

# 論文 ビニロン短繊維を混入した四辺支持 RC 版の押し抜きせん断性状に関する実験的研究

三上 浩\*1・岸 徳光\*2・田口 史雄\*3・栗橋 祐介\*4

**要旨：**本研究では、ビニロン短繊維を混入した RC 版の押し抜きせん断性状に及ぼす短繊維混入率の影響について実験的に検討を行った。検討は、普通コンクリートおよび混入率を 1～3% の 3 種類に変化させた短繊維混入コンクリートを用いた四辺支持 RC 版の静載荷実験により行った。実験の結果、短繊維の混入により RC 版の押し抜きせん断耐力が増加するとともに脆性的な破壊が抑制されること、有効高さ内に形成される押し抜きせん断面がよりゆるやかになること、等が明らかになった。

**キーワード：**RC 版, ビニロン短繊維, 短繊維混入率, 押し抜きせん断

## 1. はじめに

コンクリート材料は引張応力に対して脆性的な破壊性状を示すことから、短繊維混入による引張靱性向上に着目した研究が古くから行われている。これまで、短繊維材料としては鋼繊維が多く用いられており、RC 床版の上面増厚コンクリートや山岳トンネルの吹付けコンクリート等に適用されている<sup>1)</sup>。しかしながら、鋼繊維を用いる場合には、1) 比重が大きいため、材料の運搬やミキサーへの投入が容易でない場合があること、2) 表面に錆が発生し美観を損う可能性があること、等が課題として指摘されている。そのため、最近では軽量で耐食性に優れた合成繊維を用いた研究が行われている。特に、ビニロン繊維は、親水性がありセメントマトリクスとの付着に優れていることから、ビニロン短繊維を混入したモルタルやコンクリートに関する研究が盛んに行われている<sup>2)</sup>。

著者らも、これまでビニロン短繊維を混入した RC 梁の静的および衝撃載荷実験を行い、ビニロン短繊維の混入によって RC 梁のせん断耐力が向上し、破壊形式がせん断破壊型から曲げ

破壊型に移行すること<sup>3)</sup>、衝撃載荷時のエネルギー吸収量が 3 倍程度以上に増大すること<sup>4)</sup>、等を明らかにしている。一方、RC 版のような押し抜きせん断破壊が卓越する部材に短繊維を混入することにより、耐力や変形性能を向上させることも可能であるものと考えられる。しかしながら、ビニロン短繊維を混入した RC 版の押し抜きせん断性状に着目した研究例は少なく、その耐荷性状は未だ明らかにされていないのが現状である。

このような背景より、本研究では、ビニロン短繊維を混入した RC 版の押し抜きせん断性状に及ぼす短繊維混入率の影響について実験的に検討を行った。本実験では、短繊維を混入した場合においても RC 版を確実に押し抜きせん断破壊させるため、四辺支持条件のもと、普通コンクリートおよび短繊維混入コンクリートを用いた RC 版の静載荷実験を実施した。

## 2. 実験概要

表-1 には、本実験に用いた RC 版試験体およびコンクリート配合の一覧を示している。試

\*1 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

\*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)

\*3 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室 室長 (正会員)

\*4 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室 研究員 博(工) (正会員)

表-1 試験体およびコンクリート配合の一覧

| 試験体名 | $V_f$<br>(vol. %) | W/C<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |      | 混和剤 (C × %) |            | スランプ<br>(cm) |
|------|-------------------|------------|--------------------------|-----|------|------|-------------|------------|--------------|
|      |                   |            | W                        | C   | S    | G    | AE 剤        | 高性能 AE 減水剤 |              |
| V0   | 0.0               | 51.0       | 148                      | 290 | 863  | 1058 | 0.002       | -          | 19.5         |
| V1   | 1.0               | 49.1       | 162                      | 330 | 1075 | 775  | 0.001       | 0.7        | 18.0         |
| V2   | 2.0               | 53.0       | 175                      | 330 | 1085 | 725  | 0.0035      | 0.8        | 18.0         |
| V3   | 3.0               | 52.8       | 190                      | 360 | 1307 | 436  | 0.003       | 0.8        | 17.5         |

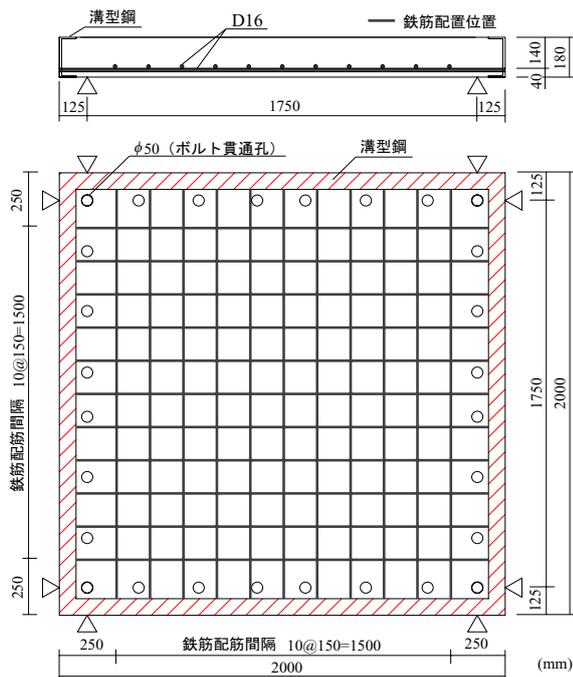


図-1 RC版の形状寸法および配筋状況

試験体数は、短繊維の体積混入率(以後、短繊維混入率 $V_f$ )を4種類( $V_f = 0, 1, 2, 3\%$ )に変化させた全4体である。試験体名は、それぞれ短繊維混入率 $V_f = n\%$ の場合に対して $Vn$ として表している。各コンクリートの配合は短繊維混入後も材料分離がなく、かつ十分に打設可能なスランプを有し、またそれぞれのコンクリートの圧縮強度が同程度となるように決定した。

図-1には、試験体の形状寸法および配筋状況を示している。RC版の寸法は $2,000 \times 2,000 \times 180$  mmである。鉄筋にはD16を用い、版中央部より150 mm間隔で格子状に配置した。なお、鉄筋はRC版の四辺に配置した溝型鋼に溶接し、定着を確保することとした。



写真-1 試験体の設置状況

写真-1には、試験体の設置状況を示している。支持条件は、純スパン長1.75 mの四辺支持とした。写真に示されているように、支点部は回転を許容し浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。なお、載荷板には直径60 mmの鋼製円柱を用い、載荷点はRC版の中央部とした。載荷はRC版に明瞭な押し抜きせん断ひび割れが発生し、荷重が十分に低下するまでとした。

表-2には、各コンクリートの圧縮試験結果の一覧を示している。表より、各コンクリートの圧縮強度は $40 \pm 5$  MPa程度となっていることが分かる。また、短繊維混入コンクリートでは、混入率の増加とともに圧縮強度や弾性係数が低下する傾向にあることが分かる。表-3には、ビニロン短繊維の材料特性値一覧を示している。ビニロン短繊維には、市販されている汎用的なものを用いることとした。また、繊維の長さは粗骨材の最大寸法が25 mmであることを

表-2 コンクリートの力学的特性値

| 試験体名 | 材齢<br>(日) | 圧縮強度<br>(MPa) | 弾性係数<br>(GPa) |
|------|-----------|---------------|---------------|
| V0   | 35        | 38.5          | 30.3          |
| V1   |           | 44.5          | 28.9          |
| V2   |           | 39.7          | 25.1          |
| V3   |           | 34.9          | 22.2          |

表-3 ビニロン短繊維の力学的特性値

| 長さ<br>$l$<br>(mm) | 直径<br>$d$<br>(mm) | アスペクト比<br>$l/d$ | 弾性係数<br>(GPa) | 引張強度<br>(GPa) | 破断ひずみ<br>(%) |
|-------------------|-------------------|-----------------|---------------|---------------|--------------|
| 30                | 0.66              | 45              | 29.4          | 0.88          | 7.0          |

考慮して 30 mm とした。

本実験における測定項目は、載荷荷重 (以後、荷重  $P$ )、版中央部変位 (以後、変位  $\delta$ ) であり、アンプ内蔵のメモリレコーダを用いて一括収録している。また、実験終了後には版の底面および版中央部の切断面を観察している。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 荷重-変位関係

図-2 には、各試験体の荷重-変位関係を示している。図より、V0 試験体の場合には、最大荷重到達後、荷重が急激に低下していることから押し抜きせん断破壊により終局に至っていることが分かる。V1 試験体の場合には、 $P = 300$  kN 程度までは V0 試験体とほぼ同様の耐荷性状を示し、さらに  $P = 350$  kN 程度まで荷重が増大している。また、最大荷重到達後の性状は V0 試験体の場合と大きく異なり、 $\delta = 15$  mm 程度までほぼ線形にゆるやかに荷重が低下している。これは、最大荷重時において押し抜きせん断ひび割れが発生したものの、短繊維の架橋効果によりひび割れの開口が抑制され、急激な荷重低下が緩和されたことによるものと考えられる。

一方、V2、V3 試験体の場合には、 $P = 350$  kN 程度までは V1 試験体とほぼ同様の耐荷性状を

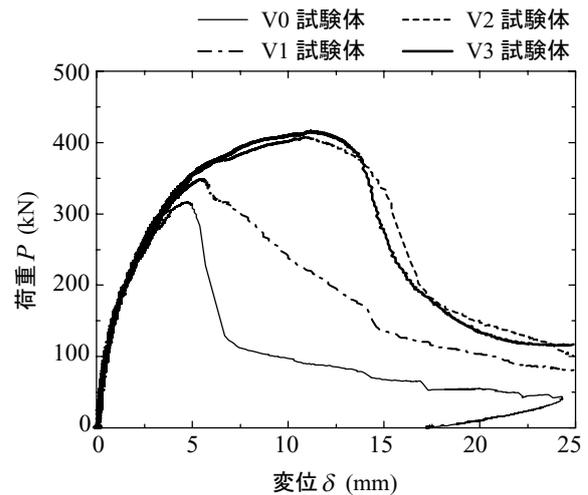


図-2 荷重-変位関係

示し、その後、荷重の増加勾配が低下するものの最終的には  $P = 400$  kN 程度まで荷重が増大していることが分かる。最大荷重到達後は、 $\delta = 15$  mm 程度まで荷重がゆるやかに減少し、その後急激に低下して終局に至っている。

このように、RC 版にビニロン短繊維を混入することにより、押し抜きせん断ひび割れ発生後におけるひび割れの開口が抑制されるため、押し抜きせん断耐力が増大するとともに変形性能も向上することが明らかになった。

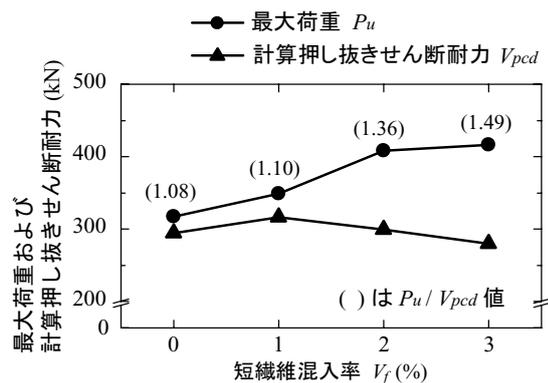
#### 3.2 耐力および変形性能の向上効果

図-3 には、図-2 の荷重-変位関係から得られる (a) 最大荷重、(b) 最大荷重時変位および (c) 吸収エネルギー量の実験結果と短繊維混入率  $V_f$  との関係について示している。また、表-4 には参考のため、これらの実験結果の一覧を示している。図-3(a) には、各  $V_f$  における実測最大荷重  $P_u$  と計算押し抜きせん断耐力  $V_{pcd}$  を比較して示している。なお、 $V_{pcd}$  は前述の各コンクリートの圧縮強度を用い、コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>に準拠して算出している。また、図には  $P_u / V_{pcd}$  値を ( ) 内に付記している。

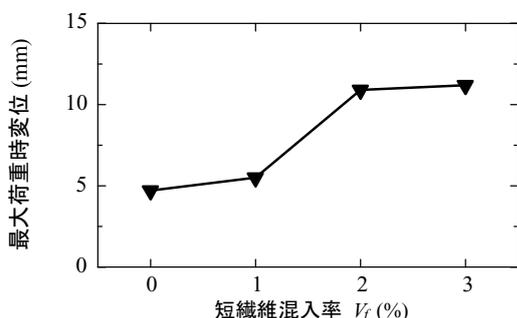
図より、 $V_{pcd}$  は、 $V_f = 1\%$  の場合には、 $V_f = 0\%$  の場合よりも若干大きく、 $V_f = 2, 3\%$  の場合には、 $V_f$  の増加に伴って徐々に低下していることが分かる。これに対して  $P_u$  は、 $V_f$  の増加に伴って大きくなる傾向にある。ただし、 $V_f = 2,$

表-4 実験および計算結果の一覧

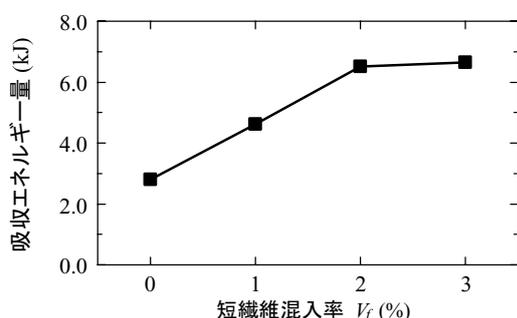
| 試験体名 | 短繊維混入率 $V_f$ (vol.%) | 圧縮強度 (MPa) | 最大荷重 $P_u$ (kN) | 最大荷重時変位 $\delta_u$ (mm) | 計算押し抜きせん断耐力 $V_{pcd}$ (kN) | $P_u / V_{pcd}$ | 吸収エネルギー量 (kJ) |
|------|----------------------|------------|-----------------|-------------------------|----------------------------|-----------------|---------------|
| V0   | 0                    | 38.5       | 317             | 4.7                     | 294                        | 1.08            | 2.80          |
| V1   | 1                    | 44.5       | 349             | 5.5                     | 316                        | 1.10            | 4.61          |
| V2   | 2                    | 39.7       | 408             | 10.9                    | 299                        | 1.36            | 6.52          |
| V3   | 3                    | 34.9       | 416             | 11.2                    | 280                        | 1.49            | 6.64          |



(a) 最大荷重および計算押し抜きせん断耐力



(b) 最大荷重時変位



(c) 吸収エネルギー量

図-3 短繊維混入率との関係

3%では大差が無い。また、 $P_u / V_{pcd}$  値は、 $V_f = 0, 1\%$ では大差が無いものの、 $V_f = 2, 3\%$ と増加することで大幅に増大していることが分かる。

ここで、 $V_{pcd}$  はコンクリートの圧縮強度に依

存するため、 $V_f = 1 \sim 3\%$ の範囲において、 $V_f$ の増加とともに低下したものと考えられる。一方、 $P_u$ が上記 $V_f$ の範囲において増大したのは、ビニロン短繊維混入RC版の押し抜きせん断耐力は、圧縮強度のみならずビニロン短繊維の架橋効果の影響を強く受け、その度合いは $V_f$ に大きく依存することを示している。ただし、 $V_f = 2\%$ から $3\%$ とした場合における $P_u / V_{pcd}$ 値の増加割合は、 $V_f = 1\%$ から $2\%$ とした場合における増加割合に比べて小さいことより、 $V_f$ の増加による押し抜きせん断耐力向上効果には上限があるものと考えられる。

図-3(b)より、最大荷重時変位は、 $V_f = 2\%$ までは $V_f$ の増加に伴って増大する傾向にあることが分かる。特に、 $V_f$ を $1\%$ から $2\%$ とした場合にその増加割合が大きい。また、 $V_f = 3\%$ では $V_f = 2\%$ とほぼ同様の結果となっている。

図-3(c)には、荷重-変位関係のループで囲まれる面積で評価される吸収エネルギー量を示している。ここで、吸収エネルギー量は、V0試験体の最大変位(約24 mm)に達した時点までのループの面積とした。したがって、短繊維を混入した試験体では最大変位が24 mm以上であるため、吸収エネルギー量を幾分少なく評価していることになる。図より、 $V_f = 2\%$ までは $V_f$ の増加に伴って吸収エネルギー量がほぼ線形に増大していることが分かる。一方、 $V_f = 3\%$ では $V_f = 2\%$ とほぼ同程度の値を示している。

以上より、短繊維を混入したRC版の最大荷重、最大荷重時変位および吸収エネルギー量は $V_f$ の増加とともに増大する傾向にあることが明

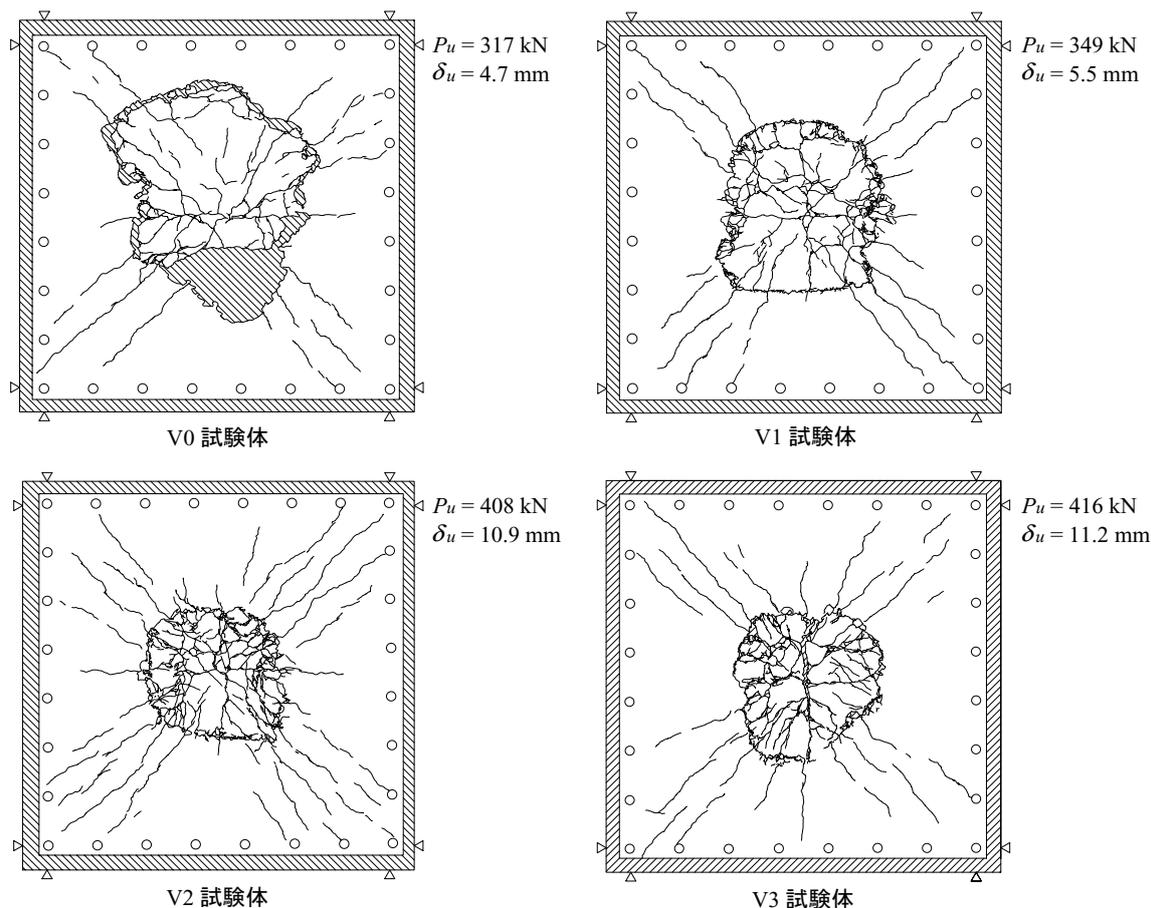


図-4 実験終了後のRC版底面のひび割れ分布性状

らかとなった。ただし、 $V_f = 2\%$  と  $3\%$  の結果の差異は小さく、 $V_f$  の増加による架橋効果の向上には上限があるものと考えられる。これは、ひび割れ開口後において、ビニロン短繊維と付着するモルタルマトリクスそのものの強度が、 $2\%$  混入時ではほぼ限界に達しているためと推察される。

### 3.3 実験終了後におけるひび割れ分布性状

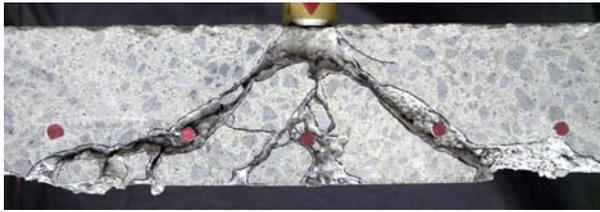
図-4には、実験終了後におけるRC版底面のひび割れ分布性状を示している。なお、各試験体のひび割れ図の右上には、実測最大荷重  $P_u$  および最大荷重時変位  $\delta_u$  を示している。図より、いずれの試験体も版中央を中心とし円形状にひび割れが発生していることより、押し抜きせん断破壊により終局に至っていることが分かる。

V0 試験体の場合には、円形状ひび割れの発生範囲が最も大きく、一部のかぶりコンクリートが大きく剥落している。ビニロン短繊維を混入した場合には、 $V_f$  の増大に伴って円形状ひび割

れの発生範囲が小さくなり、また微細なひび割れが分散して数多く発生する傾向にあることが分かる。なお、V3 試験体の場合には V2 試験体とほぼ同様のひび割れ分布性状を示している。ここで、V0 試験体の円形状ひび割れの発生範囲が最も大きいのは、後述するように下縁かぶり部のひび割れがゆるやかに形成されたためである。

写真-2には、RC版中央部切断面のひび割れ状況を示している。写真より、いずれの試験体においてもRC版中央部に押し抜きせん断コーンが形成されていることが分かる。また、短繊維を混入した試験体の場合には、ひび割れ開口部において短繊維が破断もしくは引き抜けている状況が見られ、 $V_f$  が大きい場合には、短繊維が一部のひび割れを架橋している状況を確認できる。

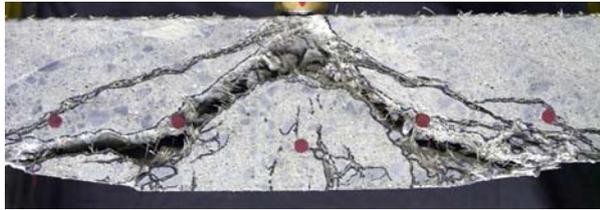
V0, V1 試験体の場合には、載荷点部から鉄筋位置までほぼ  $45$  度の角度でひび割れが発生し、



(a) V0 試験体



(b) V1 試験体



(c) V2 試験体



(d) V3 試験体

## 写真-2 切断面のひび割れ状況

またかぶり部には45度よりもゆるやかな角度でひび割れが発生し、ともに大きく開口していることが分かる。一方、V2試験体の場合には、V0、V1試験体と類似の円錐状ひび割れの他、その外側に角度のゆるやかな斜めひび割れが発生していることが分かる。一方、V3試験体の場合には、V2試験体の外側の押し抜きせん断面のように角度のゆるやかな円錐状ひび割れのみが発生し大きく開口している。

このように、 $V_f$ の増大に伴って有効高さ内の押し抜きせん断ひび割れの発生角度がゆるやかになる傾向にあることが明らかになった。従って、V0、V1試験体よりもV2、V3試験体の方が押し抜きせん断耐力が大きく、かつ最大荷重時変位が大幅に増大するのは、有効高さ内の押し抜きせん断面がよりゆるやかに形成され、せん断面の周長が長くなることに関連するものと考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、ビニロン短繊維混入によるRC版の押し抜きせん断性状に及ぼす短繊維混入率の影響について実験的に検討を行った。検討は、普通コンクリートおよび混入率を3種類に変化させた短繊維混入コンクリートを用いた四辺支持RC版の静載荷実験により行った。本研究により得られた知見をまとめると以下のとおりで

ある。

- 1) 短繊維の混入率を増加することでRC版の押し抜きせん断耐力は増大し、変形性能も向上する。ただし、混入率が2%と3%では大差が無いことから、短繊維の架橋効果には上限があるものと考えられる。
- 2) 押し抜きせん断耐力の増大や変形性能の向上に関連して、短繊維混入率が大きいほどRC版の有効高さ内にゆるやかな押し抜きせん断面が形成される。

### 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50，1983
- 2) コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う，2001.1
- 3) 田口史雄，三上 浩，栗橋祐介，岸 徳光：ビニロン短繊維混入RC梁の耐荷性状に及ぼす短繊維混入率の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.287-292，2003
- 4) 岸 徳光，田口史雄，三上 浩，栗橋祐介：ビニロン短繊維を混入したRC梁の耐衝撃性に及ぼす短繊維混入率の影響，構造工学年次論文集，Vol.50A，III，pp.1337-1348，2004.3
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書，2002