

# [91] 鋼繊維補強コンクリートを用いたRC梁のせん断特性に関する基礎的研究

正会員 ○藤野 秀夫 (東京大学 大学院)  
 正会員 小林 一輔 (東京大学 生産技術研究所)  
 正会員 魚本 健人 (東京大学 生産技術研究所)

## 1. まえがき

近年、鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRCと略称)の優れた材料特性、例えば、高い引張強度やせん断強度などを利用して、これをRC部材へ適用することを目的とした数々の実験研究が試みられてきているが、その力学的性状は、まだ十分に解明されていない。本文は、SFRCを、RC梁に用いた場合のせん断特性を明らかにするため、繊維混入率 $V_f$ 、腹鉄筋比 $r_w$ 、せん断スパン比 $a/d$ 及びSFRCの打設部分を変化させて行った一連の実験結果を示すとともに、SFRCを用いたRC梁のせん断強度の推定式を提案したものである。

## 2. 実験の概要

実験は、次の2シリーズよりなる。第1シリーズは

- (1) 主鉄筋のみで腹鉄筋のない場合(図-1(a)参照)
- (2) 腹鉄筋補強した場合(図-1(b)~(e)参照)

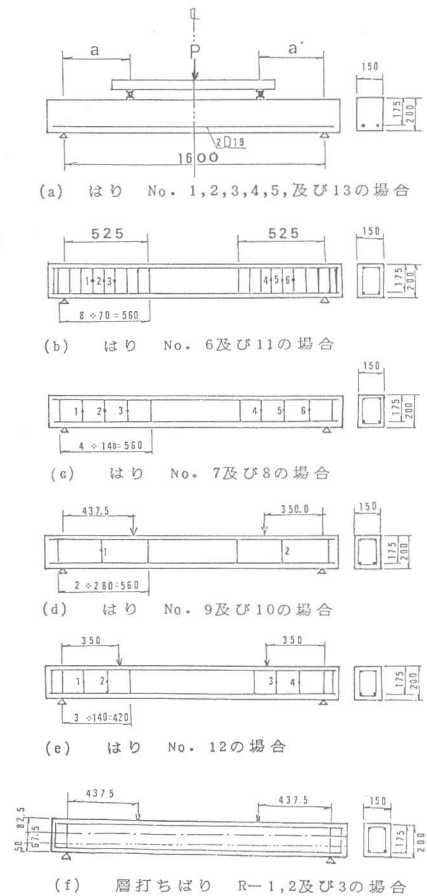
以上の2つのケースについて鋼繊維混入率を、0、1、2%の3種に変化させ、 $a/d$ も変えて、RC梁のせん断試験を行った。供試体本数は、(1)が6本、(2)が7本の計13本である。第2シリーズは、梁を3層に分けて各1層だけSFRC( $V_f = 1.0\%$ )を打設した3本の梁(図-1(f)参照)を、 $a/d = 2.5$ で載荷試験を行った。鋼繊維は、すべて異形カットワイヤー( $\phi 0.5 \times 3.2\text{mm}$ )を使用した。また、コンクリートの配合は、目標スランブを、8cmとし、表-1に示すように定めた。

供試体は幅15cm、高さ20cm、長さ180cm(スパン:160cm)の矩形梁を使用した。なお、有効高さは17.5cm、引張主鉄筋はD19(SD35、 $\sigma_y = 4100\text{Kg/cm}^2$ )を2本使用したので主鉄筋比は2.18%となる。圧縮鉄筋と鉛直腹鉄筋には、 $\phi 6$  ( $\sigma_y = 3500\text{Kg/cm}^2$ )を使用した。

載荷方法は図-1に示す様に、梁上面に置いた2つの支承上にH鋼を乗せ、左右のせん断スパン内に同一のせん断力が作用するように、2点集中載荷を行った。載荷試験では、荷重を1t増すごとに、ひびわれの進展を追いかけて、スパン中央におけるたわみ、主鉄筋のひずみ、せん断スパン内の腹鉄筋ひずみを測定した。

表-1 配合表

| 記号  | W/C (%) | S/a (%) | Vf (%) | Gmax (mm) | 単位量 (Kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |     |       |
|-----|---------|---------|--------|-----------|--------------------------|-----|------|-----|-------|
|     |         |         |        |           | W                        | C   | S    | G   | SF    |
| P-0 | 50      | 52      | 0.0    | 15        | 195                      | 390 | 932  | 886 | 0.0   |
| F-1 | 50      | 58      | 1.0    | 15        | 214                      | 428 | 992  | 740 | 78.5  |
| F-2 | 50      | 77      | 2.0    | 15        | 238                      | 476 | 1237 | 381 | 157.0 |



(注) 図中の腹鉄筋( $\phi 6$ )に付いた数字はそれに対応したひずみゲージ番号に対応している。

図-1 各供試体の配筋図

表-2 供試体諸元及び実験結果

|    | 圧縮強度<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | V <sub>f</sub><br>(%) | r <sub>w</sub><br>(%) | 載荷条件<br>a/d | P <sub>cr</sub><br>(t) | τ <sub>cr</sub><br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | P <sub>u</sub><br>(t) | τ <sub>u</sub><br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | M<br>(t.m) | M/M <sub>d</sub><br>(%) | f <sub>ct</sub><br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | τ <sub>c</sub><br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | τ <sub>d</sub><br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | τ <sub>u</sub> /τ <sub>d</sub> | 破壊形式 |
|----|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|------------------------|------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|------------|-------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|------|
| 1  | 527                           | 0                     | 0.0                   | 3.0~3.0     | 8.04                   | 15.31                                    | 9.225                 | 17.57                                   | 2.422      | 67.62                   |                                          | 15.99                                   | 15.99                                   | 1.10                           | 斜引張  |
| 2  | 513                           | 1                     | 0.0                   | 2.5~2.0     | 8.00                   | 15.24                                    | 16.86                 | 32.11                                   | 3.688      | 103.0                   | 17.51                                    | 29.07                                   | 29.07                                   | 1.10                           | せん断  |
| 3  | 513                           | 1                     | 0.0                   | 3.0~3.0     | 7.53                   | 14.34                                    | 14.99                 | 28.55                                   | 3.935      | 109.9                   | 17.51                                    | 27.43                                   | 27.43                                   | 1.04                           | せん断  |
| 4  | 522                           | 2                     | 0.0                   | 3.0~3.0     | 10.37                  | 19.75                                    | 15.79                 | >30.08                                  | 4.144      | 115.7                   | 22.26                                    | 34.83                                   | 34.83                                   | 0.89                           | 曲げ   |
| 5  | 548                           | 2                     | 0.0                   | 2.5~2.0     | 8.50                   | 16.19                                    | 19.65                 | 37.43                                   | 4.298      | 120.0                   | 22.81                                    | 37.86                                   | 37.86                                   | 0.99                           | せん断  |
| 6  | 505                           | 0                     | 0.54                  | 3.0~3.0     | 7.82                   | 14.90                                    | 15.00                 | >28.57                                  | 3.938      | 109.9                   |                                          | 15.76                                   | 32.26                                   | 0.89                           | 曲げ   |
| 7  | 505                           | 0                     | 0.27                  | 3.0~2.5     | 6.73                   | 12.82                                    | 13.73                 | 26.15                                   | 3.604      | 100.6                   |                                          | 15.76                                   | 24.00                                   | 1.09                           | せん断  |
| 8  | 551                           | 1                     | 0.27                  | 2.5~2.0     | 8.85                   | 16.86                                    | 19.90                 | >37.90                                  | 4.353      | 121.5                   | 18.15                                    | 30.13                                   | 38.38                                   | 0.99                           | 曲げ   |
| 9  | 551                           | 1                     | 0.135                 | 2.5~2.0     | 8.90                   | 16.95                                    | 19.74                 | 37.60                                   | 3.455      | 96.44                   | 18.15                                    | 32.67                                   | 36.79                                   | 1.02                           | せん断  |
| 10 | 585                           | 2                     | 0.135                 | 2.5~2.0     | 9.58                   | 18.25                                    | 20.19                 | >38.45                                  | 4.417      | 123.3                   | 23.56                                    | 39.11                                   | 43.23                                   | 0.89                           | 曲げ   |
| 11 | 535                           | 0                     | 0.54                  | 2.5~2.0     | 6.61                   | 12.59                                    | 17.62                 | >33.56                                  | 3.854      | 107.6                   |                                          | 17.08                                   | 33.58                                   | 1.00                           | 曲げ   |
| 12 | 551                           | 1                     | 0.27                  | 2.0~2.0     | 8.70                   | 16.57                                    | 24.03                 | 45.76                                   | 4.204      | 117.4                   | 18.15                                    | 32.67                                   | 40.91                                   | 1.12                           | せん断  |
| 13 | 591                           | 2                     | 0.0                   | 2.0~2.0     | 10.50                  | 20.00                                    | 25.21                 | 48.02                                   | 4.412      | 123.2                   | 23.68                                    | 42.62                                   | 42.62                                   | 1.13                           | 曲げ   |

表-3 層打ち梁のせん断耐力

| 供試体 No. | 打設部  | P <sub>cr</sub><br>(t) | τ <sub>cr</sub><br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | P <sub>max</sub><br>(t) | τ <sub>u</sub><br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | M <sub>max</sub> /M <sub>d</sub><br>(%) |
|---------|------|------------------------|------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| R-1     | 圧縮部  | 9.638                  | 18.36                                    | 12.77                   | 24.32                                   | 77.97                                   |
| R-2     | ウェブ部 | 9.700                  | 18.48                                    | 10.62                   | 20.22                                   | 64.84                                   |
| R-3     | 引張部  | 9.488                  | 18.07                                    | 16.32                   | 31.09                                   | 99.66                                   |

又、普通RC梁の設計せん断耐力V<sub>d</sub>は、Zuttyの提案したせん断強度τ<sub>c</sub>の推定式を用い、次式によって算定した。腹筋筋の分担するせん断力は45°単純トラス理論に従うと仮定する。

$$V_c = \tau_c b d \quad (1) \quad V_s = A_s E \epsilon (Z/S) \quad (2)$$

$$V_d = V_c + V_s y = \tau_c b d + A_s \sigma_y (Z/S) \quad (3)$$

SFRCを用いたRC梁の設計せん断耐力は、せん断強度τ<sub>c</sub>を推定する式がないので、①、②、③式と実験結果から、逆に、このτ<sub>c</sub>の推定を検討した。

### 3. 実験結果

3.1 破壊耐力 各供試体の諸元、斜ひびわれ発生荷重P<sub>cr</sub>、最大荷重P<sub>u</sub>、最大曲げモーメントM、破壊時せん断応力度τ<sub>u</sub>などを表-2、3に示す。これらの表よりSFRCのせん断耐力は、普通コンクリートより高く、a/d=3の場合V<sub>f</sub>=1.0%で6.2%、V<sub>f</sub>=2.0%で7.3%程度、増加していることがわかる。又、層打ち(a/d=2.5)の場合、引張部のみにSFRCを用いた場合には、ウェブ部分のみにSFRCを用いた場合に比較して、5.4%の耐力増加を示している。

3.2 荷重-たわみ曲線 図-2に示す様にa/d=3のときの変形状は、No.1、4、6の3本の梁とも大差がないが、

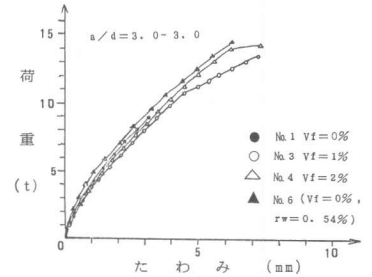


図-2 荷重-たわみ曲線 (No. 1, 3, 4, 6)

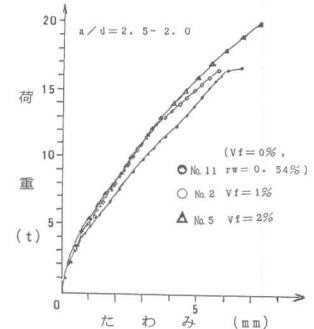


図-3 荷重-たわみ曲線 (No. 2, 5, 11)

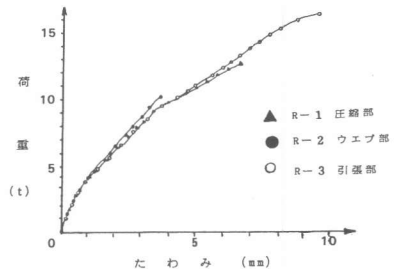


図-4 荷重-たわみ曲線 (R-1, 2, 3)

No. 3の梁のみは荷重が10.5 t以降の、たわみ増分が大きく、これは、主鉄筋に沿う割裂ひびわれの発生と時を同じくしている。

図-3より、 $a/d = 2.5 - 2.0$ の場合には、せん断破壊したSFRCを用いた梁 (No. 2及びNo. 5)の変形が普通RC梁 (No. 11)より小さく、これを曲げ破壊したものと比較してみると、荷重が12.5 t付近からたわみ増分が変化している。これは、せん断変形の影響と思われる。

図-4は、層打ちの場合の結果を示したもので条件によって顕著な差が見られる。ウェブ部にのみSFRCを用いたR-2と引張部にのみSFRCを用いたR-3の挙動の差は後者の場合のみSFRCによる鉄筋定着部における割裂ひびわれ拘束とこれに伴う鉄筋のDowel Actionの影響が働いたことによるものである。

3.3 腹鉄筋ひずみと腹鉄筋間隔 図-5(a)-(e)において破線は、45°単純トラス理論による理論値を示している。これらの図から、普通コンクリートの場合には、ひずみの増分が、ほぼこの理論値に等しいが、SFRCの場合には、理論値より小さいことがわかる。SFRCによって、腹鉄筋間隔を小さくしたと同じ効果が腹鉄筋ひずみの増分に表われているのである。そこで鋼繊維の混入が、どの程度の腹鉄筋による補強に相当するかを、腹鉄筋ひずみより逆算してみる。計算は、作用せん断力 $V$ を、腹鉄筋とコンクリートのみで分担すると仮定し、式①、②、③を利用する。先ず最大荷重時の腹鉄筋ひずみを用いて、その分担するせん断力 $V_s$ を求める。次にコンクリートの分担するせん断力 $V_c (= V - V_s)$ から、 $\tau = V_c / b d$ によって、せん断強度を求め同一のせん断スパン比で得られたSFRCと普通コンクリートの $\tau_c$ の差 $\Delta \tau_c$ を、

$$S = (A_s \sigma_y Z) / (\Delta \tau_c \cdot b d) \quad (2)$$

に導入して腹鉄筋間隔 $S$ を求める。せん断強度は、実験結果より得られた値として普通コンクリートの場合には、 $a/d = 3.0$ のときは、 $17.9 \text{ kg/cm}^2$ を、 $a/d = 2.5$ のときは、

$18.0 \text{ kg/cm}^2$ を、 $a/d = 2.0$ のときは、 $22.5 \text{ kg/cm}^2$ を、それぞれ計算に用いた。但し腹鉄筋のない場合は、破壊時せん断強度 $\tau_u$ を、 $\tau_c$ のかわりに用いた。計算結果を表-4に示す。今回の実験では、 $V_f = 1.0\%$ では、腹鉄筋間隔 $9 \text{ cm}$ 、腹鉄筋比 $0.42\%$ に、 $V_f = 2.0\%$ は、腹鉄筋間隔 $6 \text{ cm}$ 、腹鉄筋比 $0.63\%$ に、

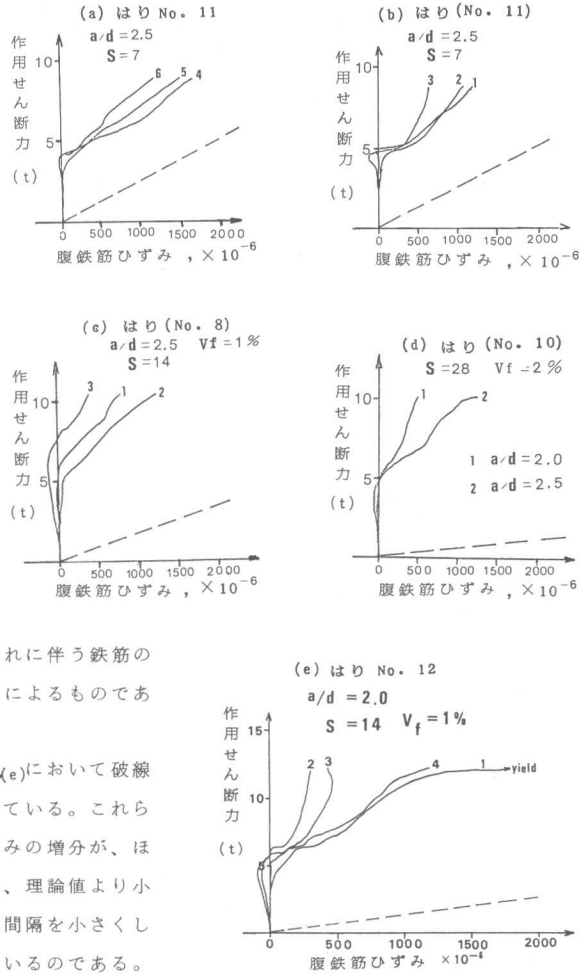


図-5 作用せん断力-腹鉄筋ひずみ曲線

表-4 強度増分と腹鉄筋間隔

| a/d | No. | Vf (%) | $\tau_c$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $\Delta \tau_c$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | S (cm) |
|-----|-----|--------|--------------------------------|---------------------------------------|--------|
| 3.0 | 3   | /      | 28.6                           | 10.7                                  | 10.8   |
| 3.0 | 4   | 2      | >30.1                          | >12.2                                 | <7.0   |
| 2.5 | 2   | /      | 32.1                           | 14.1                                  | 8.2    |
| 2.5 | 5   | 2      | 37.4                           | 19.4                                  | 6.0    |
| 2.5 | 8   | /      | 32.1                           | 14.1                                  | 8.2    |
| 2.5 | 9   | /      | 33.8                           | 15.8                                  | 7.3    |
| 2.5 | 10  | 2      | 35.5                           | 17.5                                  | 6.6    |
| 2.0 | 8   | /      | 34.3                           | 11.8                                  | 9.8    |
| 2.0 | 9   | /      | 36.1                           | 13.6                                  | 8.5    |
| 2.0 | 10  | 2      | 37.3                           | 14.8                                  | 7.8    |
| 2.0 | 12  | /      | 37.4                           | 14.9                                  | 7.7    |
| 2.0 | 13  | 2      | >48.0                          | >25.5                                 | <4.5   |

それぞれ相当することがわかる。

梁 No. 12 の場合 (図-5 (e)) には、腹鉄筋ひずみが、 $1250 \times 10^{-6}$  を超えると、ひずみが急増して降伏し、せん断破壊をした。これは、斜ひびわれ幅が、ある値を超えると、そのひびわれ面内の鋼繊維とマトリックスとの付着が切れ、引抜け易くなり、SFRCによるせん断耐力の増加が減少し始め、その結果、腹鉄筋に、急激に荷重が加わったためと考えられる。従って鋼繊維が有効に作用する、ひびわれ幅の限界は、腹鉄筋の長さ<sup>4)</sup> ( $16.5 \text{ cm}$ ) と、そのひずみからみて、約  $0.2 \text{ mm}$  であることが判明した。これは、Ibrahimらの引張試験に基づく結果と合致している。

3.4 SFRCを用いた梁のせん断強度 今回の実験に用いた程度の断面寸法のSFRCを用いたRC梁のせん断強度は、以下の式によって推定することができる。

$$\tau_c = (1.1 + 1.4 d/a) f_{ct} \quad (\text{但し、} a/d \geq 2.0) \quad (4)$$

$$f_{ct} = 0.05 (V_f)^{1/3} (L/D) (1 + 0.57 L/b_w) \sigma_c^{1/2} \quad (5)$$

L: 鋼繊維長さ (mm)、D: 鋼繊維径 (mm)、 $b_w$ : 梁のウェブ幅 (mm)

$V_f$ : 鋼繊維混入率 (%),  $\sigma_c$ : 圧縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )

ここで  $f_{ct}$  は、引張ひびわれ発生後の疑似塑性領域においてSFRCが抵抗しうる引張耐力である。この値については、すでにMuhiden<sup>2)</sup>らの提案式があるが、 $f_{ct}$  と  $V_f$  との関係が線形であるとしている。これは正しくないために、ここでは、 $f_{ct}$  が  $V_f$  の  $1/3$  乗に比例すると仮定した推定式を用いた。(4)式と(3)式を用いて、 $\tau_c$ 、 $\tau_d$ 、及び、その実測値との比を計算した結果を、表-2に示す。この表から明らかなように、その値は、 $0.99 \sim 1.13$  となり、式(4)が実験値と比較的によく一致することを示している。さらに、式(4)を、Williams<sup>3)</sup>の行った大型梁 ( $30.5 \times 54.6 \times 701 \text{ cm}$ 、 $a/d = 4.66$ ) による実験結果に適用すると、実験値が、 $19.2 \text{ kg/cm}^2$  に対して、計算値は、 $19.1 \text{ kg/cm}^2$  となり、この場合もまた、よい一致を示している。

#### 4. 結論

(1) 本研究によって鋼繊維補強コンクリートがRC梁のせん断耐力増加に寄与するメカニズムが、ある程度は、明らかにされたと考える。

(2) SFRCを用いたRC梁のせん断強度の推定式を提案した。これは、SFRCによるせん断耐力の増加をコンクリートの受け持つせん断力の増加と考えて求めたものである。

本実験を行うに当たり、千葉工業大学の卒論生である、佐々木武、及び、中村公彦の両君に協力して頂いた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) T. Zutty: Shear Prediction for Separate categories of Simple Beam Tests, ACI Journal, Feb. 1971
- 2) N.A. Muhiden & P.E. Reagan: Chopped steel fibers as shear reinforcement in concrete beams, Fiber reinforced materials, Institution of Civil Engineers, London, 1977
- 3) G.R. Williamson: Steel Fibers as Web Reinforcement in Reinforced concrete, Composite, Apr. 1974
- 4) O.T. Ibrahim & A.R. Luxmoore: Control of crack width by inclusion of fibers in conventionally reinforced concrete, Internatinal concrete Journal, 1980

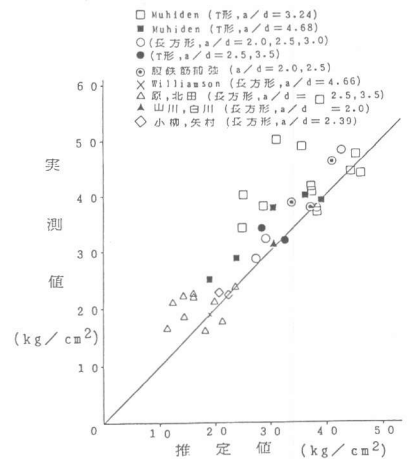


図-6 推定値 - 実測値