

低プレストレスを導入した鋼繊維補強コンクリート柱の動的挙動に関する実験的研究

平澤 征夫, 岡本 恒和*, 熊澤 孝彦**

Experimental Study on Dynamic Behavior of Fiber Reinforced Concrete Columns with Low-Stress Level Prestressing

Ikuo Hirasawa , Ttsunekazu Okamoto * and Takahiko Kumazawa **

Abstract: The objective of this experimental study is to investigate the mechanical performance of high-performance steel fiber-reinforced R/C columns with low-level prestressing . To this purpose, a series of dynamic tests was carried out on a shaking table, under combined vertical/horizontal loads. As should be expected, the columns reinforced with hooked steel fibers ($v_f=1.0\%$) exhibited a better cyclic behavior compared to the columns whose reinforcement was limited to ordinary bars, since the tests showed sizable improvements in terms of ductility and bearing capacity, with a significant reduction of the residual displacements after the tests. The tests indicated also that adding low-level prestressing may justify a reduction of the transverse reinforcement, whose role (for the two values of the pre-stressing level in this project, 1MPa and 2MPa for the compressive stress of concrete) turned out to be rather limited.

Keywords : *Dynamic behavior, Fiber reinforced concrete, Prestressed concrete column.*

1. はじめに

我が国は地震多発国のため、地震によって多くの構造物が被害を受けてきた。1995年1月17日5時46分に発生した内陸直下型地震の兵庫県南部地震は、当初の死者1,000人を超えるほどの日本巨大被害地震であり、地震の規模を表すマグニチュードは7.3に過ぎなかったが、死者6,437人、負傷者43,792人、被害建物689,776棟、被害総額は10兆円に達するほどの大惨事となった。

今後その発生が危惧されている東海・東南海地震では、さらに大きな被害が予想される。その被害を最小限に止めるためには高性能かつ高強度のコンクリートで耐震性能にも優れた構造物が必ず必要になってくる。そこで鋼繊維を用いて、高靱性化・高耐久性化された鋼繊維補強コンクリート(SFRC)とプレストレスを用いて残留変形の減少・高耐久性化されたプレストレスコンクリート(PC)がある。前者は鋼繊維によってコンクリートにひび割れが発生した後、補強繊維がひび割れ面をつなぎとめることによってひび割れ幅の増大を制御する効果を持ち、後者は圧縮のプレストレスを与えることでひび割れの発生を抑制する効果を持つ。この2つはコンクリートの最大の弱点である低い引張強度を改善し、より

* 匠技術株式会社 **工学研究科建設工学専攻

丈夫で長持ちするコンクリート構造物を作ることができる。

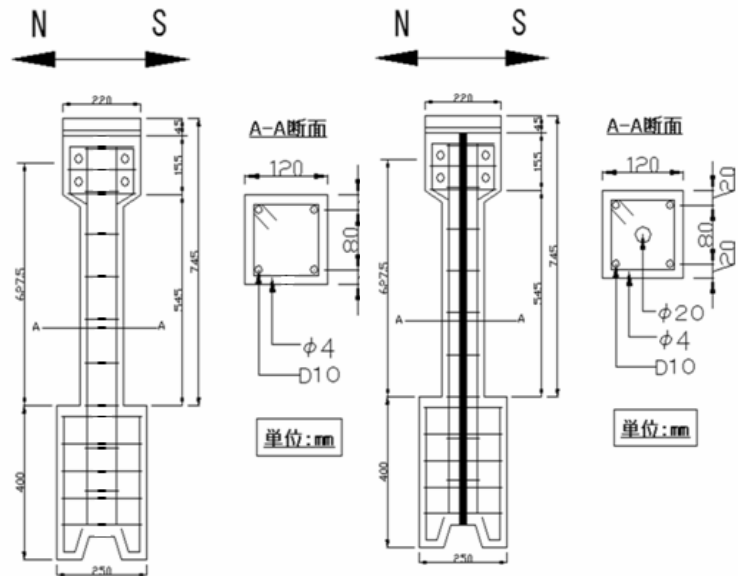
本研究は、鋼繊維とプレストレスの2つを同時に用いた、低プレストレスを導入した鋼繊維補強コンクリート柱部材を用いて従来の耐震性部材（柱部材）の性能を飛躍的に増大させ、さらに高強度コンクリートとすることで、長寿命化・高耐震性化を実現させることを目的とする。具体的には、その1例として、このような高性能部材を作成し、その力学的性状を実験的に明らかにする。また、プレストレスを導入した鋼繊維補強コンクリート柱は現在実用化されていないため、実用化に向けての研究の第1歩とする。

2. 実験概要

2.1 供試体形状および寸法

RC, SFRC 柱部材モデルの形状を図1（左）に、PC, SFPC 柱部材モデルの形状を図1（右）に示す。

供試体は柱断面 120mm×120mm、横拘束鉄筋比が 1.0%、軸方向鉄筋に D10 を 4 本、帯鉄筋に $\phi 4$ を 100.2mm ピッチの間隔で配置した。PC と SFPC は中央に PC 鋼棒（A 種 2 号 $\phi 9.2$ mm）を通すためのシースを配置した。なお、シースが入っているため柱基部にコンクリートが入りにくいので、AE 減水剤をセメント量の 2% を使用した。また、柱基部にコンクリート用のひずみゲージを N 面と S 面に 2 枚ずつ貼り付けた。



(a) RC 供試体

(b) PC 供試体

図1 供試体寸法および配筋

2.2 実験計画

供試体名称および要因を表1に示す。

表1 供試体名称と要因

供試体本数は RC, SFRC, PC を 2 体ずつ、SFPC を 4 体の合計 10 体とする。供試体名称の最初のアルファベットは RC は鉄筋コンクリート (Reinforced Concrete), SFRC は鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete), PC はプレストレスコンクリート (Pre-stressed Concrete), SFPC はプレストレス導入鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Pre-stressed Concrete) を表す。

供試体名称	鋼繊維混入量 (%)	プレストレス導入量 (MPa)
RC-1	0.0	0.0
RC-2	0.0	0.0
SFRC-1	1.0	0.0
SFRC-2	1.0	0.0
PC-1	0.0	2.0
PC-2	0.0	1.0
SFPC-1	1.0	2.0
SFPC-2	1.0	1.0
SFPC-3	1.0	2.0
SFPC-4	1.0	1.0

2.3 試験方法

実験は動的水平・鉛直二軸同時載荷試験とし、加振方法は兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で観測された地震波形の最大地震加速度を 2/10, 4/10, …20/10 倍した地震加速度を加振倍率として段階的に加振試験を行った。図2に振動台への入力加速度波形（水平 N-S, 鉛直 U-D 方向）、図3に振動台と供試体および計測器具の設置状況を示す。

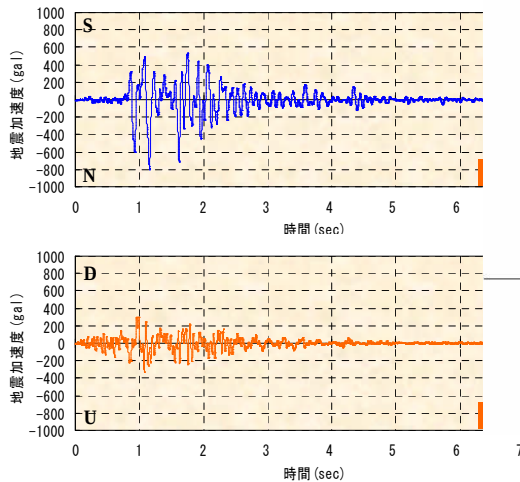


図2 兵庫県南部地震 N-S, U-D 方向の加速度

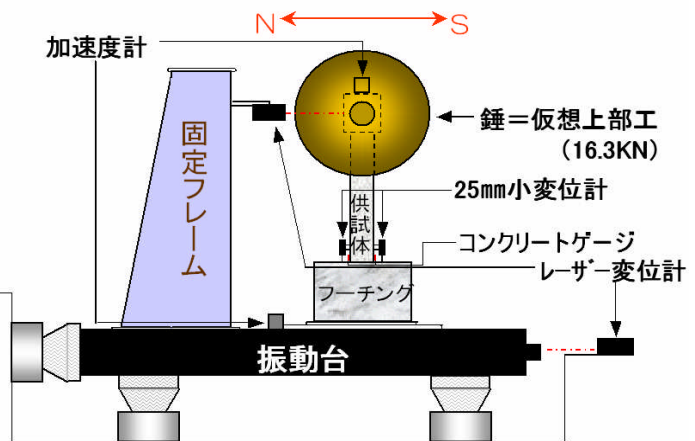


図3 動的載荷試験供試体設置状況

3. 実験結果

3.1. 平均応答荷重～平均応答変位包絡線

図4より, 4種類の供試体(RC, SFRC, PC, SFPC)の試験結果(それぞれ2体の平均)を比較するとSFPC, PC, SFRC, RCの順に平均応答荷重が大きくなり, 終局時の平均応答変位も増大していることが分かる. SFPCの供試体が, 最も平均応答荷重の最大値が大きく, 終局時の平均応答変位も増大している.

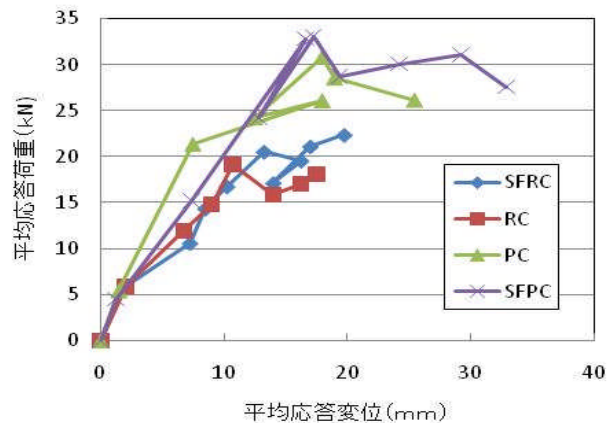


図4 平均応答荷重～平均応答変位包絡線

3.2 柱頂部の残留変位～加振倍率曲線

図5より4種類の供試体(RC, SFRC, PC, SFPC)を比較するとSFPCがもっとも残留変位が抑えられていることがわかる. またSFPCでは柱頂部の残留変位が加振倍率0.8以降からずっとマイナス方向(S側)に進んでいることから他の3種類と違い, 逆方向に柱が傾いていることがわかる. このようなことから, 本実験で用いたプレストレスと鋼繊維の両方を導入することによって

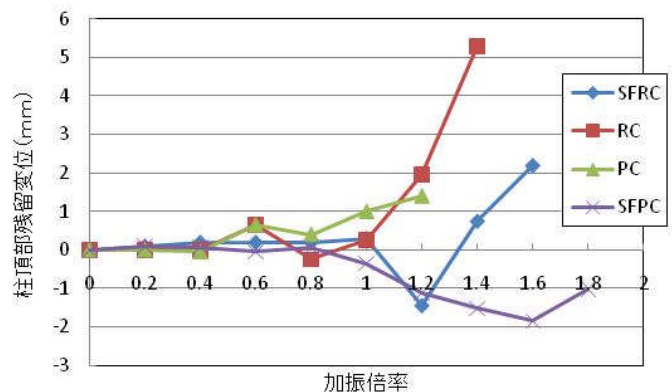


図5 柱頂部の残留変位～加振倍率曲線

得られる柱のこのような影響の違いが現れることが確認された。今後、変形挙動に対する解析的研究が必要である。

3.2. 柱基部中心の残留伸び量～加振倍率曲線

図 6 より、4 種類の供試体 (RC, SFRC, PC, SFPC) で柱基部中心の残留伸び量の変化を比較すると最終的には SFPC が柱基部中心の残留伸び量が少な

くなることがわかる。加振倍率が 1.0% 以降から PC と SFPC の残留伸び量が RC より少なくなるため、プレストレスの効果が大きく寄与したものと考えられる。

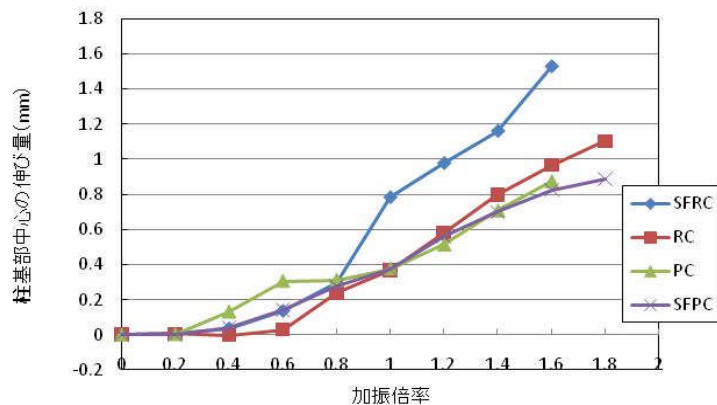


図 6 柱基部中心の残留伸び量～加振倍率曲線

4. まとめ

(1) 平均応答荷重～平均応答変位包絡線より

4 種類の供試体 (RC, SFRC, PC, SFPC) を比較した結果、SFPC, PC, SFRC, RC の順に平均応答荷重が大きく、平均応答変位も増大している。また、SFPC に関しては平均応答荷重の最大値が最も大きく、その時の平均応答変位も増大している。SFPC 柱は鋼繊維を用いることとプレストレスを導入することで、ひび割れの発生を遅らせ、同時にひび割れ幅の増大を抑えることができ、その結果、柱の耐力と終局時の応答変位を増大させる効果を有すると考えられる。

(2) 柱頂部の残留変位～加振倍率曲線より

全供試体の中で SFPC 供試体は他の供試体と違い加振倍率が 0.8 倍時までは残留変位がほとんど現れず、残留変位も少なかった。RC, SFRC, PC の 3 種類は加振倍率が 0.6 倍時以降から残留変位が大きく現れることから SFPC 供試体は柱頂部の残留変位を少なくする効果があることが実験より確認できた。プレストレスを導入することで残留変位を減少させることができるが、そのプレストレスの導入量に関しては 1MPa と 2MPa の違いが残留変位に及ぼす影響は、本実験では、さほど明確とはならなかった。

(3) 柱基部中心の残留伸び量～加振倍率曲線より

全供試体ともに加振倍率が 1.2 倍時以内に柱基部中心の残留伸び量が 1mm を超えるものはなかった。コンクリート強度を 60N/mm^2 (高強度コンクリート) にしたことで、柱基部中心の残留伸び量は少なくなったと考えられる。

(4) 柱基部ひび割れ損傷状況より

本実験で得られた、RC, SFRC, PC, SFPC の 4 種類の供試体試験結果の比較より、PC 供試体はひび割れを防ぐ点では優れているが、一度柱にひび割れが発生し進展すると、RC や SFRC 供試体よりも、ひび割れが柱基部とくにその隅角部で大きく剥離破壊する傾向がみられ損傷が大きくなり、修復性が期待できないことが明らかとなった。しかし、PC 供試体に鋼繊維を導入した SFPC 供試体では PC 供試体よりも柱基部の損傷範囲が小さくなるため、その修復性は良好であることが分かる。

(5) 実験結果の総まとめ

4 種類の供試体 (RC, SFRC, PC, SFPC) の中では、SFPC 供試体が、平均応答荷重の最大値が最も大きく、その時の平均応答変位も大きな変位に耐えられることが分かった。また、柱頂部の残留変位も小さく、柱基部中心の残留伸び量も小さく抑えられている。修復性の観点からは、プレストレスを導入した PC 供試体では、初期ひび割れの発生が遅れたものの、ひび割れ発生後の柱基部での損傷範囲が大きくなるため、修復性が良くないと判断される。一方、PC 供試体に鋼繊維を導入した SFPC 供試体では、柱基部での損傷範囲が小さくなるため修復性が期待できることが明らかとなった。

5. 今後の課題

- 1) 鋼繊維の混入量と拘束鉄筋比による SFPC 供試体への影響については、理論的な解析を含めて、今後、検討する必要がある。
- 2) 本実験では、PC 鋼棒とコンクリートとの間では付着なし（アンボンド）で行ったため、今後、付着の影響についても実験と解析で検討する必要がある。
- 3) 今後さらに高性能部材を開発することを考えれば、さらに高強度なコンクリート（ダクトアルなど超高強度コンクリート）の使用や、場合によっては、鋼管との併用を考えても良い。
- 4) 耐震・制震上の高性能化を指向するなら、柱内部の空間に粘性体などの制振材料を組み込む方法も考えられよう。

謝辞

本研究は、平成 21 年度総合工学研究所の研究費の補助にて行ったものである。本研究を行うにあたり、都市建設工学科の水野英二教授、伊藤睦准教授、18 号館材料構造実験施設管理室の宇佐美勝氏、鉄本順治氏、大学院生の伊藤雄大氏、および実験に際し供試体作成と計測に協力していただいた平澤研究室の卒業研究生諸氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 長瀧重義, 山本泰彦[編著]:「図解 コンクリート用語辞典」 2000 年
- 2) 岡田清, 伊藤和幸, 不破昭, 平澤征夫:「[新版]鉄筋コンクリート工学」 2003 年
- 3) 大成建設株式会社土木本部土木設計部編:「鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル」山海堂
- 4) 社団法人日本鉄鋼連盟編:「プレストレスコンクリート構造物の設計」 技報堂