

論文 PVA 短繊維を混入した RC 柱の正負交番載荷実験

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

要旨： 本研究では、PVA 短繊維混入による RC 柱の靱性能向上効果を検討することを目的に、短繊維混入率 V_f を 0～3 % に変化させた RC 柱の水平交番載荷実験を実施した。その結果、短繊維の混入により RC 柱基部近傍の斜めひび割れや割裂ひび割れが抑制され、エネルギー吸収性能が向上することや、その効果は短繊維混入率が高い場合ほど大きく示されることなどが明らかになった。また、短繊維混入による RC 柱のせん断耐力向上効果が、靱性能の向上と密接に関連していることが明らかになった。

キーワード： PVA 短繊維, RC 柱, 正負交番載荷実験, 靱性能

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐荷性能の向上やコンクリート片の剥落防止を目的に、種々の短繊維を混入したコンクリートに関する研究が進められている。最近では、耐食性に優れ、かつ親水性がありセメントモルタルとの付着性に優れるポリビニルアルコール (PVA) 短繊維に着目した研究が多く見受けられる。

著者らも、これまで PVA 短繊維を混入した RC 梁・版の静載荷実験を行い、PVA 短繊維の架橋効果により RC 部材の曲げおよびせん断耐力が向上することを明らかにしている¹⁾。このような効果は、曲げやせん断力の作用を繰り返し受ける RC 柱の靱性能向上法にも応用できるものと考えられる。既往の研究では、鋼繊維補強コンクリートや高靱性セメント複合材料を用いた RC 柱の靱性能に関する検討が行われており、その効果が確認されている^{2),3)}。しかしながら、一般的なコンクリートに PVA 短繊維などの有機系短繊維を混入する場合に関する研究事例はほとんど見当たらない。

このような背景より、本研究では、PVA 短繊維混入による RC 柱の靱性能向上効果に関する基礎的資料の収集を目的に、PVA 短繊維の体積

混入率 (以後、短繊維混入率 V_f) を 0～3 % に変化させた RC 柱の水平交番載荷実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

本研究に用いた試験体は、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 体の RC 柱である。試験体名は、英文字の V と短繊維混入率 $V_f (\%)$ の組み合わせにより示している。

図-1 には、試験体および載荷装置の概要を示している。本実験に用いた試験体は、断面寸法が 25 × 25 cm、柱部の高さが 1 m の単一 RC 柱

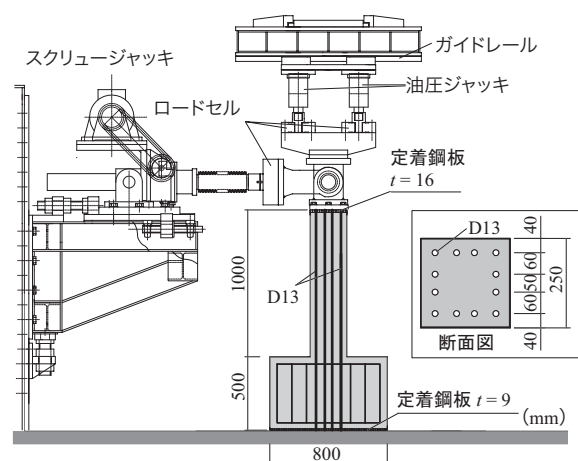


図-1 試験体および載荷装置の概要

*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 研究員 博(工) (正会員)

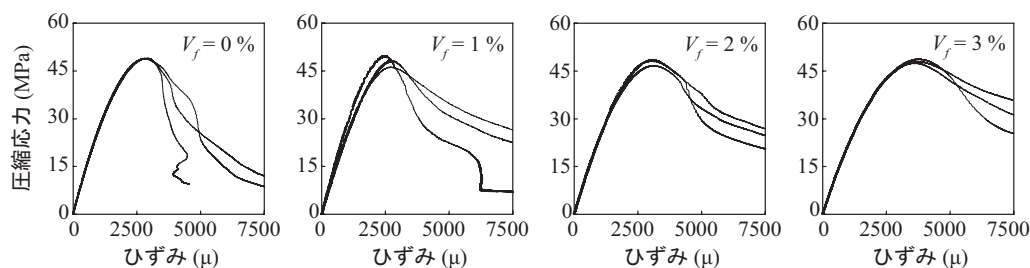
*2 室蘭工業大学 建設システム工学科教授 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 上席研究員 (正会員)

表－１ コンクリートの配合一覧

V_f (vol. %)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤		スラ ンプ (cm)
		W	C	S	G	高性能減水剤 (C × %)	増粘剤 (W × %)	
0	48	162	337	887	1015	-	-	22.0
1	50	170	338	1150	729	1.13	0.05	13.5
2	50	190	378	1134	657	1.41	0.15	17.5
3	50	210	426	1115	582	1.82	0.40	18.0



図－２ 圧縮強度試験結果

である。軸方向鉄筋には、SD295D13 を 12 本用いており、軸方向鉄筋比は 2.43 % である。軸方向鉄筋の降伏強度は 387 MPa であった。なお、本実験では、PVA 短繊維の効果を検討しやすくするために、帯鉄筋は配置していない。

表－１には、各コンクリートの示方配合を示している。また、PVA 短繊維には、直径および長さがそれぞれ 0.66, 30 mm, 弾性係数および引張強度がそれぞれ 29.4, 0.88 GPa のものを用いた。

2.2 実験方法

本研究では、各コンクリートの圧縮および引張強度試験を実施している。圧縮強度試験では、圧縮強度と圧縮靱性係数を測定した。圧縮靱性係数は、コンクリート標準示方書〔規準編〕⁴⁾に準拠して、圧縮ひずみが 7,500 μ になるまでの応力－ひずみ曲線から算出した。また、割裂引張試験により引張強度を測定するとともに、一軸引張試験によりひび割れ発生後の残存引張強度も測定している。残存引張強度は、文献¹⁾と同様の方法で 1 配合につき 4 ケースの一軸引張試験を実施し、ひび割れ発生後に保持されている引張応力の平均値として算出した。

RC 柱の水平交番載荷実験は、油圧ジャッキを用いて所定の軸力を作用させながら、電動スクリージャッキにより水平荷重を作用させる形で実施した。前述の 図－１ に示しているよう

に、RC 柱の頂部とスクリージャッキおよびガイドレールに取り付けられた 2 本の油圧ジャッキをピン結合しているため、RC 柱には常に水平力と軸力が作用する状態になっている。なお、軸力は 1 MPa (62.5 kN) とし、油圧ジャッキに取り付けたロードセルにより管理した。

本実験では、軸方向鉄筋が降伏に至る変位を降伏変位 δ_y として、変位振幅を δ_y の整数倍である $1 \delta_y, 2 \delta_y, \dots$ と漸増させて正負方向に繰り返し載荷を行った。各変位振幅における繰り返しサイクル数は 3 回とした。載荷は、各変位振幅における 1 サイクル目の荷重が主鉄筋降伏荷重 P_y を下回るまで実施している。

測定項目は、水平荷重と載荷点変位および主鉄筋ひずみである。また、各変位振幅における RC 柱基部近傍のひび割れ進展状況を逐次的にデジタルカメラで撮影している。

3. 実験結果

3.1 コンクリートの圧縮および引張特性

図－２には、各コンクリートの円柱供試体による圧縮強度試験結果を示している。図より、圧縮強度は、短繊維混入率 V_f によらず、いずれの配合においても 50 MPa 程度になっていることが分かる。一方、最大圧縮応力到達後の性状を見ると、短繊維無混入の場合には圧縮応力

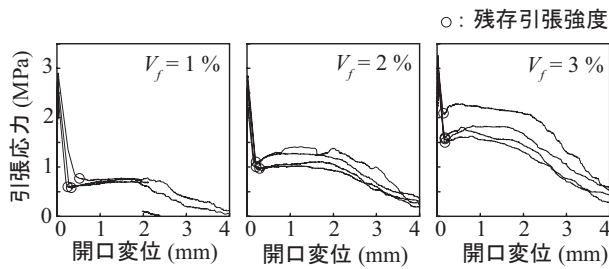


図-3 一軸引張試験結果

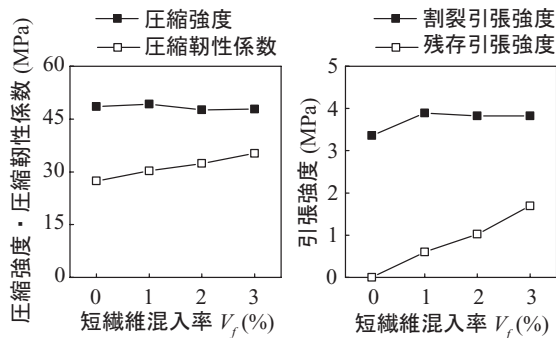


図-4 圧縮および引張強度特性に及ぼす短繊維混入率 V_f の影響

が急激に低下しているのに対し、短繊維を混入する場合には短繊維混入率 V_f の増加に伴って、応力が緩やかに減少する傾向を示している。

図-3 には、短繊維混入コンクリートの一軸引張試験結果を示している。図より、いずれの配合においても、ひび割れ発生後には引張応力が急激に低下するものの、零レベルまでは低下せずに再度緩やかに増加し、開口変位が 2 mm 程度に到達後、徐々に減少する性状を示している。これは、ひび割れ発生後、PVA 短繊維の架橋効果によりひび割れの開口が抑制され、その後開口変位の増大に伴って徐々にその効果が消失していることを示している。なお、本研究では、ひび割れ発生直後の応力（図中の○印）を残存引張強度 f_v と定義し評価している。

図-4 には、圧縮および引張強度試験による各試験結果と短繊維混入率 V_f との関係を示している。図より、圧縮および割裂引張強度は、短繊維混入率 V_f によらずほぼ同様の値を示しているのに対し、圧縮靱性係数や残存引張強度は V_f の増加に伴って大きくなっていることが分かる。特に、残存引張強度には、短繊維の架橋効

果の影響が顕著に現れていることが分かる。

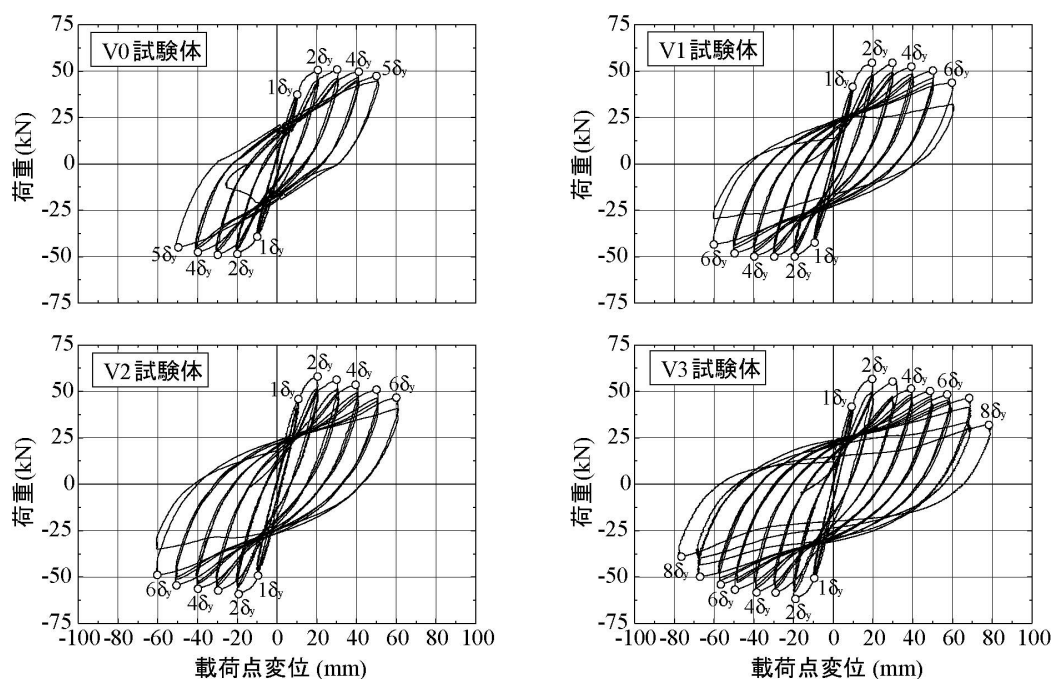
3.2 RC 柱の荷重－変位関係

図-5 には、各 RC 柱の荷重－変位履歴曲線を示している。図より、V0 試験体の場合には、変位振幅 $4\delta_y$ までは各変位振幅における最大荷重の低下は見られず安定した耐荷性状を示していることが分かる。その後、 $5\delta_y$ の 1 サイクル目において荷重が若干低下し、2 サイクル目の負荷荷時に荷重が急激に低下して終局に至っている。実験時には、基部近傍における斜めひび割れが軸方向鉄筋に沿う割裂ひび割れに連結し大きく開口する形で終局に至った。

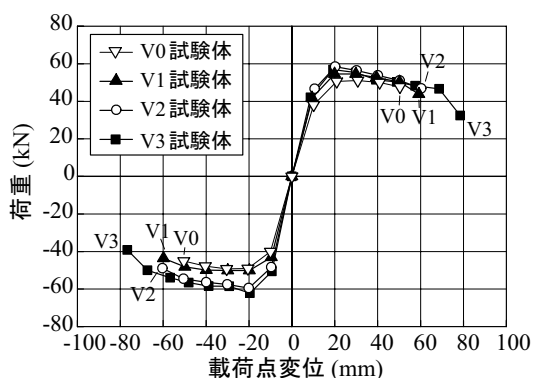
V1 試験体の場合には、変位振幅 $2\delta_y$ における最大荷重が V0 試験体のそれよりも大きいことが分かる。また、 $2\delta_y$ 以降の载荷では、各変位振幅における最大荷重が徐々に低下している。これは、変位振幅 $2\delta_y$ において、短繊維の架橋効果により耐力が増大するものの、その後基部コンクリートの圧壊とひび割れの開口に伴う短繊維の破断および抜け出しが生じ耐力が徐々に低下したことによるものと考えられる。ただし、荷重が急激に低下するのは、変位振幅 $6\delta_y$ の 2 サイクル目であり、V0 試験体の場合よりも最大変位振幅が増加している。これは、短繊維の混入によって斜めひび割れや割裂ひび割れが抑制され、軸方向鉄筋の座屈が顕在化する破壊形式に移行したことによるものと考えられる。

V2 試験体の場合は、V1 試験体の場合よりも変位振幅 $2\delta_y$ における最大荷重が大きく示されているものの、最大変位振幅はほぼ同等である。また、V3 試験体の場合には、変位振幅 $2\delta_y$ における最大荷重と最大変位振幅が最も大きい。これは、短繊維混入率 V_f の増加に伴って基部の曲げ耐力が大きくなるとともに、軸方向鉄筋の座屈が抑制されて変形性能が向上したことによるものと考えられる。

図-6 には、各試験体の荷重－変位履歴曲線に関する包絡線を比較して示している。図より、短繊維混入率 V_f によらず降伏変位はほぼ同等であるものの、降伏荷重および最大荷重は短繊維



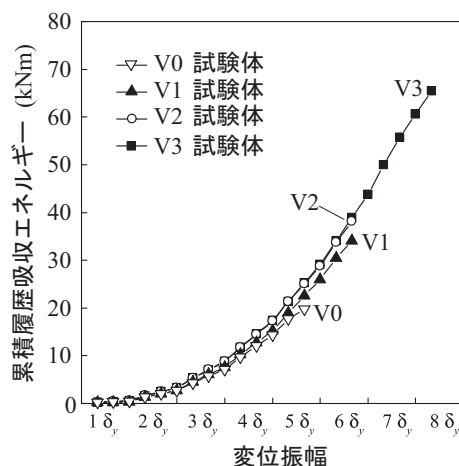
図－5 各試験体の荷重－変位履歴曲線



図－6 荷重－変位履歴曲線に関する包絡線

繊維混入率 V_f の増加に伴って大きくなっていることが分かる。また、最大変位振幅も PVA 短繊維の混入によって増大しており、V0 試験体に比べて V1/2 試験体および V3 試験体の場合で、それぞれ 1.2 および 1.6 倍程度向上している。

図－7 には、各試験体の累積履歴吸収エネルギーを比較して示している。累積履歴吸収エネルギーは、各サイクル毎にヒステリシスループ内の面積を算出し、累積することによって求めている。図より、変位振幅が $4\delta_y$ までは、いずれの試験体の履歴吸収エネルギーも同様の増加傾向を示していることが分かる。しかしながら、それ以降の変位振幅に関しては、短繊維混入率 V_f が大きい場合ほど RC 柱が終局に至る変位振幅が大きいため、累積履歴吸収エネルギーが増

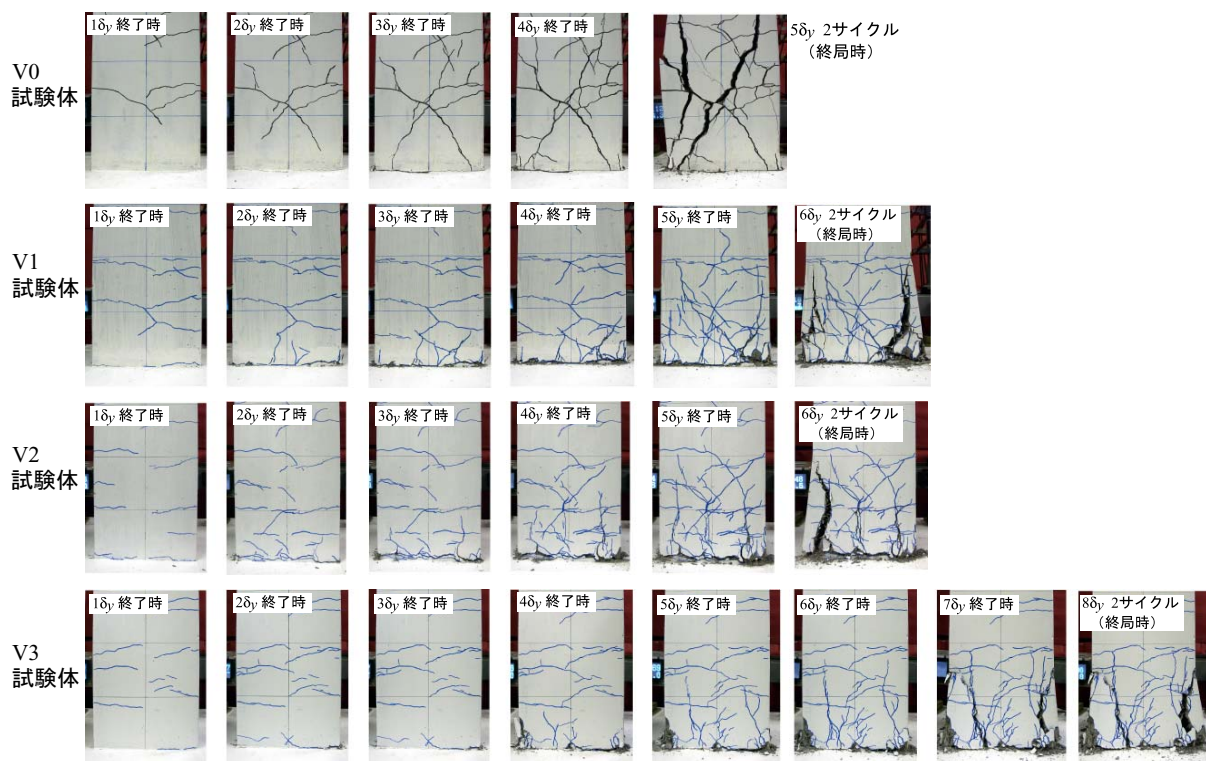


図－7 累積履歴吸収エネルギー

大しており、短繊維を混入した V1/2 試験体および V3 試験体の場合には V0 試験体に比較して、それぞれ 2 および 3.5 倍程度大きくなっている。

3.3 ひび割れおよび破壊性状

写真－1 には、各変位振幅終了後における基部近傍のひび割れ性状を示している。変位振幅 $1\delta_y$ 終了時の結果より、V0 試験体の場合には $1D$ (D : 断面高さ) 程度の位置に水平方向に生じた曲げひび割れが斜め方向に進展する曲げせん断ひび割れが発生していることが分かる。これに対し、短繊維を混入した場合には、曲げせん断ひび割れは見られず、V0 試験体の場合より



写真－1 各変位振幅終了後における基部近傍の破壊性状

も密な間隔で曲げ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発生したことによるものと考えられる。

変位振幅 $2\delta_y$ 以降では、V0 試験体の場合には、変位振幅の増加に伴って斜めひび割れが基部まで到達するとともにひび割れ幅も増加している。最終的には、斜めひび割れが軸方向鉄筋に沿った割裂ひび割れに連結し、大きく開口して終局に至っている。

V1 試験体の場合には、変位振幅の増加に伴って微細なひび割れが多数発生している。また、変位振幅 $5\delta_y$ 終了時には、斜めひび割れの発生がわずかに見られるものの、終局時においても大きな開口には至っていない。最終的には、軸方向鉄筋の座屈に伴いかぶり部コンクリートが剥離して終局に至っている。なお、このような傾向は V2 試験体の場合においても同様である。

一方、V3 試験体の場合には、V1/2 試験体の場合よりも、全体的にひび割れ本数が少なく、斜めひび割れの発生も見られない。また、変位振幅 $5\delta_y$ 以降において、損傷が基部近傍に集中する傾向にあることが分かる。

3.4 短繊維混入による靱性能向上効果の検討

前節までの検討では、1) 短繊維の混入はコンクリートの圧縮靱性能よりも残存引張強度の増加に大きな影響を与える、2) 短繊維の混入により RC 柱基部近傍の斜めおよび割裂ひび割れが抑制されて靱性能が改善される、ことなどが明らかになった。従って、本節では、短繊維混入コンクリートの残存引張強度からせん断耐力の短繊維分担分を試算し、短繊維混入による RC 柱の靱性能向上効果の要因に関する検討を行う。

表－2 には、各試験体の残存引張強度、最大荷重、計算曲げ耐力、計算せん断耐力およびせん断余裕度の一覧を示している。なお、計算曲げ耐力 P_{uc} および計算せん断耐力のコンクリート分担分 V_c は、コンクリート標準示方書⁵⁾に準拠して算出したものである。また、計算せん断耐力の短繊維分担分 V_F は、著者らの既往の研究¹⁾で提案した式を準用して算出した。

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

ここに、 b ：柱断面の幅、 $z = d/1.15$ 、 d ：有効高さ、 f_v ：短繊維混入コンクリートの残存引張

表－２ 実験および計算結果の一覧

試験体名	短繊維混入率 V_f (%)	残存引張強度 f_v (MPa)	実測最大荷重 (kN)	計算せん断耐力 (kN)			計算曲げ耐力 P_{ue} (kN)	せん断余裕度
				コンクリート分担分 V_c	短繊維分担分 V_F	合計 V_{uc}		
V0	0	-	51.1	55.9	-	55.9	49.7	1.12
V1	1	0.60	54.6	56.1	27.4	83.5	49.8	1.68
V2	2	1.02	59.5	55.1	46.6	101.7	49.4	2.06
V3	3	1.69	62.2	55.8	77.2	133.0	49.7	2.68

強度，である。また， θ は 45 度と仮定して V_F を算出した。

表より，V0 試験体の場合には，計算せん断耐力 V_{uc} が 55.9 kN であり，計算曲げ耐力 P_{uc} を 1 割ほど上回る程度である。そのため，軸方向鉄筋は降伏に至るものの，その後の交番载荷により斜めひび割れや割裂ひび割れが発生・進展したものと考えられる。これに対し，短繊維を混入する場合には，短繊維混入率 V_f の増加とともに計算せん断耐力 V_{uc} が増大し，計算曲げ耐力 P_{uc} を大きく上回っている。このため，V1/2/3 試験体の場合には，大変形時においても斜めひび割れや割裂ひび割れが顕在化しないものと考えられる。このことは，既往の文献⁶⁾にも示されているように，せん断余裕度の増加に伴って靱性能が向上することに対応している。

今後は，実構造に対応して帯鉄筋を配置する場合の実験を行うとともに，短繊維混入コンクリートの圧縮靱性能も考慮した RC 柱の靱性能評価に関する検討を行う必要がある。

4. まとめ

本研究では，PVA 短繊維の混入による RC 柱の靱性能向上効果を検討することを目的に，短繊維混入率 V_f を 0～3 % に変化させた RC 柱の水平交番载荷実験を実施した。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) 短繊維の混入により RC 柱基部の斜めひび割れや割裂ひび割れが抑制され，最大変位振幅が $V_f = 1, 2$ % の場合で 1.2 倍，3 % の場合で 1.6 倍向上する。
- 2) 累積履歴吸収エネルギーは，短繊維無混入

の場合に比較して， $V_f = 1, 2$ % の場合で 2 倍，3 % の場合で 3.5 倍程度向上する。

- 3) 短繊維混入による最大変位振幅や履歴吸収エネルギー等の靱性能向上効果は，RC 柱基部のせん断耐力の増加に密接に関連している。

参考文献

- 1) 田口史雄，岸 徳光，三上 浩，栗橋祐介：PVA 短繊維の架橋効果による RC 梁のせん断耐力向上効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.283-288，2005.
- 2) 芳賀祥晃，幸左賢二，内野裕士：鋼繊維混入量が RC 橋脚の変形性能向上に及ぼす影響，第 9 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.391-398，2006.
- 3) Victor C. Li: Reflections on the Research and Development of Engineered Cementitious Composites (ECC), *Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation-*, pp.1-21, 2002.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準および関連規準，pp.254-256，2005.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，pp.67-72，2002.
- 6) 中山弥須夫，石橋忠良，鎌田則夫，鬼柳雄一：帯鉄筋を密に配置した RC 柱の変形性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.783-788，1997.