

# [117] 鋼繊維補強コンクリートを用いた梁の曲げ性状に関する基礎的研究

正会員 ○古 越 仁 (東京大学大学院)

正会員 魚 本 健 人 (東京大学生産技術研究所)

正会員 西 村 次 男 (東京大学生産技術研究所)

## 1. まえがき

鋼繊維補強コンクリートのすぐれた曲げ引張特性を活用して構造部材を設計する場合には、その曲げ引張特性をモデル化することが不可欠である。しかし、鋼繊維補強コンクリートの曲げ引張性状を十分に説明できるモデルは未だ提案されていない。本研究は両引き試験方法による鋼繊維補強コンクリートの引張域における応力-歪関係の実験結果を基にして引張応力-歪関係をモデル化し、無筋コンクリート梁として用いられた鋼繊維補強コンクリートの曲げ性状について検討を加えたものである。

## 2. 実験の概要

実験は、両引き試験、梁の曲げ試験および圧縮・曲げ強度試験を行なった。使用材料を表-1に示す。配合は水セメント比50%とし、鋼繊維混入率を0から2%の間で変化させた。配合と強度試験の結果を表-2に示す。

両引き試験に使用した供試体は図-1(a)に示すもので、材令4週まで水中養生をした後に試験を行なった。なお、引張載荷速度は曲げ試験の緑応力の増加と同じになるように定めた。

梁の曲げ試験に使用した供試体は図-1(b)~(d)に示すように、梁高さは5cm、10cmの2種類で、(b)は10cmの載荷板による集中載荷、(c)は等モーメント区間10cmの2点載荷、(d)は3等分点2点載荷とした。養生は、(b)と(c)については材令2週まで水中養生した後湿布養生とし、(d)は材令4週まで水中養生を行なって、材令4週から6週の間で載荷した。

## 3. 両引き試験の結果

本研究では鋼繊維補強コンクリートの引張特性を実験で求めるために、両引き試験方法を利用した。両引き試験によって鋼繊維補強コンクリートの引張応力を直接求めることはできないが、引張荷重からその時の鉄筋歪に相当する鉄筋の引張荷重を差引いたものを鋼繊維補強コンクリートの分担荷重と考えた。

両引き試験により得られた鋼繊維補強コンクリートの引張応力-鉄筋歪の関係を図-2に示す。この結果から次のことが言える。

- (1) ひびわれ発生までの応力-歪関係は、鋼繊維混入率にかかわらず一定の挙動をするものとみなせる。

表-1 使用材料

|      |                            |
|------|----------------------------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント               |
| 細骨材  | 川砂、比重 2.64、FM 2.95         |
| 粗骨材  | 砕石、 $G_{max}$ 15mm、比重 2.71 |
| 鋼繊維  | 異形カットワイヤー、 $\phi$ 0.5x30mm |

表-2 コンクリートの配合および試験結果

| W/C (%) | Vf (%) | W (kg/m <sup>3</sup> ) | C (kg/m <sup>3</sup> ) | S/A (%) | slump (cm) | 圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 曲げ強度 (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|--------|------------------------|------------------------|---------|------------|----------------------------|----------------------------|
| 50      | 0      | 195                    | 390                    | 4.8     | 9.0        | 536                        | 51.5                       |
|         | 0.5    | 206                    | 412                    | 4.9     | 10.0       | 560                        | 53.7                       |
|         | 1.0    | 218                    | 436                    | 5.9     | 9.7        | 581                        | 76.5                       |
|         | 2.0    | 244                    | 488                    | 7.8     | 11.0       | 544                        | 104.0                      |

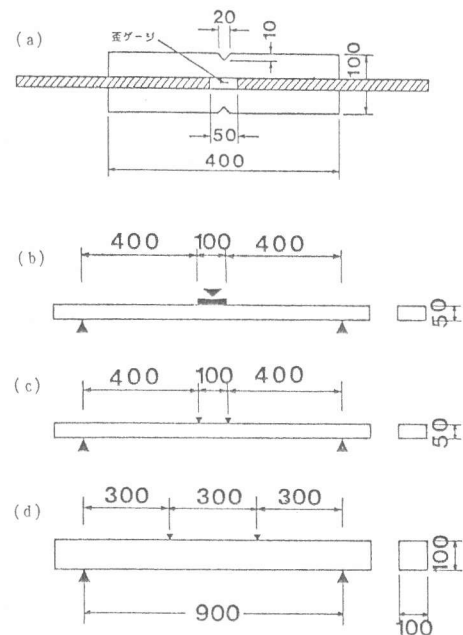


図-1 供試体の寸法

- (2) ひびわれ発生後は急速に耐力が低下するが、この時の勾配は鋼繊維混入率によらずほぼ一定である。これは主として荷重速度およびひびわれの進展速度によって決まると考えられる。
- (3) ひびわれ発生後に安定する応力は鋼繊維混入率によって差がある。
- (4) 耐力が安定した後は歪の増大に伴って耐力が漸減する。(混入率2%の場合は、ひびわれ発生後に供試体が偏心した為に耐荷機構が変わったものと考えられる。)

#### 4. 引張域の応力-歪関係のモデル化

両引き試験の結果を基にして、曲げ応力の計算に使用する鋼繊維補強コンクリートの引張応力-歪関係を図-3に示すようにモデル化した。即ち、このモデルは引張弾性係数、引張ひびわれ開始応力、残留応力と2つの応力低下勾配の、合計5つの定数と直線によって構成されるものとした。

一方、圧縮応力-歪関係については、popovicsの式を使用した。<sup>1)</sup>

$$\sigma_c = \sigma_{c \max} \times n \times (\epsilon / \epsilon_{co}) / \{ (n-1) + (\epsilon / \epsilon_{co})^n \}$$

ここで  $\sigma_{c \max}$  : 最大圧縮応力  
 $\epsilon_{co}$  : 最大圧縮応力時の歪  
 $n$  : 定数

以上により、ひびわれ発生後も歪の平面保持が成り立つものとして各歪レベルにおける最大曲げモーメントを計算することとした。

#### 5. 有効繊維混入率

梁の曲げ性状を説明するためには、モデル中の定数と繊維混入率や繊維の分散、配向等との関係を明らかにすることが重要と考えられる。本研究では供試体の破面の繊維本数を指標として表わすことを考えた。

小林<sup>2)</sup>は、破断面と任意断面の鋼繊維の分散特性を比較して、破断面の平均繊維本数は任意断面のその2/3程度に留まり、この割合は繊維の長さによって差のあることを示した。このことから鋼繊維補強コンクリートの強度に影響を与えるのはばらつきを考慮して修正した繊維混入率であると考えた。本研究はこの考え方に基づいて繊維長さ、寸法、分散等を考慮した繊維混入率として有効繊維混入率( $V_d$ )を考えた。本研究では、有効繊維混入率を便宜的に繊維寸法・載荷条件が同一の既往の実験による破面の繊維本数を利用して求めた。図-4にその一例を示す。図中の点線はばらつきの目安で、破面の繊維本数の分布の標準偏差に相当する幅である。なお、配向係数は型枠の影響を考慮して次式により求めた。

$$\beta = \{ K_1 L^2 + K_2 L (B+H-2L) + K_3 (B-L)(H-L) \} / BH$$

ここで  $B, H$  : 型枠の幅および高さ

$L$  : 繊維長さ

$$K_1 = 0.82, K_2 = 0.64, K_3 = 0.50$$

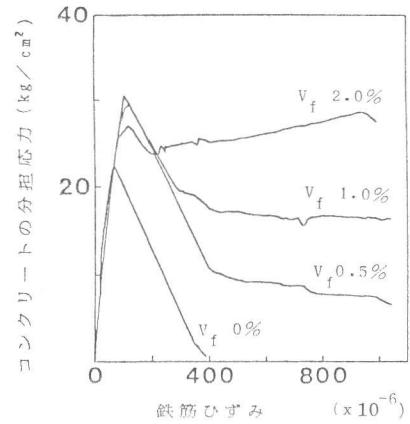


図-2 両引き試験の結果

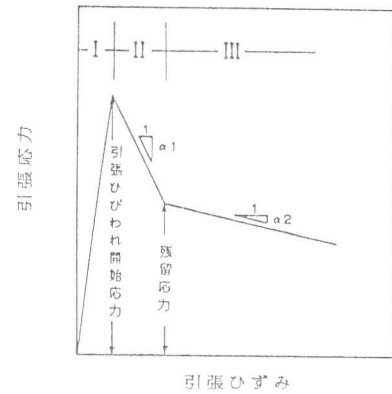


図-3 鋼繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみモデル

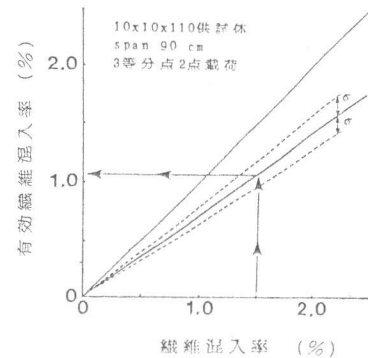


図-4 有効繊維混入率と繊維混入率の関係

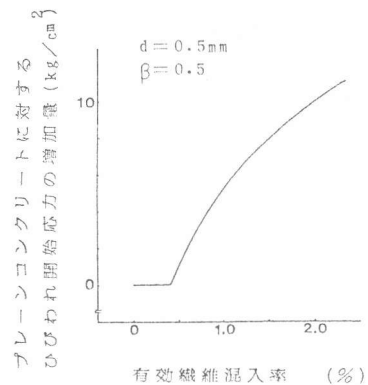


図-5 ひびわれ開始応力の増加量

## 6. モデル中の各定数の値

曲げ応力の計算に使用する鋼繊維補強コンクリートの引張応力-歪モデル中の定数の値を以下のように定めた。

引張弾性係数は  $3.0 \times 10^5$  とした。また、引張ひびわれ開始応力 ( $\sigma_{tc}$ ) については、既往の研究から小林・趙<sup>3)</sup>の提案による次式を適用した。ただし繊維混入率は有効繊維混入率 ( $V_d$ ) を用いることとした。

$$\sigma_{tc} = K \left( 1/\sqrt{S} - 1/\sqrt{S_c} \right) + \sigma_m$$

$$S = 5\sqrt{\pi/\beta} \times d/\sqrt{V_d}$$

ここで  $\sigma_m$  : マトリックスの引張強度

K : 主として鋼繊維のマトリックスとの付着強度によって決まる定数

S : 鋼繊維の平均間隔

$S_c$  : 鋼繊維が補強効果を生ずる下限値

有効繊維混入率と引張ひびわれ開始応力の関係を図-5に示した。

残りの3つの定数については次の様にして求めた。即ち、定数を仮定することによって計算される曲げ応力-圧縮緑歪の関係が、梁の曲げ試験による実測結果に合うように各定数の値を変化させて、その最適な組合せを求めた。こうして求めた定数の値とその供試体の破面の繊維本数の関係を図6~8に示した。

図-6は残留応力と破面の繊維本数の関係であるが、残留応力はマトリックスの耐力が失われた後の耐力であるから基本的には繊維量に比例すると考えられるので、残留応力と破面の繊維本数は比例関係にあると考えた。また、図-7は応力の低下勾配 $\alpha_1$ と破面の繊維本数の関係を示したもののだが、繊維混入率が1%を超える場合には曲げ応力に与える影響が認められないので除外し、1%以下の結果から定数と考えた。この値は両引き試験の場合に比べて小さい値となっているが、これは鉄筋の有無によって変形拘束性能に差があるためと考えられる。図-8は応力の低下勾配 $\alpha_2$ と破面の繊維本数の関係である。これは

繊維混入率1%未満の場合には影響が微少のため、1%以上の結果から直線と考えた。

破面の繊維本数の期待値は有効繊維混入率、配向係数、繊維の径によって定まるので、以上の方法でモデルの各定数の値を求めることができる。

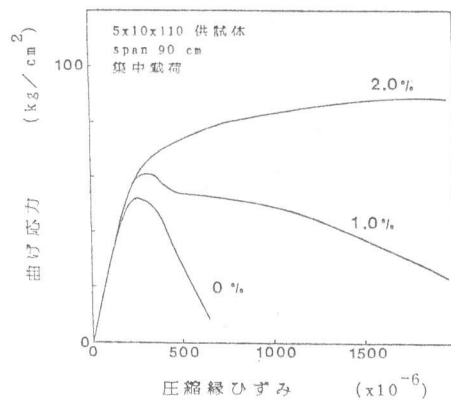


図-9 曲げ応力と圧縮緑ひずみの関係 (実験値)

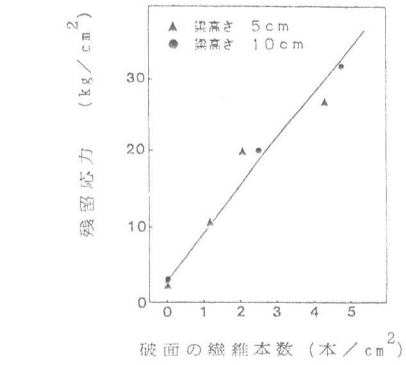


図-6 残留応力と破面の繊維本数の関係

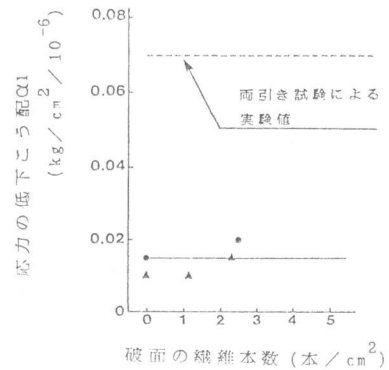


図-7 応力の低下勾配 $\alpha_1$ と破面の繊維本数の関係

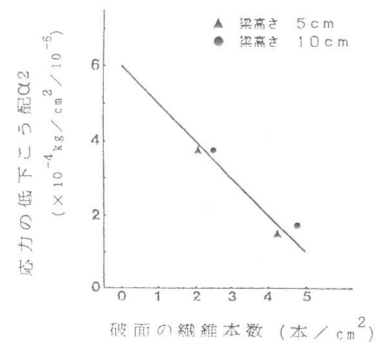


図-8 応力の低下勾配 $\alpha_2$ と破面の繊維本数の関係

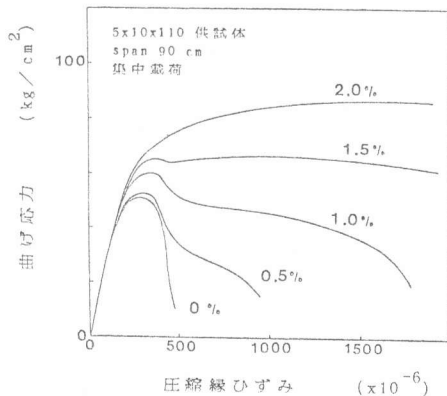


図-10 曲げ応力と圧縮緑ひずみの関係 (計算値)

## 7. 計算の結果

以上の方法で求めた曲げ応力と圧縮緑歪の計算値の一例を図-10に示す。これは図-9に示した実験値とよく一致している。両者に若干の相違があるのは、供試体の破面の繊維本数が必ずしも期待本数と一致しないためであると考えられる。

図-9において鋼繊維混入率の違いに着目すると、曲げ応力が最大となる時の圧縮緑歪は鋼繊維混入率によって2つに分類される。即ち、1%以下の場合の様に圧縮緑歪が比較的小さいケースと、2%の様に $1000 \times 10^{-6}$ を超えてから曲げ応力が最大となるケースがある。それぞれのタイプについて鋼繊維補強コンクリートの引張応力-歪モデルの定数の値との関係に着目すると、前者については引張ひびわれ開始応力が、後者については残留応力の影響がそれぞれ大きいことがわかった。つまり、ひびわれ拘束性能と鋼繊維の引き抜け抵抗のいずれが卓越するかによって耐荷機構が変わると考えられる。図-11は曲げ強度のブレンコンクリートに対する比と有効繊維混入率の関係の一例である。これは従来報告されている実験結果と傾向的によく一致しており、耐荷機構の違いによる補強効果の差が明らかで、これをモードIとモードIIに分類することができる。

また図-12は同様に計算した曲げ破壊過程における中立軸位置を示したものである。この図からも曲げ応力が最大となる時の中立軸位置は繊維混入率によって2つのモードがあることが確認される。図-13中の破線は、曲げ応力が最大となった時の中立軸位置と繊維混入率の関係を計算によって求めたものの一例である。この図に示される様に2つのモードの違いによる最大曲げ応力時の中立軸位置の差は明らかであり、ひびわれ開始応力によって決まると考えられるモードIでは一定であるのに対し、繊維の引抜け抵抗の影響を受けるモードIIでは繊維混入率が大きい程圧縮緑に近くなっている。図-13には歪ゲージによって測定された曲げ応力が最大となる時の中立軸位置の実測結果<sup>1)</sup>をあわせて示したが、歪ゲージの精度を考慮すればよく対応していると考えられる。

## 8. 結論

以上をとりまとめると以下のことが言える。

- (1) 鋼繊維補強コンクリートの引張応力-歪モデルによる計算値は実験値とよく適合するものであり、使用した引張応力-歪モデルは妥当なものであったと考えられる。
  - (2) 鋼繊維補強コンクリートの曲げ応力が最大となる時の耐荷機構は、引張ひびわれ開始応力に依存する場合と繊維の引き抜け抵抗に依存する場合の2つのモードに分類することができる。
  - (3) 一般に繊維量が多くなるとひびわれ拘束による耐荷機構から引き抜け抵抗による耐荷機構に移行する。
- 実験に使用した鋼繊維は一種類だが、繊維の異なる場合についてもこの手法を応用することが期待される。

本研究の実施にあたり終始御指導御鞭撻を賜った東京大学生産技術研究所小林一輔教授に深謝致します。

(参考文献) 1) S. Popovics, Cement and Concrete Research, vol. 3, No. 5 1973年 2) 小林・睦好, 土木学会論文報告集, 1980年  
3) 小林・植, 土木学会論文報告集, 1977年 4) 古樫・小林, 土木学会年次講演会概要集, 1982年

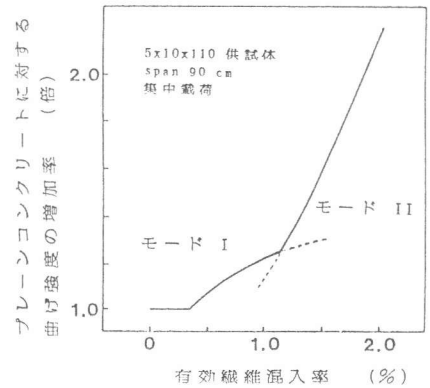


図-11 曲げ強度の増加率 (計算値)

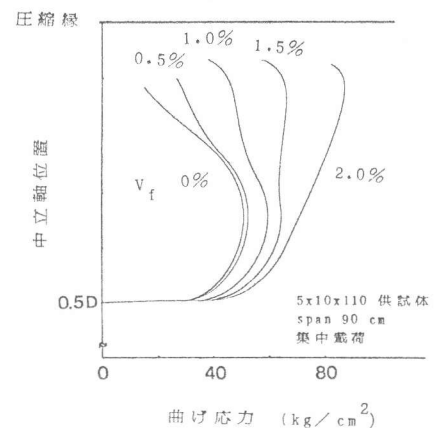


図-12 曲げ破壊過程における中立軸位置 (計算値)

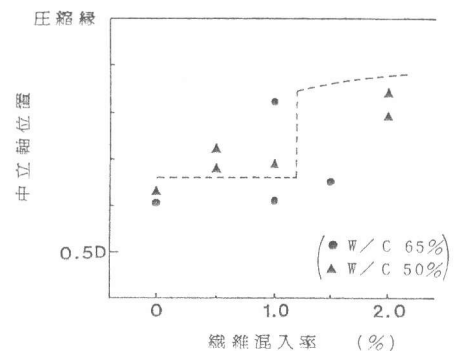


図-13 最大曲げ応力時の中立軸位置