

# 論文 PVA 短繊維を混入した RC 梁の曲げ耐荷性状

栗橋 祐介<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・田口 史雄<sup>\*3</sup>・三上 浩<sup>\*4</sup>

要旨：本研究では、ポリビニルアルコール (PVA) 短繊維の混入による RC 梁の曲げ耐荷性能の向上効果の検討を目的として、主鉄筋比の異なる複鉄筋 RC 梁を対象に短繊維の体積混入率を 3 種類に変化させた場合の静載荷実験を行った。また、各コンクリートの一軸引張試験を実施し、その引張特性をモデル化して断面分割法による短繊維混入 RC 梁の曲げ耐荷性能の推定を試みた。その結果、短繊維混入コンクリートの引張特性を適切にモデル化することにより、短繊維混入による RC 梁の曲げ耐荷性能の向上効果を大略推定可能であることが明らかになった。

キーワード：PVA 短繊維混入コンクリート, 引張特性, RC 梁, 曲げ耐荷性状

## 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、種々の短繊維を混入する方法が検討されている。従来まで鋼繊維が多く用いられてきたが<sup>1)</sup>、近年では耐食性に優れる合成繊維も採用されるようになってきた。特に、ポリビニルアルコール (PVA) 短繊維は、親水性がありセメントマトリクスとの付着性に優れることから、諸研究機関においてこの種の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進められている<sup>2)</sup>。

PVA 短繊維の RC 部材への適用に着目した研究としては、短繊維混入による RC 梁のせん断耐力の向上に着目した研究が実施されている<sup>3)</sup>。著者らも RC 梁を対象とした実験により、短繊維混入による RC 梁のせん断耐力向上効果を確認している<sup>4)</sup>。しかしながら、短繊維混入による RC 部材の曲げ耐荷性能の向上効果に着目した検討事例は少ない。しかしながら、短繊維混入 RC 部材の合理的設計手法確立のためには、短繊維を混入した場合のせん断耐荷性状は勿論のこと曲げ耐荷性状を明らかにす

ることが肝要である。

このような観点より、本研究では、PVA 短繊維を混入した RC 梁の曲げ耐荷性状を特定することを目的として、主鉄筋比の異なる複鉄筋 RC 梁を対象に短繊維の体積混入率を 3 種類に変化させた 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結果に基づきその引張特性をモデル化し、断面分割法を用いて短繊維混入 RC 梁の曲げ耐荷性能の推定を試みた。

## 2. 実験概要

表 - 1 には、本実験に用いた試験体の一覧を

表 - 1 試験体の一覧

試験体名	主鉄筋比 $p_t$ (%)	短繊維混入率 $V_f$ (vol. %)
A-F0	0.55 (D13)	0
A-F1		1
A-F2		2
B-F0	1.23 (D19)	0
B-F1		1
B-F2		2

\*1 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)

\*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 三井住友建設(株)技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

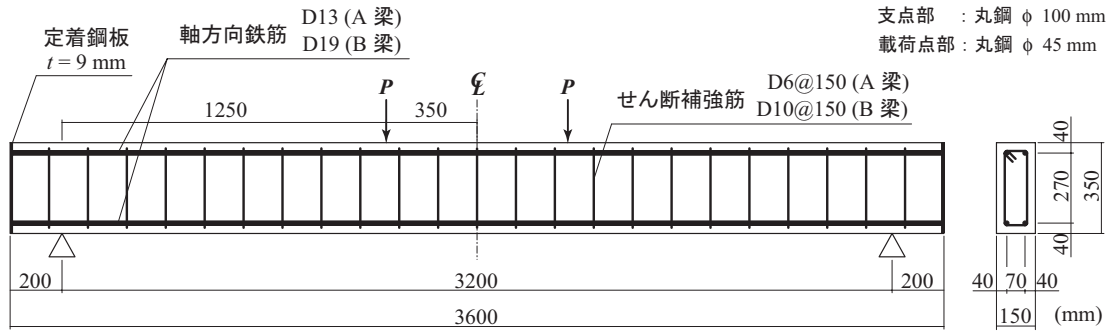


図 - 1 試験体の形状寸法および配筋状況

表 - 2 各コンクリートの示方配合一覧

$V_f$ (vol. %)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (C × %)		スランプ (cm)
		W	C	S	G	AE 剤	高性能 AE 減水剤	
0	48	140	290	850	1060	-	0.8	13.0
1	52	170	330	1085	735	-	1.0	9.5
2	53	190	360	1210	530	0.005	0.7	8.5

表 - 3 各 RC 梁のコンクリート圧縮強度およびせん断余裕度の一覧

梁の種類	材齢 (日)	短繊維混入率 $V_f$ (vol. %)	圧縮強度 (MPa)	計算曲げ耐力 $P_{uc}$ (kN)	計算せん断耐力 $V_{uc}$ (kN)	せん断余裕度 $\alpha (=V_{uc}/P_{uc})$
A-F0	36	0	59.7	47.2	155.8	3.30
A-F1		1	60.3	47.4	156.1	3.29
A-F2		2	52.3	46.7	152.4	3.26
B-F0		0	59.7	101.0	314.7	3.11
B-F1		1	60.3	101.1	315.0	3.11
B-F2		2	52.3	100.0	310.2	3.10

表 - 4 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

示している。試験体数は、主鉄筋比  $p_t$  を 2 種類、PVA 短繊維の体積混入率 (以後、短繊維混入率  $V_f$ ) を 3 種類に変化させた全 6 体である。表中、試験体名の第 1 項目の英文字は梁の種類 (A:  $p_t = 0.55\%$ , B:  $p_t = 1.23\%$ ) を示し、第 2 項目の F に付随する数値は短繊維混入率  $V_f$  を示している。

図 - 1 には、本実験に用いた試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、断面寸法 (幅 × 高さ) 15 × 35 cm、純スパン長 3.2

m の複鉄筋矩形 RC 梁である。A および B 梁には、軸方向鉄筋としてそれぞれ D13 および D19 を用い、スターラップとして D6 および D10 を 150 mm 間隔で配置している。せん断スパン比は、荷点間隔を 70 cm としていることより 4.0 となっている。表 - 2 には、各コンクリートの示方配合の一覧を示している。

表 - 3 には、各 RC 梁のコンクリート強度、短繊維の効果を検討しない場合の計算曲げ耐力  $P_{uc}$  および計算せん断耐力  $V_{uc}$ 、せん断余裕度  $\alpha$  を一覧にして示している。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、 $\alpha$  は、計算曲げ耐力  $P_{uc}$  に対する計算せん断耐力  $V_{uc}$  の比として算出したものである。ここで、 $P_{uc}$  および  $V_{uc}$  は、各コンク

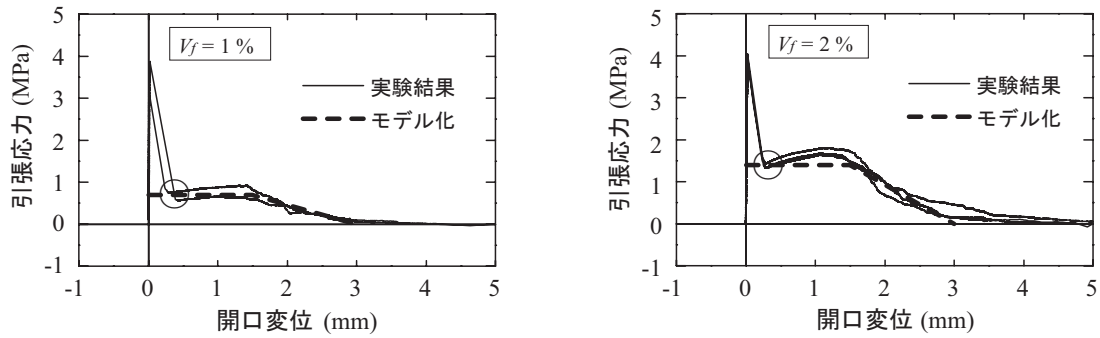


図 - 3 一軸引張試験による短繊維混入コンクリートの引張応力 - 開口変位関係

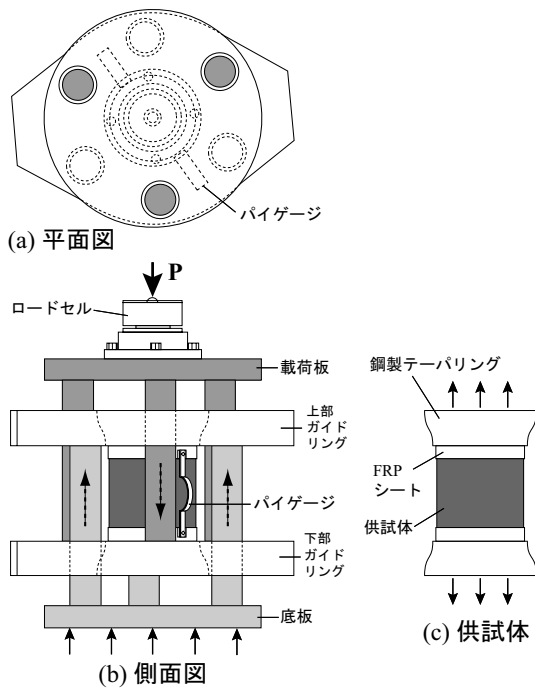


図 - 2 一軸引張試験の概要

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。表から分かるように、いずれの梁もせん断余裕度  $\alpha$  が 3 程度となるように設計されており、静載荷時には曲げ破壊が卓越する形で終局に至ることが予想される。表 - 4 には、PVA 短繊維の力学的特性値の一覧を示している。鉄筋の降伏強度は、D13 および D19 でそれぞれ 361, 370 MPa であった。本実験の測定項目は、載荷荷重およびスパン中央点変位 (以後、変位) である。また、実験時にはデジタルカメラによりひび割れの進展状況を撮影している。

また、コンクリートの一軸引張試験は、図 - 2 に示しているように、圧縮力  $P$  を加えること

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の治具を用いて行っている。載荷は、万能試験機を用いて載荷速度 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。円柱供試体は、1 配合ごとに 4 体ずつ製作し試験に供することとした。なお、本試験結果において、供試体端部で破壊した結果については検討から除外することとしている。

### 3. 短繊維混入コンクリートの引張特性のモデル化

#### 3.1 一軸引張試験結果

図 - 3 には、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 - ひび割れ開口変位 (以後、単に開口変位) 関係を示している。図より、いずれの場合も最大引張応力到達後、ひび割れの発生により引張応力が急激に減少していることが分かる。しかしながら、引張応力は零レベルまでは低下していない。これは、ひび割れ発生部における短繊維の架橋効果により、コンクリートの引張破壊が抑制されているためである。なお、ひび割れ発生直後の応力低下は、短繊維混入率  $V_f$  が大きい場合ほど小さい。また、 $V_f = 1, 2\%$  の場合ともに、開口変位  $\delta = 1.5$  mm 程度までは、引張応力が多少増大するもののほぼ同程度の値を示し、その後開口変位  $\delta$  の増加に伴って引張応力が徐々に低下し、 $\delta = 3.0$  mm においてほぼ零

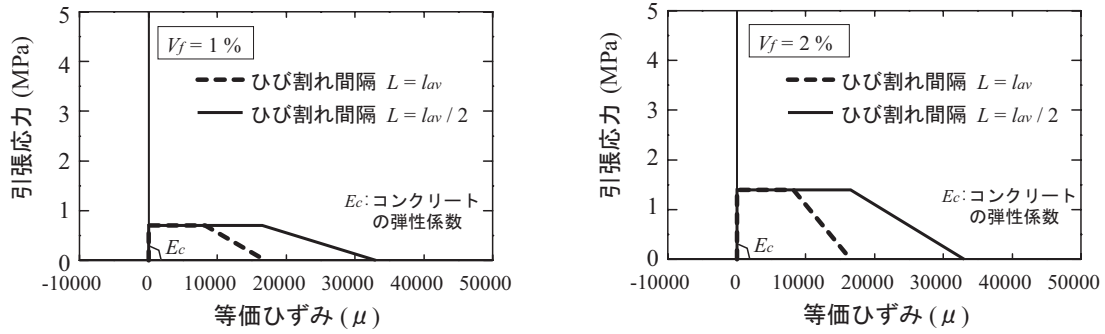


図 - 4 短繊維混入コンクリートの引張応力 - 等価ひずみ関係のモデル図 (A 梁)

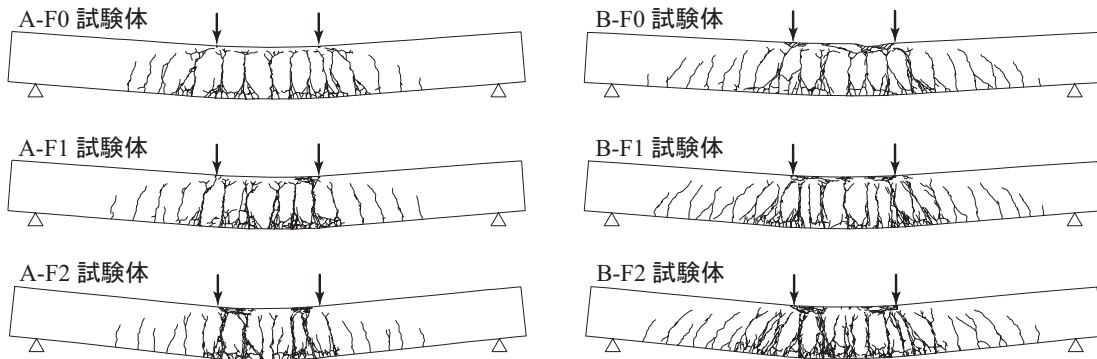


図 - 5 実験終了後におけるひび割れ分布性状

に至っている。

### 3.2 引張特性のモデル化

本研究では、短繊維混入 RC 梁の曲げ耐荷性能を推定するために、上述の引張応力 - 開口変位関係を簡略化して、図 - 3 に示される破線のようにモデル化することとした。すなわち、ひび割れ発生後、短繊維の架橋効果が発揮される領域を対象に、開口変位  $\delta = 1.5 \text{ mm}$  までは一定の引張応力を保持し、その後線形に低下し  $\delta = 3.0 \text{ mm}$  において零応力になるようにモデル化した。なお、本研究では、コンクリートが  $\delta = 1.5 \text{ mm}$  まで保持する引張応力の値は、各供試体におけるひび割れ発生直後の応力値 (図 - 3 の 印部分) の平均としている。

また、上記モデルを用いて、断面分割法により断面の曲げモーメントを算定するためには、開口変位をある区間 (ひび割れ間隔  $L$ ) における等価ひずみに換算する必要がある。ここでは、ひび割れ間隔  $L$  を、1) 示方書<sup>5)</sup>を参考に下式 (1) により求めた平均ひび割れ間隔  $l_{av}$  と

する場合、2) 後述の実験時におけるひび割れ分布性状を参考に  $l_{av}/2$  とする場合についても検討することとした。

$$l_{av} = 4c + 0.7(c_s - \phi) \quad (1)$$

ここで、 $c$  は主鉄筋のかぶり、 $c_s$  は主鉄筋の中心間隔、 $\phi$  は主鉄筋径、である。なお、上式により  $l_{av}$  は、A および B 梁の場合でそれぞれ 17.4 および 15.8 cm と算出される。図 - 4 には、A 梁の  $V_f = 1, 2 \%$  の場合における引張応力 - 等価ひずみ関係を示している。

## 4. RC 梁の静載荷実験結果および考察

### 4.1 ひび割れ分布性状

図 - 5 には、各 RC 梁の実験終了後におけるひび割れ分布図を示している。図より、短繊維を混入することにより、ひび割れ発生部が短繊維で架橋されるため、ひび割れが分散して多数発生していることが分かる。また、ひび割れの大きな開口は主に等曲げ区間において見ら

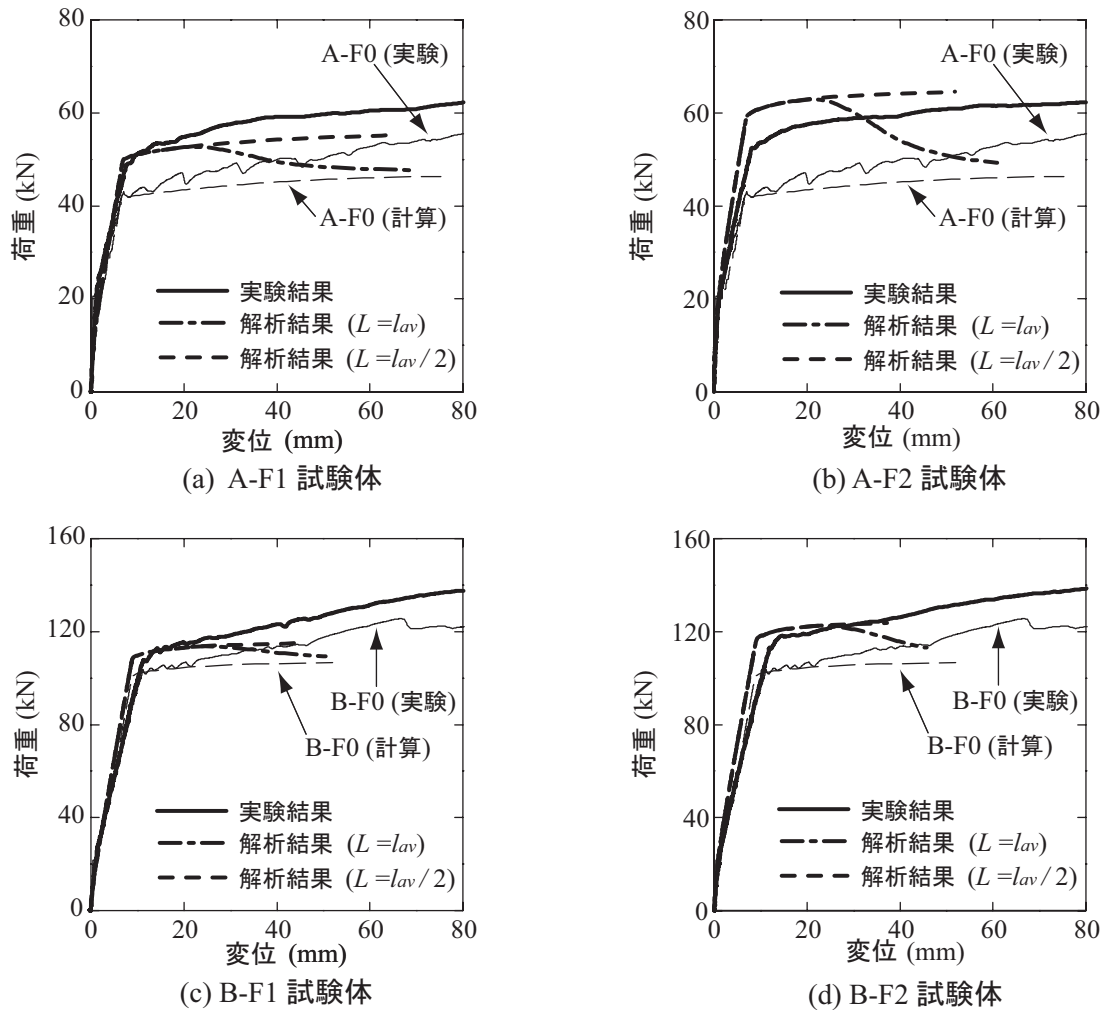


図 - 6 荷重 - 変位曲線に関する実験および解析結果の比較図

れ、そのひび割れ間隔は、ほぼ 15 cm 程度である。これは、前述の平均ひび割れ間隔  $l_{av}$  とほぼ対応している。ただし、これらのひび割れの間にも微細なひび割れが多数発生しており、この傾向は特に短繊維を多く混入した場合に顕著である。

#### 4.2 荷重 - 変位関係

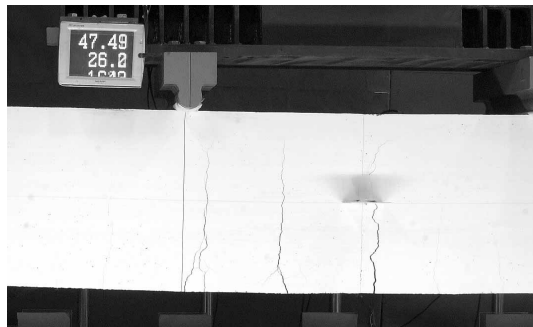
図 - 6 には、実験および断面分割法による解析結果の荷重 - 変位関係を比較して示している。なお、参考のため、短繊維を混入していない A/B-F0 試験体の実験および計算結果も合わせて示している。

実験結果を見ると、短繊維を混入することにより RC 梁の降伏荷重および最大荷重が増大し、その増分は短繊維混入率  $V_f$  が大きいほど大きくなっていることが分かる。また、このような傾向は、A 梁の方が B 梁よりも大きく示

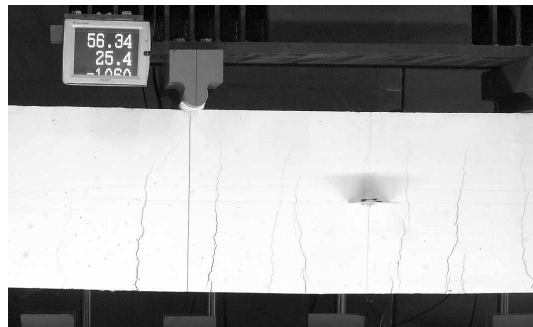
されている。これは、A 梁の場合には、B 梁と比較して主鉄筋比  $p_t$  が小さいため、短繊維が負担する引張力の影響が顕著に現れることによるものと考えられる。

次に、各試験体の実験結果を解析結果と比較すると、ひび割れ間隔  $L$  を平均ひび割れ間隔  $l_{av}$  と仮定する場合には、A, B 梁ともに荷重が主鉄筋降伏後に低下する傾向を示しており、実験結果の性状と対応していないことが分かる。

一方、ひび割れ間隔  $L$  を  $l_{av}/2$  と仮定する場合には、降伏後においても解析結果の荷重が低下せず、実験結果の性状とほぼ対応していることが分かる。これは、短繊維の混入によりひび割れが分散して多数発生するため、実験結果のひび割れ間隔  $L$  は、示方書で求められる平均ひび割れ間隔  $l_{av}$  よりも小さく評価すべきであることを暗示している。



(a) A-F0 試験体



(b) A-F1 試験体

写真 - 1 主鉄筋降伏後のひび割れ状況

写真 - 1 には、A-F0/1 試験体に関する主鉄筋降伏後の同一変位時 ( $\delta = 25 \text{ mm}$  程度) における等曲げ区間のひび割れ分布性状を示している。写真より、A-F1 試験体の場合には、A-F0 試験体の場合よりも密な間隔で幅の狭いひび割れが発生していることが分かる。

なお、図 - 6 において、A-F2 試験体の場合には、降伏荷重の向上割合が他の試験体に比較して最も大きいものの、解析結果を下回っている。このことより、短繊維混入による曲げ耐力の向上効果には上限がある可能性が推察される。本実験結果の範囲内では、曲げ耐力の向上割合が最大で 2 割程度であったが、今後実験データを蓄積し詳細に検討する必要がある。また、他の試験体に関しては、短繊維混入によって RC 梁の曲げ耐力性能が向上する性状が実験および解析結果でほぼ対応して現れていることから、短繊維混入 RC 梁の曲げ耐力性状はコンクリートの引張特性を適切にモデル化することによって、断面分割法により大略再現可能であるものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、PVA 短繊維を混入した RC 梁の曲げ耐力性状を特定することを目的として、主鉄筋比の異なる複鉄筋 RC 梁を対象に短繊維混入率を 3 種類に変化させた RC 梁に関する静載荷実験を行った。また、別途実施した短繊維混入コンクリートの一軸引張試験結果に基づいてその引張特性をモデル化し、断面分割法を用いて短繊維混入 RC 梁の曲げ耐力性能の推定を試みた。本実験から得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) 短繊維を混入することにより、RC 梁の降伏荷重および最大荷重は増大する。また、その増分は短繊維混入率  $V_f$  が大きいほど大きくなる。ただし、本実験における耐力向上割合の上限は 2 割程度であった。
- 2) 短繊維混入による曲げ耐力性能の向上効果は、主鉄筋比  $p_t$  が小さいほど大きく現れる傾向にある。
- 3) 短繊維混入コンクリートの引張特性を適切にモデル化することにより、短繊維混入による RC 梁の曲げ耐力性能の向上効果を大略推定可能である。

## 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.
- 3) 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.
- 4) 田口史雄，三上 浩，栗橋祐介，岸 徳光：ビニロン短繊維混入 RC 梁の耐力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, pp.287-292, 2003.
- 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.