

論文 PVA 短繊維の架橋効果による RC 梁のせん断耐力向上効果

田口 史雄*1・岸 徳光*2・三上 浩*3・栗橋 祐介*4

要旨：ポリビニルアルコール (PVA) 短繊維の混入による RC 梁のせん断耐力向上効果を検討するため、短繊維混入率の異なる 5 種類のコンクリートを用いた一軸引張試験および RC 梁の静載荷実験を行った。また、一軸引張試験結果に基づいたコンクリートの残存引張強度を用いて RC 梁のせん断耐力増分の推定を試みた。その結果、1) 短繊維混入率を大きくすることにより、RC 梁のせん断耐力が向上すること、2) 短繊維混入による RC 梁のせん断耐力増分は、コンクリートの残存引張強度を用いた提案式により概ね評価可能であること、などが明らかになった。

キーワード：PVA 短繊維，架橋効果，RC 梁，せん断耐力，残存引張強度

1. はじめに

コンクリートの引張靱性能の向上を目的として、種々の短繊維を用いる方法が古くから検討されている。最近では、従来用いられてきた鋼繊維の他、耐食性に優れる合成繊維を使用する場合に関しても検討されており、その実用化が進められている。特に、ポリビニルアルコール (PVA) 繊維は、親水性がありモルタルとの付着性に優れることから、今後さらなる適用範囲の拡大が期待される材料である^{1),2)}。

著者らはこれまで、PVA 短繊維混入による RC 構造物の耐力向上および高靱性を目的として、短繊維を混入した RC 梁および版の静載荷実験を実施し、ひび割れに対する短繊維の架橋効果による耐荷性能の向上効果を確認している^{3),4)}。特に、RC 梁に関しては PVA 短繊維を混入することによってせん断耐力が最大で 2 倍程度にまで増大し、せん断破壊型の梁が曲げ破壊型に移行すること等を明らかにしている。しかしながら、これまでの検討は実験ケースが少なく、また破壊形式が曲げ破壊型に移行しているため短繊維混入によるせん断耐力向上

効果を定量的に評価するまでに至っていない。

これより、本研究では、PVA 短繊維混入による RC 梁のせん断耐力向上効果の評価法を確立することを目的として、普通コンクリート使用時にせん断破壊に至る RC 梁を対象に、短繊維混入率を 0.5 % きざみで 2.0 % まで変化させた RC 梁に関する静載荷実験を行った。また、短繊維混入コンクリートの一軸引張試験により得られた引張応力 - 開口変位関係を用いることにより、短繊維混入による RC 梁のせん断耐力増分の推定も試みた。

表 - 1 試験体および計算耐力の一覧

試験体名	短繊維混入率 V_f (vol. %)	圧縮強度 f'_c (MPa)	計算曲げ耐力 P_{uc} (kN)	計算せん断耐力 V_c (kN)	せん断余裕度 α
F0	0	59.7	335.1	100.5	0.30
F0.5	0.5	53.4	318.0	96.9	0.30
F1.0	1.0	60.4	337.0	100.9	0.30
F1.5	1.5	47.9	301.8	93.4	0.31
F2.0	2.0	52.3	314.9	96.2	0.31

*1 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室 室長 (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 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (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)

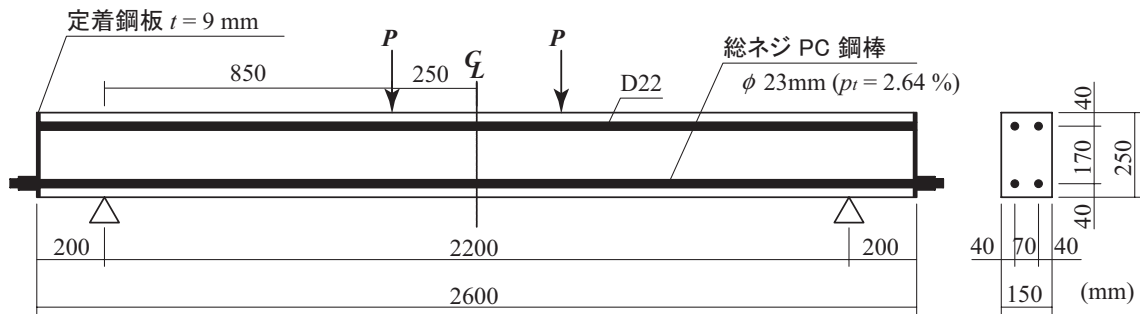


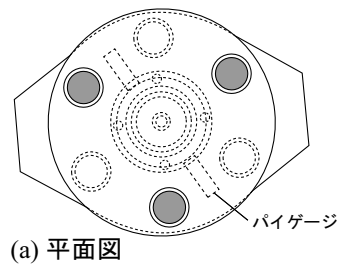
図 - 1 試験体の概要

表 - 2 各コンクリートの配合一覧

V_f (vol. %)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C × %)		スランプ (cm)
			W	C	S	G	高性能 AE 減水剤	AE 剤	
0	48	45	140	290	850	1060	0.8	-	13.0
0.5	52	60	170	330	1085	735	0.6	-	7.5
1.0	52	60	170	330	1085	735	1.0	-	9.5
1.5	53	70	190	360	1210	530	0.5	0.001	10.0
2.0	53	70	190	360	1210	530	0.7	0.0005	8.5

表 - 3 PVA 短繊維の寸法および材料特性値

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 (%)
30	0.66	45	29.4	0.88	7.0



(a) 平面図

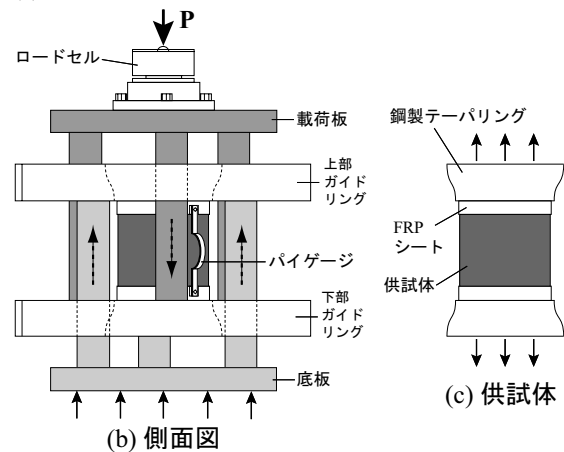


図 - 2 一軸引張試験の概要

2. 実験概要

2.1 RC 梁の静荷重実験の概要

表 - 1 には、本実験に用いた RC 梁の一覧を示している。試験体数は、短繊維を混入していない梁と短繊維混入率を 4 種類に変化させた梁の全 5 体である。表には、各試験体に用いたコンクリートの圧縮強度 f'_c 、短繊維の混入効果を見逃した際の計算曲げ耐力 P_{uc} および計算せん断耐力 V_c 、せん断余裕度 α を示している。ここで、 f'_c は短繊維混入の有無にかかわらず、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して測定している。また、 α は、計算曲げ耐力 P_{uc} に対する計算せん断耐力 V_c の比として算出したものである。ここで、 P_{uc} および V_c は、各コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を用いてコンクリート標準示方書に準拠して算出している。表より、いずれの梁

も $\alpha = 0.3$ 程度 (≤ 1.0) となっていることより、短繊維を考慮しない場合にはせん断破壊で終局に至る設計となっていることが分かる。

図 - 1 には、RC 梁の形状寸法を示している。用いた RC 梁は、断面寸法が 15×25 cm、純スパン長が 2.2 m の複鉄筋 RC 梁である。また、試験体の設計においては、主鉄筋比を過大に

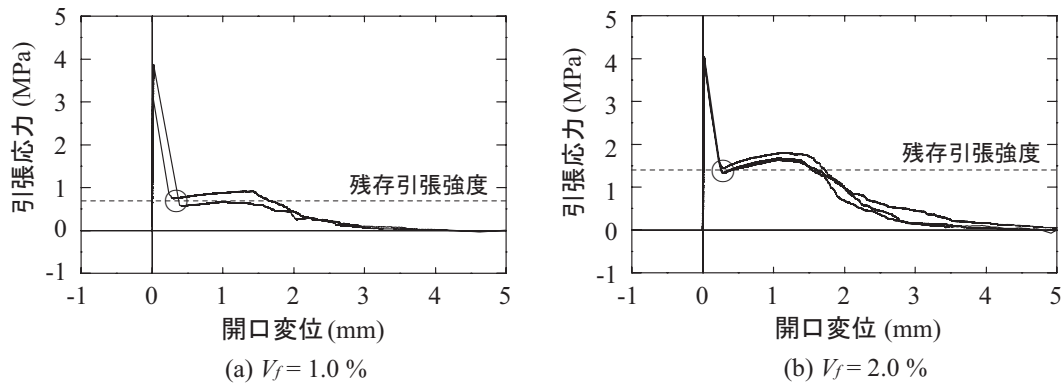


図 - 3 一軸引張試験による短繊維混入コンクリートの引張応力 - 開口変位関係

することなく、かつできるだけ計算曲げ耐力 P_{uc} が計算せん断耐力 V_c よりも大きくなるように、主鉄筋として降伏強度の高い総ネジ PC 鋼棒を用いることとした。なお、せん断補強鉄筋は配置していない。実験時には、荷重点間隔を 50 cm と設定していることより、せん断スパン比 a/d (a : せん断スパン長, d : 有効高さ) は 4.0 となっている。PC 鋼棒の降伏強度は 1,071 MPa であった。

表 - 2 には、各コンクリートの配合一覧を示している。また、表 - 3 には、PVA 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、荷重荷重およびスパン中央点変位 (以後、変位) であり、それぞれ静荷重測定用ロードセルおよび非接触式レーザ変位計を用いて測定した。また、実験終了後には、梁側面に発生したひび割れをトレースし、ひび割れ分布図を作成している。

2.2 短繊維混入コンクリートの残存引張強度

本研究に用いた短繊維混入コンクリートは、後述の一軸引張試験結果のように、ひび割れが発生してコンクリート自体の引張強度が消失した後、短繊維の架橋効果により最大で 1.4 MPa 程度の引張強度 (以後、残存引張強度 f_r) を保持する引張特性を示している。本研究では、このような実験結果に基づき、残存引張強度 f_r を用いて短繊維混入による RC 梁のせん断耐力向上効果の評価を試みることにした。

本研究では、コンクリートの一軸引張試験を図 - 2 に示しているような、圧縮力 P を加

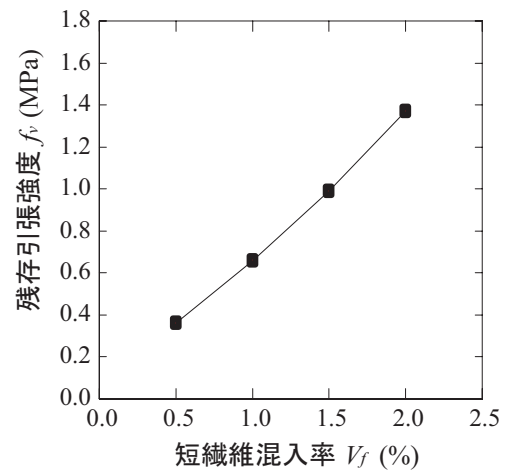


図 - 4 短繊維混入率 V_f と残存引張強度 f_r との関係

えることで円柱供試体 ($\phi 10$ cm, 高さ 20 cm) に簡易に引張力を作用させることが可能な鋼製治具を用いて行っている。荷重は、万能試験機を用いて荷重速度 0.01 mm/s 程度で行った。荷重および変位の計測は、それぞれロードセルおよびパイゲージを用いて行っている。

図 - 3 には、短繊維混入コンクリートの引張特性の例として、短繊維混入率が $V_f = 1.0\%$ および 2.0% の場合における一軸引張試験の代表的な結果を示している。図より、いずれの場合も引張応力が最大値に到達した直後、ひび割れの発生により急激に低下していることが分かる。しかしながら、引張応力は短繊維の架橋効果により零レベルまでは低下せず、再度緩やかに応力が増加してピークを向かえた後、ひび割れの開口変位 (以後、単に開口変位) 1.5 mm 程度以降に短繊維の破断もしくは抜け出しにより応力が徐々に低下している。

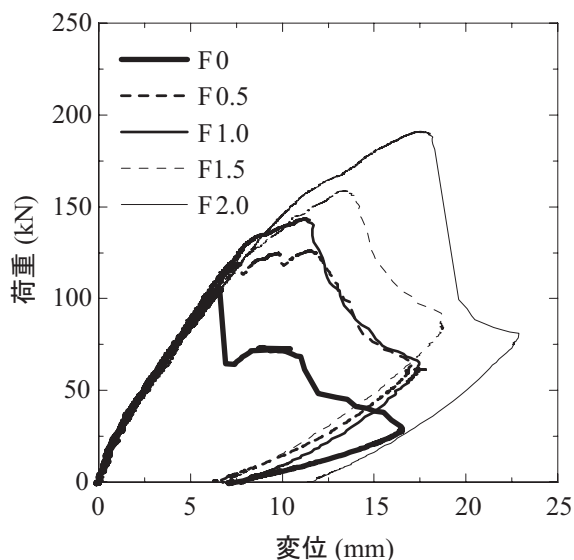


図 - 5 荷重 - 変位関係

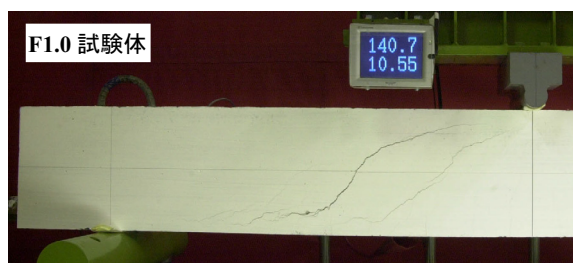


写真 - 1 剛性低下後におけるひび割れ状況

本研究では、残存引張強度 f_v は、各供試体のひび割れ発生直後の応力値(図-3の印部分)の平均値として求めている。図-4には、短繊維混入率 V_f と各コンクリートの残存引張強度 f_v との関係を示している。図より、 f_v は V_f の増加に伴ってほぼ線形に増大していることが分かる。

3. RC 梁の静荷重実験結果および考察

3.1 荷重 - 変位関係

図-5には、各RC梁の荷重 - 変位関係の実験結果を示している。図より、いずれの試験体もF0試験体の最大荷重時 ($P = 105 \text{ kN}$) 程度までは、ほぼ線形に荷重が増大していることが分かる。その後、F0試験体の場合には荷重が急激に低下するのに対し、短繊維を混入した試験体の場合にはさらに荷重が増大している。また、その耐力増分は、短繊維混入率が大きい場合ほど大きい。なお、短繊維を混入した

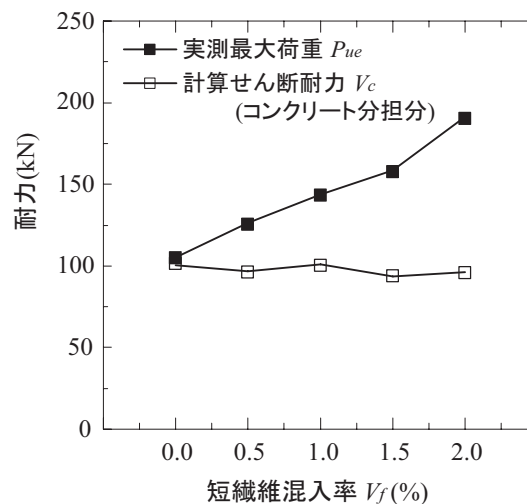


図 - 6 実測最大荷重 P_{ue} と短繊維混入率 V_f の関係

試験体の場合には、最大荷重到達前に若干の剛性勾配の低下が見受けられる。これは、斜めひび割れが発生した後、短繊維の架橋効果によりひび割れの開口が抑制されたことに対応するものと考えられる。写真-1には、F1.0試験体の剛性低下後におけるひび割れ発生状況を示している。写真より、斜めひび割れが開口しているにもかかわらず未だせん断破壊に至っていないことがわかる。

図-6には、各試験体の実測最大荷重 P_{ue} と短繊維混入率 V_f との関係を示している。なお、図には参考のため、表-1に示した各試験体の計算せん断耐力 V_c も合わせて示している。図より、短繊維を混入していないF0試験体の場合には、実測最大耐力 P_{ue} と計算せん断耐力 V_c がほぼ対応していることが分かる。一方、短繊維を混入した試験体の場合には、 V_f が大きいほど実測最大荷重 P_{ue} が V_c を大きく上回る傾向にある。また、 P_{ue} は、 V_f の増大に伴いほぼ線形に増大していることが分かる。ここで、前述の残存引張強度 f_v も、短繊維混入率 V_f の増加に伴ってほぼ線形に増加していることから、短繊維混入によるRC梁のせん断耐力の増加は、コンクリートの残存引張強度の増加と密接に関連していることが推察される。

3.2 ひび割れ分布性状

図-7には、実験終了後における各試験体の

表 - 4 実測最大荷重 P_{ue} と計算せん断耐力 V_F の比較

試験体名	短繊維混入率 V_f (vol.%)	コンクリートの残存引張強度 f_v (MPa)	計算せん断耐力のコンクリート分担分 V_c (kN)	計算せん断耐力の短繊維分担分 V_F (kN)	計算せん断耐力 $V_{uc} (= V_c + V_F)$ (kN)	実測最大荷重 P_{ue} (kN)	P_{ue}/V_{uc}
F0	0	-	100.5	-	100.5	105.1	1.05
F0.5	0.5	0.36	96.9	19.7	116.6	126.1	1.08
F1.0	1.0	0.66	100.9	36.2	137.1	143.6	1.05
F1.5	1.5	0.99	93.4	54.2	147.7	158.7	1.07
F2.0	2.0	1.37	96.2	75.1	171.3	191.2	1.12

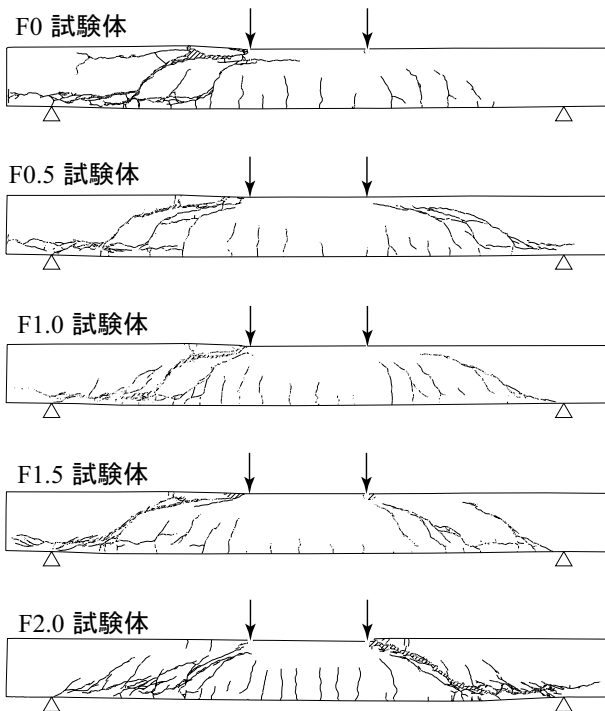


図 - 7 ひび割れ分布性状

ひび割れ分布性状を示している。図より、F0試験体の場合には、左側スパンにおいてアーチ状のひび割れと上下端鉄筋に沿う割裂ひび割れが連結し、これらが大きく開口していることが分かる。このような性状は、短繊維を混入した試験体においてもほぼ同様に見られるが、短繊維混入率 V_f の増加に伴ってアーチ状のひび割れが直線状のひび割れに推移する傾向にあることが分かる。特に、F2試験体の場合には、上端鉄筋に沿う割裂ひび割れは見られず、載荷点から両支点側に向かって45度下方に進展する斜めひび割れと下端鉄筋に沿う割裂ひび割れが顕著に発生している。これは、短繊維の混入により、上端鉄筋に沿う割裂ひび割れが

抑制されたことによるものと推察される。

4. 短繊維混入によるせん断耐力増分の評価

前章までの検討から、短繊維混入によるRC梁のせん断耐力の増分が、コンクリートの残存引張強度と密接に関連している可能性のあることが示唆された。本章では、斜めひび割れ発生後、そのひび割れを架橋する短繊維がせん断耐力を分担するとの考え方にに基づき、せん断耐力の短繊維分担分 V_F の評価に関する検討を行う。なお、土木学会の「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」⁶⁾では、上述のような考え方によりせん断耐力の短繊維分担分 V_F の算定式を提案している。本研究では、その算定式を準用し下式(1)により検討することとした。

$$V_F = 2 \times b \times (z/\tan\theta) \times f_v \quad (1)$$

ここに、 b : ウェブ幅、 $z = d/1.15$ 、 d : 有効高さ、 f_v : 短繊維混入コンクリートの残存引張強度、である。なお、指針⁶⁾では、超高強度繊維補強コンクリート(UFC)の設計平均引張強度 f_{vd} を用いることが規定されている。しかしながら、本研究に用いた短繊維混入コンクリートはひび割れ発生後急激な応力低下を示す材料であり、UFCとは引張特性が大きく異なるため、ここではひび割れ発生後の残存引張強度 f_v を用いることとしている。また、ひび割れ角度 θ については、指針⁶⁾ではせん断応力および軸方向の圧縮応力の値を用いて主応力

面を算出する形で推定することとしている。しかしながら、本研究では、スターラップを配置した RC 梁に関する検討も念頭に置いていることより、ひび割れ角度 θ をせん断耐力のスターラップ分担分 V_s 算定の際に仮定されている θ と対応させる必要があるものと考えられる。従って、ここでは θ を一義的に 45 度と仮定して V_F の評価を行うこととした。なお、前述のひび割れ分布図より、斜めひび割れの角度は概ね 30 ~ 45 度程度であることより、 θ を 45 度と仮定することにより V_F を安全側に評価できるものと考えられる。

表 - 4 には、実測最大荷重 P_{ue} と計算せん断耐力 V_{uc} の一覧を示している。計算せん断耐力 V_{uc} は、表 - 1 に示されている V_c に V_F を加算した値である。表より、計算せん断耐力 V_{uc} は、実測最大荷重 P_{ue} と良好に対応していることが分かる。このことから、PVA 短繊維混入によるせん断耐力の向上効果は、一軸引張試験により得られる残存引張強度を用いることで概ね評価可能であることが明らかになった。

今後は、RC 梁の断面寸法が異なる場合やスターラップを配置した場合等に関する検討を行い、汎用性の高い評価手法を確立することが肝要であるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、PVA 短繊維混入による RC 梁のせん断耐力向上効果の評価法を確立することを目的として、普通コンクリート使用時にせん断破壊する RC 梁を対象に、短繊維混入率を変化させた RC 梁の静載荷実験を行った。また、短繊維混入コンクリートの一軸引張試験により得られた引張応力 - 開口変位関係を用いることにより、せん断耐力の短繊維分担分の評価を試みた。本実験において得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 本研究に用いた短繊維混入コンクリートにおいては、ひび割れ発生後短繊維の架橋効果により、ひび割れ幅 1.5 mm 程度ま

では残存引張強度を保持する。また、残存引張強度は、短繊維混入率 V_f にほぼ比例して増大する。

- 2) 短繊維混入による RC 梁のせん断耐力向上効果は、短繊維混入率の増加に対応してほぼ線形に増大する。
- 3) RC 梁側面に発生するひび割れは、短繊維混入率の増加に伴い、アーチ状のひび割れから直線的なひび割れに推移する。これは、短繊維の混入により上端鉄筋に沿う割裂ひび割れが抑制されることによるものと考えられる。
- 4) PVA 短繊維混入によるせん断耐力の向上効果は、コンクリートの一軸引張試験により得られる残存引張強度を用いた算定式により概ね評価可能である。

参考文献

- 1) コンクリート工学協会：高韌性セメント複合材料を知る・作る・使う，2002.
- 2) 伊藤 始，岩波光保，横田 弘：PVA 短繊維で補強した RC はりのせん断耐力評価に関する実験的研究，土木学会論文集，No.774/V-65, pp.123-138, 2004.
- 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) 三上 浩，岸 徳光，田口史雄，栗橋祐介：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.2, pp.1555-1560, 2004.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 (2002 制定)【構造性能照査編】，2002.
- 6) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)，コンクリートライブラリー 113，2004.