# 論文 鋼繊維とスターラップによりせん断補強されたRCはりのせん断耐力 に関する研究

木村 利秀\*1·三木 朋広\*2·二羽 淳一郎\*3

要旨: せん断補強筋を有する鋼繊維補強 RC はりにおける, 鋼繊維によるせん断補強効果を 評価することを目的に, せん断補強筋比と鋼繊維混入率をパラメータとして RC はりのせん 断載荷試験を行った。鋼繊維のせん断補強効果は, 重合せの原理に基づいた修正トラス理論 を用いて検討した。実験結果から, せん断補強筋と鋼繊維を併用することで, 0.3vol%程度 の低繊維混入率の場合においても鋼繊維によるせん断補強効果が向上すること, また, その 際のせん断補強効果のばらつきを抑制することができることを確認した。 キーワード: 鋼繊維, スターラップ, 繊維混入率, せん断補強筋比, 併用効果

#### 1. はじめに

土木構造物は,耐震性や高機能化を考慮しな ければならないため,過密配筋の傾向にある。 その結果,鉄筋の組立てが複雑になり,コンク リートの充填性などに問題が生じてしまう。そ こで,要求されたせん断耐力を満足し,かつ鉄 筋量を適切に軽減することを目指し,鋼繊維補 強コンクリートの使用を考える。

短繊維補強鉄筋コンクリートは、せん断耐力 やひび割れ分散性の向上、高靭性化などの補強 効果を有することが報告されている<sup>1),2)</sup>。ここで、 RC部材のせん断耐力は、一般に、修正トラス理 論に基づき、コンクリートの貢献分とせん断補 強筋の貢献分の和により算定される。この考え を基に、繊維補強効果分を割り増したコンクリ ートの貢献分とせん断補強筋の貢献分の重合せ により、短繊維補強 RC部材のせん断耐力を検討 している。短繊維を用いた RC はりに関する研究 は、これまでに数多く行われてきており、特に 鋼繊維補強コンクリートに関しては、鋼繊維の 混入率を1.0~1.5%程度とすることにより、せん 断耐力のコンクリート貢献分を 2 倍程度まで向 上させることができるとされている<sup>1)</sup>。 これらの多くの研究では、せん断補強筋のな いRCはりを対象に種々検討されている。しかし、 実構造物では、ほとんどの場合せん断補強筋が 配置されているのが現状である。そこで本研究 では、せん断補強筋と鋼繊維を併用した場合の 短繊維補強 RC はりのせん断耐力を評価するこ とを目的として、実験的検討を行なった。特に、 現実的なせん断補強筋量の RC はりにおける、低 繊維混入率の場合の鋼繊維によるせん断補強効 果に注目して検討を行った。

### 2. 実験概要

#### 2.1 実験パラメータおよび使用材料

本研究では、鋼繊維とせん断補強筋を併用す ることによるせん断補強効果を確認するため、 鋼繊維混入率とせん断補強筋比をパラメータと した実験を行った。その実験ケースを表-1に示 す。鋼繊維の混入率は、外割り計算でコンクリート の体積に対し 0.3, 0.5, 0.75, 1.0%とし、せん断補 強筋比は 0.12, 0.18, 0.24, 0.30%として、合計 10 体の RC はり供試体について載荷実験を行った。

本実験で使用した配合を表-2に示す。また、 鋼繊維およびコンクリートに使用した材料の物

\*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)
\*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助手 博(工) (正会員)
\*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

性を表-3,4にそれぞれ示す。本実験では、水 セメント比を2水準に変化させた。せん断余裕 度を終局せん断耐力/終局曲げ耐力とすると、コ ンクリートの圧縮強度が高くなるにつれ、せん 断余裕度が低下していく。そこで、まず比較的、 圧縮強度が高い、W/C=30%の配合において、せ ん断破壊が先行することを確認した。その後、 検討に用いる材料の汎用性を考慮し、W/C=35% とした配合を使用することとした。すべての配 合において、混和剤は短繊維の混入率に応じ、 単位セメント量に対して0.5~1.0%となるように調 整して使用した。

### 2.2 供試体概要

供試体概要を図-1および表-5にそれぞれ示 す。供試体は、せん断破壊が先行するように設 計した。実験に用いた各種鉄筋の物性を表-6 に示す。スターラップの降伏強度は、JIS Z 2241 に規定される「金属材料引張試験方法」により 測定した。RC はりにおける軸方向鉄筋の端部は、 コンクリートから鉄筋を突出させ、アンカープ レートとボルトにより定着を確保した。供試体 は片側のみせん断破壊を生じさせるため、測定 区間のもう一方のせん断スパンには、せん断補 強筋を 100mm 間隔(せん断補強筋比 0.42%)で配 置した。その反対側のせん断スパン内にはせん 断補強筋を 140、175、233、350mm 間隔の計 4 パターンで配置した。鋼繊維補強 RC はりのせん 断耐力 *V<sub>cal</sub>* の算定には式(1)~(4)<sup>1),3)</sup>を使用した。 式(3)は式(2)に土木学会「鋼繊維補強鉄筋コンク リート柱部材の設計指針(案)」に規定される,鋼 繊維によるせん断強度の増加を考慮する係数 *к* を乗じたものである。

$$V_{cal} = V_c + V_{\kappa cal} + V_s \tag{1}$$

ただし,

$$V_c = 0.2 f_c^{'\frac{1}{3}} p_w^{\frac{1}{3}} (\frac{1000}{d})^{\frac{1}{4}} (0.75 + \frac{1.4}{a/d}) bd$$
(2)

$$V_{\kappa cal} = \kappa V_c \tag{3}$$

$$V_s = A_w f_{wv} z \,/\, s \tag{4}$$

| 衣一  天映ソース            |           |            |  |  |  |  |  |  |
|----------------------|-----------|------------|--|--|--|--|--|--|
| 供試体名                 | 鋼繊維混入率[%] | せん断補強筋比[%] |  |  |  |  |  |  |
| SF03-r18             | 0.30      | 0.18       |  |  |  |  |  |  |
| SF03-r24             | 0.50      | 0.24       |  |  |  |  |  |  |
| SF05-r24             | 0.50      | 0.24       |  |  |  |  |  |  |
| SF05-r30             | 0.50      | 0.30       |  |  |  |  |  |  |
| SF08-r12             | 0.75      | 0.12       |  |  |  |  |  |  |
| SF08-r18             | 0.75      | 0.18       |  |  |  |  |  |  |
| SF10-r12             |           | 0.12       |  |  |  |  |  |  |
| SF10-r18<br>SF10-r24 | 1.00      | 0.18       |  |  |  |  |  |  |
|                      | 1.00      | 0.24       |  |  |  |  |  |  |
| SF10-r30             |           | 0.30       |  |  |  |  |  |  |

長-1 実験ケース

表-2 示方配合

| 表-3 | 鋼繊維の物性 |
|-----|--------|
|     |        |

| 粗骨材        |        |        | 単位量[kg/m <sup>3</sup> ] |      |     |     |          | 繊維形状   | 両端フック加工                |  |
|------------|--------|--------|-------------------------|------|-----|-----|----------|--------|------------------------|--|
| 最大         | 水セメ    | 細骨材率   |                         |      | 細骨材 |     |          | 繊維長    | 30 mm                  |  |
| 寸法         | ント比    |        | 水                       | セメント |     | 粗骨材 | 混和剤      | 直径     | 0.6 mm                 |  |
| <b>6</b> 3 | F0 / 3 | F0 / J |                         | G    | G   | G   |          | アスペクト比 | 50                     |  |
| [mm]       | [%]    | [%]    | W                       | C    | S   | G   | Ad       | 密度     | 7.85 kg/ℓ              |  |
| 20         | 30     | 51.2   | 165                     | 550  | 847 | 790 | 繊維混入率に応じ | 引張強度   | 1000 N/mm <sup>2</sup> |  |
| 20         | 35     | 53.1   | 165                     | 471  | 917 | 790 | 0.5~1.0% | 弹性係数   | 210 kN/mm <sup>2</sup> |  |
|            |        |        |                         |      |     |     |          |        |                        |  |

|      | 種類           | 物性   |  |  |  |  |  |
|------|--------------|--|--|--|--|--|--|
| セメント | 早強ポルトランドセメント | 密度 3.14 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4490 cm <sup>2</sup> /g |  |  |  |  |  |
| 細骨材  | 小櫃産陸砂        | 表乾密度 2.66 kg/ℓ, 吸水率 1.13 %, 粗粒率 2.32                     |  |  |  |  |  |
| 粗骨材  | 青梅産砕石        | 表乾密度 2.63 kg/ℓ, 吸水率 0.67 %, 最大寸法 20 mm, 粗粒率 6.94         |  |  |  |  |  |
| 混和剤  | 高性能 AE 減水剤   | ポリカルボン酸エーテル系, 1.07 g/cm <sup>3</sup>                     |  |  |  |  |  |

### 2.3 載荷概要

RC はりの載荷には,静的4 点曲げ試験を行っ た。支点および載荷点では、支圧板と供試体の 間にテフロンシートを挟み込むことにより、水 平方向の摩擦を低減させた。また,2枚の支圧板 の間に丸鋼棒を挟むことによって、供試体の水 平変位に追従できるようにした。計測項目は, 荷重、コンクリート圧縮縁ひずみ、はり中央部 における主鉄筋のひずみ,および各せん断補強 筋高さ中央部のひずみ,供試体中央部の変位か ら支点部の変位を差し引いたたわみである。さ らに、標点間隔 100mm のπ型変位計を、供試体の 引張側等モーメント区間をすべてカバーするように 並列して3個配置し、曲げひび割れ幅を測定した。

# 3. 実験結果および考察

## 3.1 実験および計算で得られたせん断耐力の比較

表-7にRCはりの載荷試験結果およびコンク リートの強度試験結果を示す。ここで、式(5)、 (6)から、実験より得られた鋼繊維のせん断耐力 の貢献分 V кехр, 実験より得られた鋼繊維による

せん断強度増加係数 Kexp を求めた。

$$V_{\kappa exp} = V_{exp} - V_s - V_c \tag{5}$$

$$\kappa_{exp} = V_{\kappa \, exp} \, / \, V_c \tag{6}$$

### 表-5 供試体概要

| 項目                  | 記号    | 単位              | 値         |
|---------------------|-------|-----------------|-----------|
| 軸方向鉄筋断面積            | $A_s$ | mm <sup>2</sup> | 1013      |
| 軸方向鉄筋比              | $p_w$ | %               | 2.70      |
| 幅                   | b     | mm              | 150       |
| 有効高さ                | d     | mm              | 250       |
| せん断スパン長             | а     | mm              | 700       |
| せん断スパン<br>有効高さ比     | a/d   | -               | 2.8       |
| せん断補強筋1組の<br>断面積    | $A_w$ | mm <sup>2</sup> | 63.3      |
| せん断補強筋間隔            | S     | mm              | 140~350   |
| せん断補強筋比             | $r_w$ | %               | 0.12~0.30 |
| 鋼繊維による<br>せん断耐力増加係数 | К     | -               | 1.0       |

#### 表-6 各種鉄筋の物性

|            | 組立筋──、                | € ↓ スターラップ ¬ ¬          | 主鉄筋 150      | 表一6    | 各種鉄筋の物     | 加性                           |
|------------|-----------------------|-------------------------|--------------|--------|------------|------------------------------|
| -          |                       |                         | 300 52       | 項目     | 種類         | 降伏強度<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|            | <sup>▲</sup> ▲ 変位計 18 | 800 ひずみゲージ <sup>2</sup> |              | 組立筋    | φ6SR295    | -                            |
| <b>†</b> 5 | Q 700 2               | 200 <b>s s s</b>        | ──┤<br>単位:mm | スターラップ | D6SD345    | 364                          |
|            | जि                    |                         |              | 主鉄筋    | D25SPBD930 | 1059                         |
|            | 凶-                    | 1 供武仲僦安凶                |              |        |            |                              |

#### 表-7 実験結果

| 供封休夕     | 圧縮強度                 | 引張強度                 | 弾性係数                  | $V_{exp}$ | $V_{cal}$ | $V_s$ | $V_c$ | V <sub>k exp</sub> | ĸ <sub>exp</sub> | V <sub>exp</sub> / V <sub>cal</sub> |
|----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|-----------|-------|-------|--------------------|------------------|-------------------------------------|
| 快സ件石     | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [kN/mm <sup>2</sup> ] | [kN]      | [kN]      | [kN]  | [kN]  | [kN]               |                  |                                     |
| SF03-r18 | 51.5                 | 3.48                 | 30.1                  | 145.0     | 159.0     | 21.6  | 68.7  | 54.7               | 0.80             | 0.91                                |
| SF03-r24 | 51.5                 | 5.40                 |                       | 125.0     | 158.8     | 21.4  |       | 34.9               | 0.51             | 0.79                                |
| SF05-r24 | - 79.9               | 4.15                 | 32.9                  | 177.9     | 187.9     | 28.8  | 79.6  | 69.5               | 0.87             | 0.95                                |
| SF05-r30 |                      | 4.15                 |                       | 193.7     | 195.1     | 36.0  |       | 78.1               | 0.98             | 0.99                                |
| SF08-r12 | - 83.7               | 4.93                 | 35.7                  | 171.2     | 176.0     | 14.4  | 80.8  | 76.0               | 0.94             | 0.97                                |
| SF08-r18 |                      |                      |                       | 173.0     | 183.2     | 21.6  |       | 70.6               | 0.87             | 0.94                                |
| SF10-r12 | - 85.5               | 5 4.35               | 39.7                  | 172.4     | 177.1     | 14.4  | 81.4  | 76.6               | 0.94             | 0.97                                |
| SF10-r18 |                      |                      |                       | 215.6     | 184.3     | 21.6  |       | 112.6              | 1.38             | 1.17                                |
| SF10-r24 | 57 5                 | 3.26                 | 30.4                  | 181.2     | 171.3     | 28.8  | 71.3  | 81.1               | 1.14             | 1.06                                |
| SF10-r30 | 57.5                 | 5.20                 | 50.4                  | 176.5     | 174.9     | 32.3  | /1.5  | 72.9               | 1.02             | 1.00                                |

実験結果のうち、V<sub>s</sub>には鉄筋の引張試験から得 たスターラップの降伏強度*f<sub>wy</sub>*を使用した。一方、 最大荷重時でもスターラップの降伏に至らなか った供試体は,最大荷重時の各スターラップの ひずみから作用応力を算出し,せん断補強筋の 負担するせん断耐力を求めた。

破壊モードは、全ての実験ケースにおいて斜 め引張破壊となった。ここで、 $V_{cal}$ は $\kappa$ =1.0 とし て式(1)より求めた。実験値と計算値のせん断耐 カの比  $V_{exp}/V_{cal}$ は、0.79~1.17 となった。鋼繊維 補強コンクリートのせん断耐力の計算に用いた 式(2)の適用範囲は、繊維混入率が 1.0~1.5vol% である<sup>1)</sup>。本研究における鋼繊維混入率 1.0%の 供試体の $\kappa_{exp}$ は、0.94~1.38 であった。さらに鋼 繊維混入率が 1.0%以下の指針式適用外の供試体 においては、 $\kappa_{exp}$ が 0.51~0.98 となった。特に既 往の研究<sup>4)</sup>によれば、繊維混入率を 0.5%以下に すると、 $\kappa_{exp}$ の低下は大きいとされている。しか し、本実験では、繊維混入率が 0.3%の供試体に対し ても $\kappa_{exp}$ が 0.51~0.80 と比較的大きいことが分かる。

繊維混入率が低い場合においても, *Kexp*が大きい原因は,斜めひび割れ発生後,スターラップの影響により,斜めひび割れの開口がある程度抑制されたことが考えられる。急激に斜めひび割れが開口しないことで,斜めひび割れ面に対して, 鋼繊維の架橋効果が有効に作用したものと考える。

SF03-r24においてκ<sub>exp</sub>が低い原因は, ひび割れ 開口に対するスターラップの抑制効果が十分で なかったことが考えられる。特にこの供試体で は,最大荷重時に全てのスターラップが降伏し ておらず,スターラップによる斜めひび割れの 開口に対する抑制効果が十分発揮されなかった と考える。その結果,実験では斜めひび割れが 急激に進展し,せん断耐力の向上は見られなか った。SF10-r30においても支点部に最も近いス ターラップは降伏していなかったものの,他の3 本のスターラップは降伏しており,それらがひび 割れの開口を抑制したと考えられる。つまり、最 大荷重時に降伏しているスターラップの本数が多 いほど、スターラップによるひび割れの開口を抑



図-2 ひび割れ性状

制する効果が増し、繊維による補強割合が向上し たと考える。

#### 3.2 ひび割れ性状

図-2に全試験ケースにおける,載荷後のひび 割れ図を示す。図-2中の太線は,斜めひび割れ を,βは斜めひび割れ角度をそれぞれ示す。斜め ひび割れ角度は,斜めひび割れの先端と,斜め ひび割れが軸方向鉄筋と交わる点とを結んだ線 の角度とした。斜めひび割れ角度は,一部の供 試体を除き,鋼繊維混入率およびせん断補強筋比 の増加に伴い,大きくなる傾向にあることがわかる。

ひび割れの分散性は,全供試体においてほと んど変化はなく,複数のひび割れを生じている ことがわかる。この結果から,せん断補強筋と 鋼繊維を組み合せて使用することで,ひび割れ を分散させることができることがわかった。

### 3.3 荷重-たわみ関係

図-3 に実験で得られた荷重-変位関係を示 す。鋼繊維を 0.5~1.0% 混入した供試体の変形挙 動は、図中に示す SF10-r30 に類似した形状とな った。荷重が 30kN 前後において, 等モーメント 区間に曲げひび割れが発生し、剛性が多少低下 する。その後、荷重の増加に伴い、斜めひび割 れが進展し、載荷点近傍のコンクリートの圧縮 部まで斜めひび割れが達すると同時に、急激な 耐力低下を示した。一方, SF03-r18 は最大荷重 後,徐々に耐力が低下した。図-2(a)に示すひび 割れ図を見ると、SF03-r18 では斜めひび割れ角 度が,他の供試体に比べ小さく,載荷点直下で 斜めひび割れの上側に圧縮部コンクリート域が 存在した。そのため、圧縮部付近のコンクリー トが急激に壊れず、斜めひび割れ幅の増加によ り,徐々に耐力が低下したと考えられる。また,

SF03-r24 も,他の供試体と異なった挙動を示し た。SF03-r24 では、スターラップが降伏する前 に最大荷重に達した。最大荷重後、スターラッ プのひずみの増加とともに、再度荷重が増加し たが、スターラップひずみが約 2000×10<sup>-6</sup>を超え たあたりで終局に達した。そのため変形性能お よび最大荷重が他の供試体に比べ小さくなった ものと考える。

# 3.4 スターラップのひずみ

各せん断補強筋比における,それぞれの繊維 混入率に対する,荷重とスターラップひずみ関 係を図-4に示す。複数のスターラップを有する せん断補強筋比が 0.18, 0.24, 0.30%の供試体に 関しては,スターラップひずみの平均値を使用 した。なお,SF03-r24 はスターラップが降伏し なかったため比較対象から外した。全ての供試 体に対して,荷重が 100kN を超え,斜めひび割 れが発生したあたりからスターラップひずみが 増大し,スターラップのせん断補強効果が発揮 されることが分かる。その後,いずれの供試体 においても,グラフの傾きが緩やかになり,ひ ずみが急激に増加していることがわかる。

図-4(a), (b), (c)を見ると,同一の荷重状態 では,繊維混入率が多くなるにつれて,スター ラップひずみは小さくなっている。つまり,繊 維混入率が増すにつれ,繊維による引張抵抗力 が増し,その結果スターラップに作用する引張 力が小さくなる傾向になったと考えられる。し かし,せん断補強筋比 0.3%の場合,スターラッ プひずみは,繊維混入率に関わらず,ほぼ同一の 値となった。せん断補強筋比が大きくなると,繊維 混入率の影響が相対的に小さくなることがわかった。

# 3.5 せん断補強筋のない鋼繊維補強 RC はりの せん断耐力との比較

せん断補強の有無による,異なる繊維混入率 に対する $\kappa_{exp}$ を図-5 に示す。せん断補強筋のな い鋼繊維補強 RC はりのせん断強度には,喜多ら<sup>4)</sup>,





児玉ら<sup>5</sup>によって実施された実験結果を使用した。

 $\kappa_{exp}$ は繊維混入率を増やすことで、増加してい く。しかし、鋼繊維を 1.5%以上混入した場合、 耐荷力の更なる向上は見込めず、 $\kappa_{exp}$ がほぼ一定 となる傾向にあることがわかる。

一方, せん断補強筋を有する RC はりの場合, 繊維混入率 1.0%以下において,  $\kappa_{exp}$ が比較的 1.0 に近い値となった。特に繊維混入率 0.3%におい て, せん断補強筋が無い場合には,  $\kappa_{exp}$  が 0.14 であるのに対し, せん断補強筋を有する場合に は, 0.51, 0.80 と高くなった。つまり, ある程度 のせん断補強筋と鋼繊維を併用することにより, 繊維混入率が低い場合でも $\kappa_{exp}$  が急激に低下す ることはなかった。

さらに、せん断補強筋のない鋼繊維補強 RC は りでは、 $\kappa_{exp}$ のばらつきが非常に大きいことがわ かる。繊維混入率 1.0%場合、 $\kappa_{exp}$ の値は 0.49~ 1.38 であり、高い補強効果を示す一方で、十分 な補強効果を得ることができない場合もあるこ とがわかる。また、繊維混入率の低下に伴い、 斜めひび割れに抵抗する繊維の割合が低くなる ため、補強効果のばらつきが大きくなる傾向に ある。しかし、せん断補強した鋼繊維補強 RC は りでは、繊維混入率が 1.0%の場合、 $\kappa_{exp}$ の値が 0.94~1.38 であり、ばらつきは相対的に小さくな った。繊維混入率が 1.0%以下でも、SF03-r24 で は $\kappa_{exp}$  が 0.51 であったものの、その他の供試体の  $\kappa_{exp}$ は、0.80~0.98 であり、ばらつきが低減され る傾向にある。

今後, せん断補強筋と繊維混入率の組み合せ による補強効果に関するデータをさらに蓄積し, スターラップと鋼繊維を併用した場合のせん断 補強効果についてさらに検討していく予定である。

# 4. まとめ

本研究から以下の知見が得られた。

 繊維混入率が低い場合でも、せん断補強筋 と鋼繊維を併用することで、鋼繊維を単体 で用いた場合以上のせん断補強効果が得ら れることを確認した。



- せん断補強筋と鋼繊維の併用効果は、せん断補 強筋が、斜めひび割れの開口を抑制し、鋼繊維 の架橋作用が有効に働くことにより得られる。
- せん断補強筋と鋼繊維を併用することで、
   鋼繊維によるせん断補強効果のばらつきを
   低減される傾向にあることを確認した。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、鋼繊維を提供して頂き ました、(株)ブリヂストン社に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 土木学会:鋼繊維補強コンクリート柱部材の設計指 針(案),1999.11
- 柳 博文,松岡 茂,武田康司,松尾庄二ほか:鋼 繊維補強コンクリートのひび割れ分散効果に対す る実験的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.20, No.3, pp.1225-1230, 1998.6
- 二羽淳一郎、山田一宇、横沢和夫、岡村 甫:せん 断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再 評価、土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.
- 4) 喜多俊介,小室文也,二羽淳一郎:短繊維補強された RC 部材の力学的性状,コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1717-1722, 2003.6
- 5) 児玉 亘, 大寺一清, 二羽淳一郎: 短繊維補強され た RC はりのせん断耐力に関する研究, コンクリー ト工学論文集, Vol.26, No.2, pp.1501-1506, 2004.6