大寸法を15mmにそろえ、水セメント比52%とし、混和剤などは用いなかった。また鋼繊維の体積混入率（Ｖｆ）は０%、０．５%、１．５%の３種類とし、はりの全断面を鋼繊維補強コンクリートとした．供試体は、打設後２８日間実験室で湿空養生したのち、実験を行った．

載荷方法は、スパンを 105cmとし、２点載荷を行った。また、支間中央点における変位と、点Ａ、点Ｂにおける鉄筋軸方向ひずみを測定した。なお、鉄筋を入れずに鋼繊維のみを混入したはりについても同様な実験を行った。



図－１０　ＳＦＲＣばりの曲げ試験

表２　解析に用いたＳＦＲＣの諸定数

弾性係数	280000 kgf/cm^2
ポアソン比	0.2
引張強度	32 kgf/cm^2(Vf=1.5%) 28 kgf/cm^2(Vf=0.5%)
圧縮強度	382 kgf/cm^2
残余応力	26 kgf/cm^2(Vf=1.5%) 8 kgf/cm^2(Vf=0.5%)
解放応力	2 kgf/cm^2(Vf=1.5%) 1 kgf/cm^2(Vf=0.5%)

６．解析結果と実験結果との比較

ここで、数値解析結果を実験結果と合せて示し、実験結果と解析結果を比較検討する。まず、解析に用いた仮定と、諸定数を表２に示す。図－９は、図－３より得られた実験結果をもとに仮定した引張応力－ひずみ関係を示す。図中の破線はさらに解析で仮定したものである。図－４の f_t' を引張強度、f_r' を

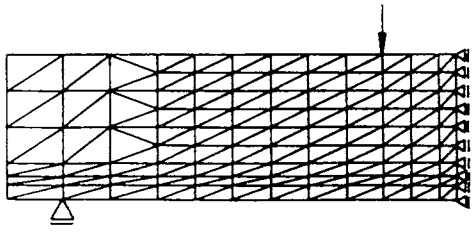
残余応力とし、その後はあるひずみ値における解放応力として、表2の諸定数を用いた。圧縮強度、弾性係数、ポアソン比は圧縮試験より得られた値であり、弾性係数は3分の1割線弾性係数である。図－11には有限要素分割を示す。供試体左半分について解析を行い、 121節点 201要素の三角形一次要素である。

(1) 鋼繊維を混入しないＲＣばり

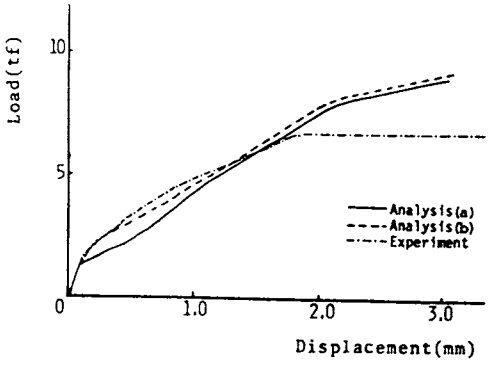
本解析で用いた弾塑性有限要素プログラムの検証も含めて、最初に鋼繊維を混入しないＲＣばりに対する解析結果を実験と比較する。図－12には鋼繊維を混入しない鉄筋コンクリートばり(D-13)において、コンクリートがその引張強度に達したときの解放応力を、図－13のように引張応力すべてとした場合(a) と、引張応力－ひずみ関係に応力低下域を考慮した場合(b) における荷重－変位関係を示す。図－12より、コンクリートの引張り応力－ひずみ関係を図－13(b)のように仮定したほうが、ひび割れが生ずる荷重あたりにおいて、実験とよく一致する。これは、ひび割れがはいることにより、コンクリートの引張応力が、鉄筋へと徐々に分担されていく、いわゆる、Tension stiffening（引張硬化）現象[9),11)] によるものであると考えられる。このことは、本研究で用いたようなコンクリートのモデルでは、ひび割れ後にコンクリートの引張応力のすべてを解放するのではなく、応力低下域を考慮した方がＲＣばりの挙動をよく説明できることが明らかとなった。

(2) 鋼繊維補強無筋コンクリートばり

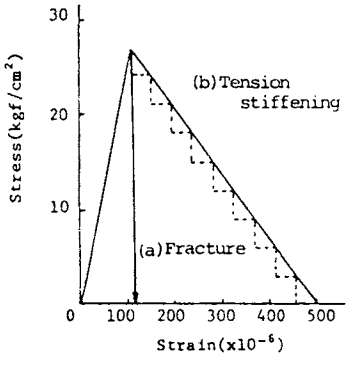
鉄筋で補強しないで、鋼繊維のみを混入したコンクリートばりの荷重と変位の関係を図－14に示した。この結果、鋼繊維の効果を3．で示したような応力低下域のモデル化として表すことにより、鋼繊維の混入率の違いによる影響や、最大荷重到達後の挙動をある程度追跡することが可能であることがわかった。



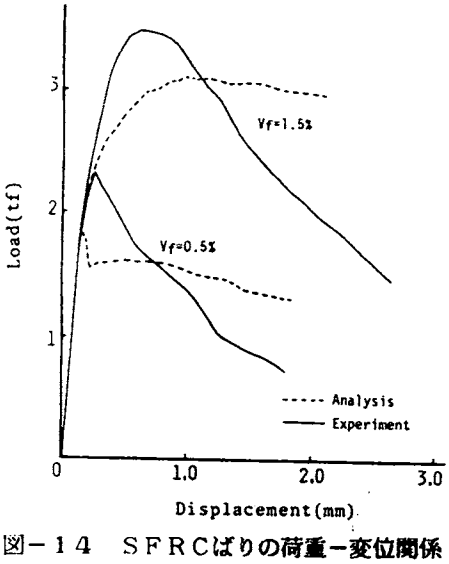
図－11　有限要素分割



図－12　ＲＣばりの荷重－変位関係



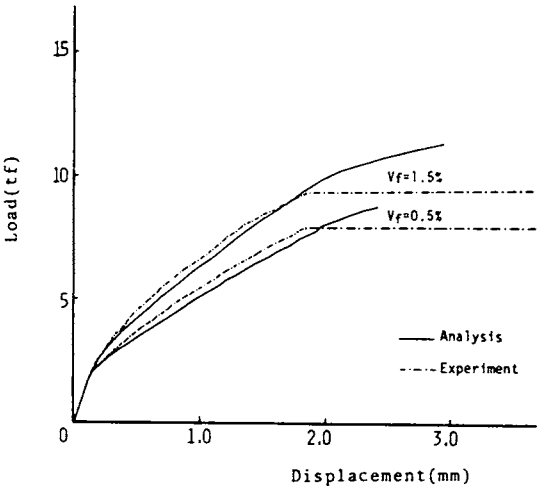
図－13　解放応力の取り扱い



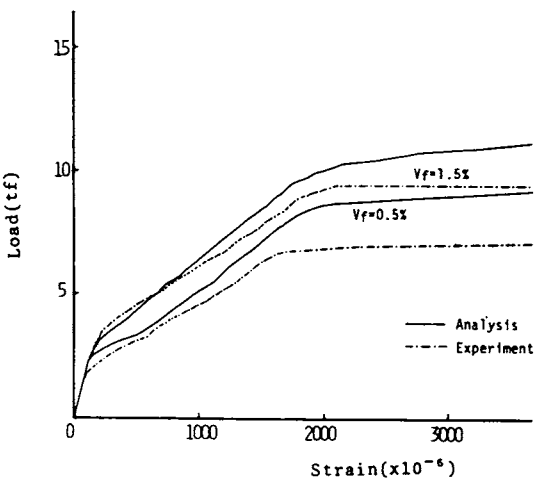
図－14　ＳＦＲＣばりの荷重－変位関係

(3) D-13を用いた鋼繊維補強鉄筋コンクリートばり

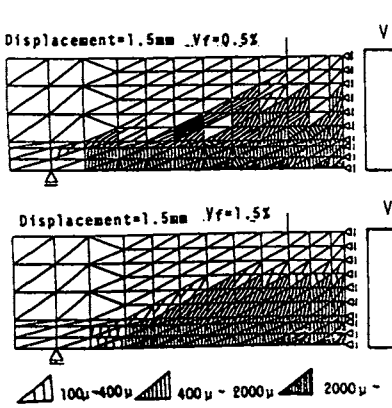
D-13の鉄筋を用いたはりについて結果を示す。図－１５には荷重とスパン中央点での変位の関係を示す。図－１６には荷重と支間中央の点Ａでの鉄筋ひずみとの関係を、図－１７には、変位が 1.5 mm に対応する計算結果より得られたひずみ状況を示す。図－１８には、実験結果より得られたクラック状況を示す。図中の数値は図－１５の変位（単位は mm ）に対応する。このはりでは、鉄筋比が 0.845 % と小さいために曲げ破壊を起し、最大耐力は、Vf = 0.5 % のときは 7.6 tf 、Vf = 1.5 % のときは 8.8 tf であった。鋼繊維を入れないＲＣばりに較べて、0.5 %の混入で 0.4 tf 、1.5 %の混入では 1.6 tf と約２割の増大が認められる。解析においても、鋼繊維混入による効果がはっきりと現れ、実験結果と同様に、鉄筋降伏荷重で約２割ほど増大している。解析結果では実験結果のようにクラックを線として見ることはできないが、図－１７と図－１８のクラック状況を比較してみると、解析におけるひずみ量が 400μ～2000μの値が実験における目視ひび割れの値となるようである。また鋼繊維の含有率により異なり、実験では目視ひび割れのみを示しているのであまりよくはわからないが、解析では Vf = 1.5 %のほうがひび割れの分散性がよいようである。また、本解析では鉄筋とコンクリートは完全に一体化しているとし、付着すべり挙動は考慮していない。この影響は鉄筋要素を bi-linear で仮定していることと相まって、鉄筋が降伏する荷重近くから現れる。すなわち、荷重－変位関係において、解析では



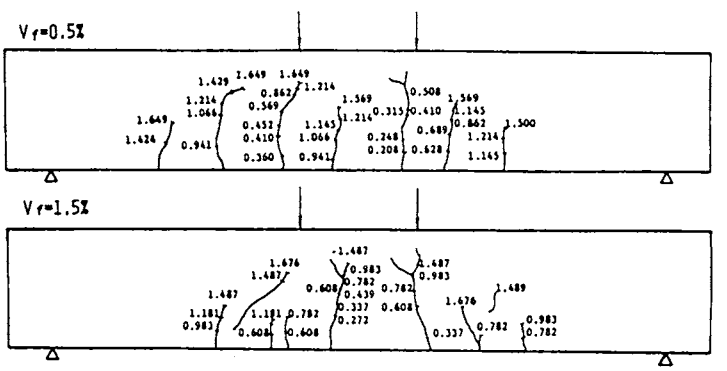
図－１５　D13鉄筋のSFRCばりの荷重－変位関係



図－１６　D13鉄筋のSFRCばりの荷重－ひずみ関係



図－１７　引張ひずみの状況

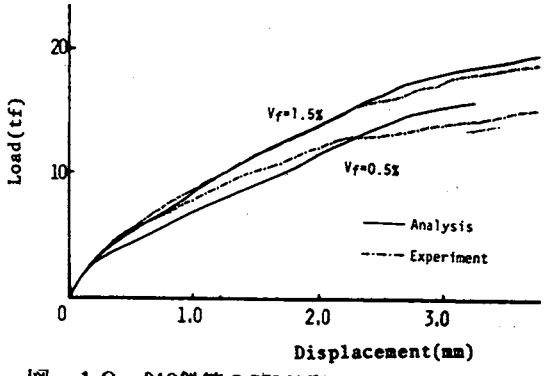


図－１８　Ｄ１３鉄筋のＳＦＲＣばりのひび割れ状況（実験）

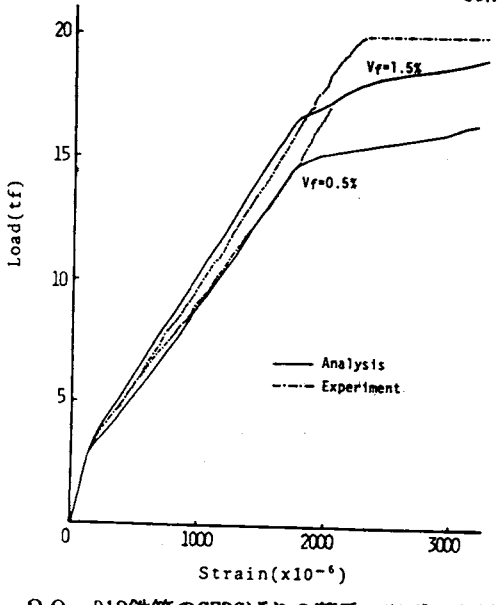
鉄筋降伏後も荷重が増加することや、荷重－鉄筋ひずみの関係においても、鉄筋降伏荷重近くでは実験における鉄筋ひずみの増加が、解析よりも大きいことなどでこの影響が現れている。

(4) D-19を用いた鉄筋コンクリートばり

つぎに、D-19の鉄筋を用いたはりについて結果を示す。図－１９には荷重－変位関係を、図－２０には荷重－鉄筋ひずみ関係を、図－２１と図－２２にはクラック状況を示す。このはりは鉄筋比が大きいため、鋼繊維の混入率にかかわらずすべてせん断破壊をした。しかし、図－１９と図－２０により、鋼繊維の効果はそれほど大きくないことがわかる。また、解析においても、はりがせん断破壊をおこすまではよくその挙動をとらえているが、せん断破壊については本研究の現状の解析法では追跡できない。



図－１９　D19鉄筋のSFRCばりの荷重－変位関係

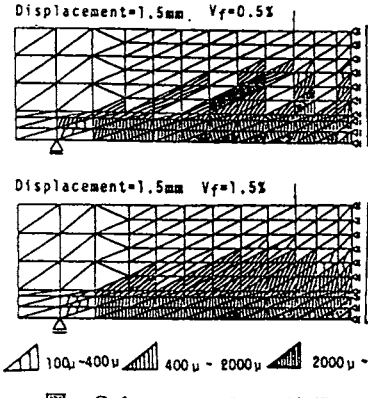


図－２０　D19鉄筋のSFRCばりの荷重－ひずみ関係

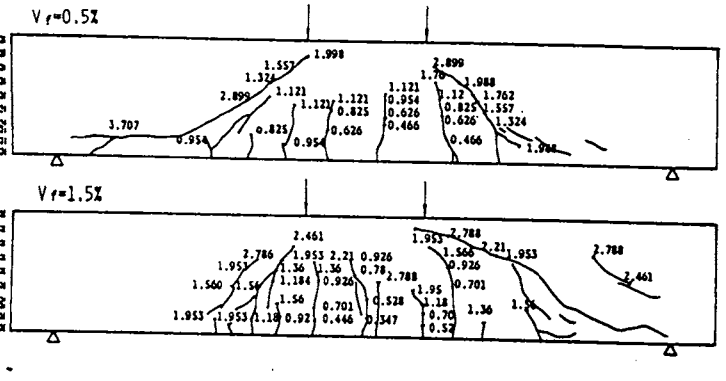
７．まとめ

本研究では、鋼繊維補強鉄筋コンクリートの変形挙動解析の手法の１つとして、弾塑性有限要素法の適用の妥当性を検討したものである。その結果、つぎの点が明らかとなった。

(1) 両引き試験より得られた結果を鋼繊維補強コンクリートの引張応力－ひずみ関係とすることが可能であり、ひび割れ開始後の鋼繊維の耐力低下を変位増分解析による応力解放の繰返しとみなすことによって有限要素モデルに採り入れることの妥当性が検討できた。



図－２１ 引張ひずみの状況



図－２２　Ｄ１９鉄筋のＳＦＲＣばりのひび割れ状況（実験）

(2) 本解析によって Tension stiffening （引張硬化）現象を考慮して解析することが可能であり、鋼繊維を混入しないＲＣばりにおいて、その妥当性が確認できた。

(3) 鉄筋比の小さい鉄筋コンクリートばりでは、実験において、たわみ量の減少、ひび割れの分散など鋼繊維の効果がよく現れ、解析においても同様な傾向を把握できた。

(4) 鉄筋比の大きい鉄筋コンクリートばりでは、せん断引張型の破壊を示し、鋼繊維による効果はせん断耐力の増加にあらわれる。解析においても、せん断力によるクラックの発生がうかがえるが、せん断引張破壊を予測することはできず、せん断破壊をするはりの解析手法については、今後さらに検討が必要である。

(5) 鋼繊維の混入による最大の利点とされているじん性の改善については、本研究でのモデル化の範囲では評価できない。このじん性評価については大きな変形まで追跡できる新しい有限要素モデルが必要であると考えられ、今後の課題であろう。

以上、本研究において提案したモデルを使用すれば、鉄筋比が小さく、曲げ破壊を起こすようなものについては、鋼繊維混入による効果を解析的に求め得ることが十分可能であることが確認できた。さらに、せん断引張破壊やじん性の評価に対してモデルを検討するとともに、他の繊維を含む繊維補強コンクリートの有限要素モデルを検討することにより、今まで構造要素だけに着目してきた繊維補強コンクリートの解析がより複雑な形状をもつ構造物に対しても可能となるであろうと確信している。

最後に、本研究を進めるにあたり有益な助言をいただいた金沢大学工学部吉田　博教授に感謝いたします。

参考文献

1) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）、コンクリートライブラリー、第50号、1983.

2) 小林一輔：繊維補強コンクリート、オーム社、1981.

3) ACI Committee 544:Proceeding of International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, ACI,1984.

4) 原田修輔、二羽淳一郎、岡村甫：鋼繊維補強コンクリートばりのせん断耐荷力、土木学会論文集第348号, pp. 87－93, 1984.

5) 小林一輔、趙力采：鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能の試験方法、土木学会論文集第300号、pp. 109－119, 1980.

6) 小林一輔、魚本健人、西村次男、古越仁：鋼繊維補強鉄筋コンクリート部材の曲げ特性に関する研究、繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集、pp. 39－46、1984.

7) 園田恵一郎：ひずみの軟化構造の非線形解析に対する最小エネルギー探査法、土木学会第35回年次学術講演論文集、I-37、pp. 73－74、1980.

8) Sonoda,K:Bending Analysis of Strain-Softening Beams,Proc.of JSCE,No.337,pp.205-210,1983.

9) Chen,W.F：Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill, 1982.

10) Kupher Helmut, Hilsdorf, Huber K., Rusch, Hubert：Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses, ACI Journal, Vol.66, pp. 656－666, 1969.

11) 吉川弘道、田辺忠顕：鉄筋コンクリート部材の引張剛性に関する解析的研究、土木学会論文集第366 号、pp.93-102,1986.

（１９８６年１０月１７日受付）