

論文 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

田口 史雄^{*1}・三上 浩^{*2}・栗橋 祐介^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨： ビニロン短繊維の混入による RC 梁の耐荷性能向上効果に関する検討を行うことを目的に、短繊維混入率の異なるコンクリートを用いた RC 梁の静載荷実験を行った。本研究では、普通コンクリート使用時にせん断破壊する RC 梁を対象として、短繊維混入率を変化させた実験を行い、RC 梁の耐荷性状や破壊性状に及ぼす短繊維混入率の影響に関する検討を行った。その結果、短繊維混入率の増大に伴ってせん断耐力が向上し、RC 梁の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などが明らかになった。

キーワード： RC 梁, ビニロン短繊維, 短繊維混入率, 耐荷性能, 破壊性状

1. はじめに

引張応力に対して脆性的な破壊性状を示すモルタルやコンクリートの靱性能を向上させるために、種々の短繊維を混入した高靱性モルタル・コンクリートに関する研究が諸研究機関で実施されている。これまでは、鋼繊維を混入したコンクリートに関する研究が数多く実施されており、平成 11 年には土木学会より鉄筋コンクリート (RC) 柱部材を対象とした設計指針が出版されている¹⁾。一方で、鋼繊維の使用により構造物の重量が大きくなることや、構造物表面の錆の発生が懸念されること等が検討課題となっている。そのため、最近ではビニロン短繊維などの軽量で耐食性に優れる合成繊維を用いた研究も盛んに行われている²⁾。しかしながら、これまでの研究はモルタルの高靱性化に着目したものが多く、ビニロン短繊維混入による RC 部材の耐荷性能の向上効果等に関しては十分に検討されていないのが現状である。

このような観点より、本研究ではビニロン短繊維混入コンクリート (以後、高靱性コンクリート) の RC 部材への適用を想定し、高靱性コンクリートを用いた RC 梁の静載荷実験を行った。

本実験では、普通コンクリートを使用した場合にせん断破壊する RC 梁を対象として、梁の耐荷性状や破壊性状に及ぼすビニロン短繊維の体積混入率 (以後、短繊維混入率 V_f) の影響に関する検討を行った。

2. 実験概要

表-1 には、本実験に用いた RC 梁の一覧を示している。試験体は、普通コンクリートおよび短繊維混入率を 3 種類に変化させた高靱性コンクリートを用いた全 4 体の複鉄筋 RC 梁である。試験体名は、短繊維の体積混入率 $V_f = n\%$ の場合に対して Vn として表している。また、表中のせん断余裕度 α は、計算曲げ耐力 P_{uc} に

表-1 試験体の一覧

試験体名	短繊維混入率 V_f (vol.%)	計算曲げ耐力 P_{uc} (kN)	計算せん断断耐力 V_{uc}^* (kN)	せん断余裕度 α
V0	-	179.4	112.7	0.63
V1	1	177.9	107.8	0.61
V2	2	175.5	99.1	0.56
V3	3	175.1	97.7	0.56

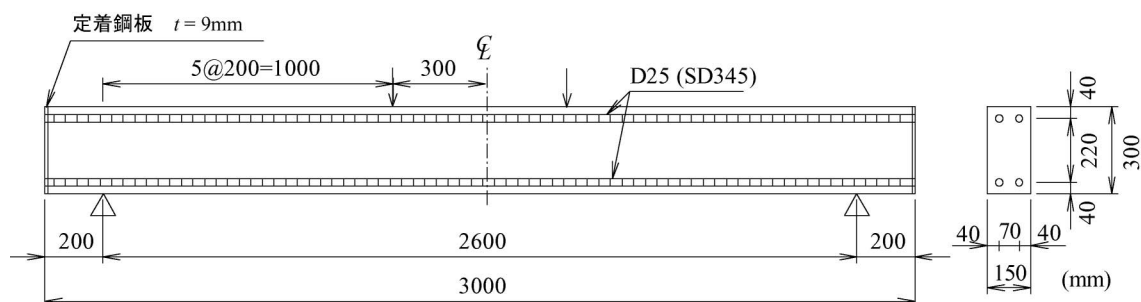
* ただし、V1/2/3 試験体の V_{uc} は、普通コンクリートの場合と同様の算定法で求めた参考値

*1 (独)北海道開発土木研究所 室長 材料研究室 (正会員)

*2 三井住友建設(株) 室長 技術研究所土木研究開発部 博(工) (正会員)

*3 (独)北海道開発土木研究所 研究員 材料研究室 博(工) (正会員)

*4 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)



図－１ 試験体の概要

表－２ コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値

V_f (vol. %)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C × %)		スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G	AE 剤	高性能 AE 減水剤		
0	48	140	290	870	1065	0.002	0.5	10.0	6.5
1	49	162	330	1075	775	0.001	0.7	10.4	4.3
2	53	175	330	1085	725	0.0035	0.8	10.5	4.8
3	52	190	360	1307	436	0.003	0.8	10.3	5.6

表－３ ビニロン短繊維の寸法と材料特性値

長さ l (mm)	直径 d (mm)	アスペクト比 l/d	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪み (%)
30	0.66	45	29.4	0.88	7.0

対する計算せん断耐力 V_{uc} の比として算出している。ここで、 P_{uc} および V_{uc} は、それぞれ後述の材料特性値を用い、コンクリート標準示方書³⁾に準拠して普通コンクリート使用時と同様の方法で算出している。表より、各試験体でコンクリートの圧縮強度が異なるため、 P_{uc} 、 V_{uc} が若干異なるものの、せん断余裕度 α は 0.6 程度となっていることより、普通コンクリート使用時にはせん断破壊することが予想される。

図－１には、RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。本実験に用いた試験体は、全断面寸法(幅×高さ)が 150 × 300 mm、純スパン長が 2.6 m、軸方向筋に D25 (SD345) を用いた複鉄筋 RC 梁である。なお、せん断補強筋は配置していない。また、いずれの試験体も等曲げ区間を 60 cm としているため、せん断スパン比は 3.85 となっている。

表－２には、コンクリート配合の一覧を示している。各コンクリートの配合は、圧縮強度が同等で、かつポンプ圧送による実用化を想定し

てスランプが 10 cm 程度となるように決定した。また、空気量は耐凍害性を考慮して 5 % 程度となるように決定している。表－３には、ビニロン短繊維の寸法および材料特性値の一覧を示している。

本実験の測定項目は、載荷荷重およびスパン中央部変位(以後、単に変位)である。また、実験時にはひび割れの進展状況を詳細に把握するため、主鉄筋降伏時までは荷重 10 kN 毎に、それ以降は変位 5 mm 毎にデジタルカメラを用いて梁側面のひび割れ分布を撮影している。

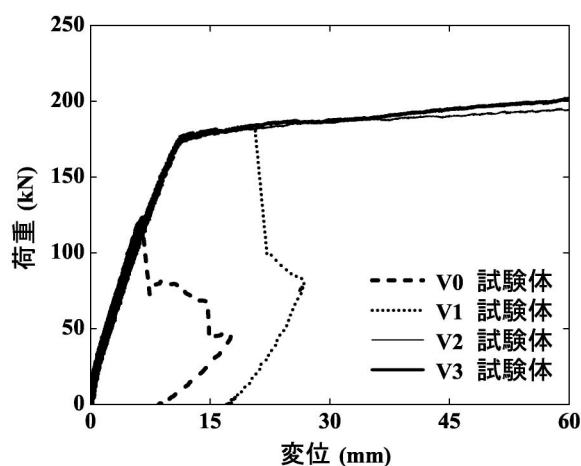
3. 高靱性コンクリートの力学性能

表－４には、各コンクリートの力学的な性能試験結果を示している。表には、圧縮、曲げおよび割裂引張試験結果を示している。なお、各試験法および評価法は、土木学会コンクリート標準示方書〔規準編〕土木学会規準³⁾に示されている鋼繊維補強コンクリートに関する規定に準拠している。

表より、圧縮強度は短繊維混入率 V_f の増大に伴って小さくなっており、弾性係数も同様の傾向を示していることが分かる。また、圧縮靱性係数は $V_f = 1 \%$ の場合で最大となり、 $V_f = 2, 3 \%$ でほぼ同程度となっている。これは、圧縮

表－４ コンクリートの力学性能試験結果

短繊維混入率 V_f (vol. %)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	圧縮靱性係数 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	曲げ靱性係数 (MPa)	引張強度 (MPa)
-	60.3	39.0	-	4.80	0.73	3.66
1	52.7	33.1	36.0	4.98	3.71	4.11
2	41.0	28.3	31.6	6.32	5.52	4.82
3	39.3	26.3	31.8	6.65	5.89	4.99



図－２ 荷重－変位関係

強度が異なることに影響されているものと考えられる。一方、曲げ強度、曲げ靱性係数および引張強度は、混入率の増大とともに大きくなっていることが分かる。

なお、本研究では、前述のようにいずれのコンクリートも圧縮強度がほぼ同等となるように配合を決定しているにもかかわらず、最大で 20 MPa 程度異なっている。これは、打設時のミキサーの容量が配合試験時のものに比較して大きく、練り混ぜ効率が高かったため、各配合の W/C の違いが大きく影響したことによるものと考えられる。

4. RC 梁の耐荷性能

4.1 荷重－変位関係

図－２には、各 RC 梁試験体の荷重－変位関係を示している。図より、短繊維を混入していない V0 試験体は、計算せん断耐力 ($V_{uc} = 112.7$ kN) を 10 kN 程度上回った後急激に荷重が低下していることから、せん断破壊により終局に至っていることが分かる。また、短繊維混入率 $V_f = 1\%$ とした V1 試験体は、荷重 $P = 180$ kN



V1 試験体



V2 試験体



V3 試験体

写真－１ V1 試験体の最大荷重時近傍におけるひび割れ分布性状

程度で主鉄筋が降伏し剛性勾配が低下した後、変位 $\delta = 24$ mm 程度で荷重が急激に低下しせん断破壊に至っている。

これに対し、 $V_f = 2, 3\%$ とした V2/3 試験体は V1 試験体とほぼ同様の荷重レベルで主鉄筋の降伏に至っているものの、その後もせん断破壊には至らず若干の荷重増加を伴いながら変位が漸増している。また、V3 試験体の場合には、V2 試験体の場合よりも主鉄筋降伏後の荷重が多少大きく示されている。

このように、ビニロン短繊維の混入率 V_f を 2, 3 % 程度にすることにより、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が明らかになった。なお、本実験においては、RC 梁の主鉄筋降伏荷重に及ぼす V_f の影響は顕著ではない。これは、本実験に用いた RC 梁の主鉄筋比が比較的大きいため、曲げひび割れ発生後に短繊維が分担する引張力が、主鉄筋のそれに比較して小さいことによるものと推察される。また、V0 試験体の初期剛性は、他の試験体よりも若干大きく示されている。これは、V0 試験体のコンクリートの弾性係数が、4 試験体の中で最も大きいことに対応している。

4.2 ひび割れ分布性状

写真-1 には、 $V_f = 1\%$ とした V1 試験体の最大荷重時 ($P_{ue} = 184.2 \text{ kN}$) 近傍におけるひび割れ分布性状を V1, V2 および V3 試験体について示している。ここでは、斜めひび割れの分布性状に着目した検討を行うため、左側等せん断力区間における性状について示している。なお、実験時には液晶モニターを用いて荷重および変位値を表示し、梁のひび割れの進展状況と併せて撮影している。写真右上のモニターに示されている上段および下段の数値は、それぞれ荷重 (kN)、スパン中央部変位 (mm) である。写真より、V1 試験体の場合には、載荷点から支点側に向かって 2 本の斜めひび割れが発生していることが分かる。また、これらのひび割れのうち、部材軸とのなす角 θ が小さいひび割れは、主鉄筋配置位置まで進展し、さらに主鉄筋に沿う割裂ひび割れに連なり開口していることが分かる。

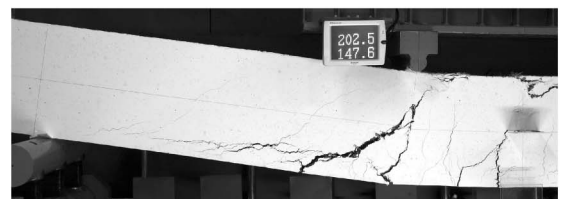
V2 試験体の場合には、断面高さ中央部近傍において $\theta = 45^\circ$ 程度の斜めひび割れが 2 本発生しているものの、大きなひび割れの開口には至っていない。これは、短繊維の架橋効果が効率的に作用し、斜めひび割れ発生後における急激なひび割れの開口には至らず、斜めひび割れが等せん断力区間に分散して発生したためと考



V0 試験体



V1 試験体



V2 試験体



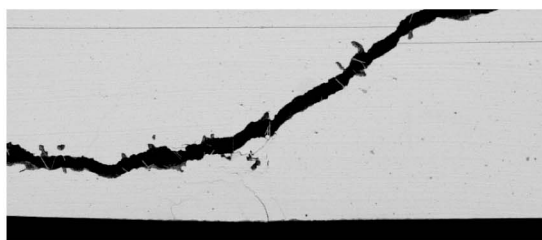
V3 試験体

写真-2 終局時におけるひび割れ分布性状

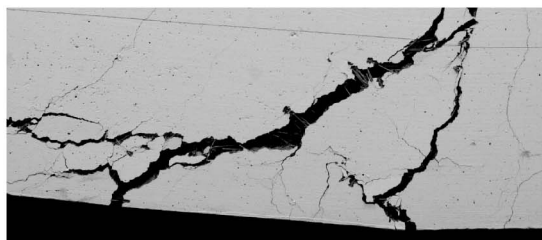
えられる。さらに、V3 試験体の場合には、主鉄筋の降伏に伴う曲げおよび曲げせん断ひび割れの発生は認められるものの、V1/2 試験体に発生した直線的な斜めひび割れの発生は見られない。このように、 V_f の増加に伴い斜めひび割れの発生および開口が抑制されていることが分かる。

写真-2 には、各試験体の終局時におけるひび割れ分布性状を梁中央部から左側支点までの範囲について示している。ここで、V0/1 試験体の場合には、せん断破壊により荷重が急激に低下した時点での結果を示している。また、V2/3 試験体の場合には、油圧ジャッキのストロークの限界により実験を終了しているため、変位 $\delta = 150 \text{ mm}$ 近傍における破壊性状を示している。

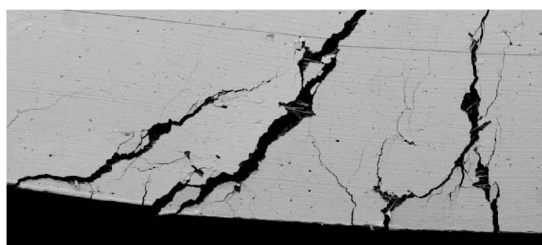
写真より、V0 試験体の場合には、等せん断力区間において大きく開口した 2 本のアーチ状



V1 試験体



V2 試験体



V3 試験体

写真－3 実験終了後における梁下縁部のひび割れ分布性状

ひび割れの他、載荷点近傍の上側および支点部近傍の下側には軸方向鉄筋に沿った割裂ひび割れが発生していることが分かる。V1 試験体の場合には、等せん断力区間において載荷点から支点側に向かって発生した斜めひび割れおよび支点部近傍の割裂ひび割れが大きく開口し、さらに支点側に進展している。ただし、V0 試験体とは異なり、上端鉄筋に沿った割裂ひび割れは見られず、またスパン中央部には主鉄筋が降伏することによって発生した曲げひび割れの開口が見られる。

V2/3 試験体の結果を見ると、梁が大きくたわみ曲げ変形が卓越していることが分かる。また、V2 試験体の等曲げ区間における上縁コンクリートは著しく圧壊し、かつ等せん断力区間の下縁には割裂ひび割れの発生が見られるのに対し、V3 試験体の場合には上縁コンクリートの損傷が比較的軽微であり割裂ひび割れも見ら

れない。これらの結果より、短繊維混入率を大きくすることによって、破壊形式がせん断破壊型から曲げ破壊型に移行するとともに、大変形時における付着割裂も抑制可能であることが明らかになった。

写真－3 には、ひび割れ開口部における短繊維の架橋状況を詳細に検討するため、実験終了後の梁下縁部におけるひび割れ分布性状を示している。写真より、V1 試験体の場合には、斜めひび割れにより梁が二分されており、ひび割れ開口部の繊維は全て引抜けもしくは破断に至っている。

これに対し、V2/3 試験体の場合には、複数のひび割れの開口が見られ、さらにその周辺には微細なひび割れが発生している。これは、短繊維の架橋効果によりひび割れが分散して分布していることを示している。また、ひび割れ開口部では、未だ引抜けや破断などを生じずに、ひび割れを架橋している短繊維も多く見られる。従って、V2/3 試験体は、本実験で得られた曲げ破壊による最大荷重よりもさらに大きなせん断耐力を有しているものと推察される。

5. せん断耐力向上効果

前章までの検討により、短繊維混入率 V_f を大きくすることによって、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が明らかになった。一方、土木学会より出版されている「鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針 (案)」(以下、指針)¹⁾ では、鋼繊維の混入によりせん断補強筋を有しない RC 部材のせん断耐力が普通コンクリート使用時の $(1 + \kappa)$ 倍になるものとして、せん断耐力算定式を提案している。なお、指針では比較的配合設計が容易な $V_f = 1.0 \sim 1.5\%$ の鋼繊維補強コンクリートを対象としており、その場合 $\kappa = 1.0$ としてよいとしている。以後の検討では、指針による鋼繊維補強 RC 部材の計算せん断耐力値を用いて、ビニロン短繊維混入によるせん断耐力の向上効果を比較検討する。

表－５ せん断耐力向上効果の評価

試験体名	短繊維混入率 V_f (vol. %)	実測耐力 P_{ue} (kN)	指針による鋼繊維補強コンクリートの計算せん断耐力 V'_{uc} (kN)	P_{ue} / V'_{uc}	破壊形式
V0	-	123.7	(112.7)	(1.10)	せん断破壊
V1	1	184.2	215.6	0.85	主鉄筋降伏後せん断破壊
V2	2	203.5	198.2	1.03	曲げ破壊
V3	3	217.4	195.4	1.11	曲げ破壊

表－５には、本実験結果の実測耐力 P_{ue} 、指針による鋼繊維補強コンクリートの計算せん断耐力 V'_{uc} 、およびこれらの比 P_{ue} / V'_{uc} と破壊形式の一覧を示している。ただし、V0 試験体の V'_{uc} は、コンクリート標準示方書³⁾に準拠して算定したものである。

表より、 $V_f = 1\%$ の V1 試験体の場合には、実測耐力 P_{ue} が計算せん断耐力 V'_{uc} を下回っていることが分かる。これは、ビニロン短繊維の弾性係数が鋼繊維の 1/7 程度と小さいため、ひび割れ抑制効果が鋼繊維に比して小さいことによるものと考えられる。ただし、 $V_f = 1\%$ の場合においても、計算せん断耐力 V'_{uc} の 85 % 程度のせん断耐力を有していることが分かる。一方、V2/3 試験体の場合には、共に実測耐力 P_{ue} が V'_{uc} を上回りかつ破壊形式が曲げ破壊となっていることより、両試験体のせん断耐力は、 V'_{uc} と同等以上であるものと考えられる。

以上のことより、ビニロン短繊維混入によるせん断耐力向上効果は鋼繊維を混入する場合に比較して多少小さいものの、 $V_f = 2\%$ とすることにより、RC 梁のせん断耐力を指針に規定されている鋼繊維補強 RC 部材の計算せん断耐力 V'_{uc} と同等以上に向上可能であることが明らかになった。

なお、既往の文献²⁾では、単位体積当りのビニロン短繊維のコストは、鋼繊維の場合に比較して 1 割から最大 6 割程度低いとの試算結果を示している。従って、ビニロン短繊維の V_f を鋼繊維使用時よりも多少大きくする場合においても、両繊維を混入したコンクリートのコストには大差がないものと考えられる。また、ビニ

ロン短繊維の混入による RC 部材の靱性能向上効果も十分に期待できることより、今後は耐力および靱性の観点から、鋼繊維を用いる場合とのコストおよび性能比較や、RC 部材の耐荷性能に及ぼす短繊維混入率の影響に関する詳細な検討を行う必要があるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、ビニロン短繊維混入コンクリートの RC 部材への適用を想定し、普通コンクリート使用時にせん断破壊する RC 梁を対象として、RC 梁の耐荷性状や破壊性状に及ぼす短繊維混入率の影響に関する検討を行った。本実験で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) ビニロン短繊維の混入率 V_f を大きくすることによりせん断耐力が増大し、破壊形式がせん断破壊型から曲げ破壊型に移行する。
- 2) ビニロン短繊維の混入により、軸方向鉄筋に沿って生じる付着割裂破壊が抑制される。
- 3) $V_f \geq 2\%$ とすることにより、「鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案）」に規定されている鋼繊維補強 RC 部材の計算せん断耐力以上に向上可能である。

参考文献

- 1) 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），1999
- 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，2002.1
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書，2002