

# 論文 高軸力を受ける RC 柱の炭素繊維シートによる耐震補強実験

宮瀬文裕\*<sup>1</sup>・西村高明\*<sup>2</sup>・小林朗\*<sup>3</sup>・塩屋俊幸\*<sup>4</sup>

**要旨：**本実験の目的は、実大試験体を用いた構造実験により、高軸力を受ける RC 柱を炭素繊維シートを用いてせん断補強した場合の効果を確認し、構造物への適用を図ることである。RC 柱を炭素繊維シートで補強した場合、補強枚数に応じて変形性能が増加すること、高軸力を受ける RC 柱では、軸方向鉄筋降伏とはほぼ同時に、または降伏以前に水平耐力が低下する現象が生じるが、炭素繊維シートで補強した場合には、水平耐力低下後も軸力を保持しうることを確認した。

**キーワード：**耐震補強、炭素繊維シート、高軸力

## 1. はじめに

炭素繊維シートは、高強度で腐食劣化に対し耐久性に富む特徴を有する材料である。また、施工的には軽量で、重機などを必要としないため、時間的・空間的な制約がある場合にも適用できる。そのため、既に設計・施工指針も発行されており耐震補強工事に使用されている [1, 2]。しかし、これらの指針および従来の実験や報告は、橋脚などを対象とした低軸力下におけるものがほとんどである。そのため、地下鉄の RC 柱のような高軸力を受ける構造物に対してこれらの指針を適用するには、従来の実験結果は十分とは言えない状況である。本稿においては、炭素繊維シートを高軸力下の RC 柱の耐震補強に適用した場合の補強効果を確認するため、実大試験体および 1/2 モデル試験体を用いた構造実験を行ったので、ここにその挙動について報告する。

表-1 試験体の種類

試験体	帯鉄筋比 $p_w$ (%)	炭素繊維補強枚数	炭素繊維による 換算帯鉄筋比*	試験体の 断面寸法 (cm)	軸力**
A 1	0.07	3 枚	0.75%	30×90	$0.33 f'_c$
A 2		8 枚	2.00%	30×90	$0.33 f'_c$
A 3		6 枚	2.22%	30×60	$0.33 f'_c$
B 1	0.08	0 枚	0%	60×60	$0.33 f'_c$
B 2		3 枚	1.29%	60×60	$0.33 f'_c$
B 3		8 枚	3.44%	60×60	$0.33 f'_c$
B 4		3 枚	1.29%	60×60	$0.28 f'_c$

\*：換算した補強鉄筋比： $p_{wy} = p_{cf} \cdot f_{cf} / f_y$

$p_{cf}$ ：炭素繊維の補強筋比（炭素繊維シートの設計厚み：0.0111cm/200g/m<sup>2</sup> 1層）

$f_{cf}$ ：炭素繊維の強度 (3430N/mm<sup>2</sup>)  $f_y$ ：鋼材の降伏強度 (A：343N/mm<sup>2</sup>, B：294N/mm<sup>2</sup>)

$p_{cf} = 100 \times (\text{炭素繊維シートの設計厚み} \times \text{枚数} \times 2) / (\text{加力面寸法} (\%))$

\*\*： $f'_c = 23.5N/mm^2$ を想定した

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の種類

試験体の種類を、表-1に示す。また、試験体の形状と寸法の概要を図-1と2に示

- \* 1 清水建設(株)土木本部技術第一部、工修（正会員）
- \* 2 (財)鉄道総合技術研究所構造物技術開発事業部主任技師（トンネル担当）、工修
- \* 3 東燃(株)トウシート事業室技術グループ課長補佐、工修（正会員）
- \* 4 清水建設(株)技術研究所構造技術研究部主任研究員、工博（正会員）

す。試験体の形状、寸法、鉄筋量および軸力は、実際の地下鉄のRC柱を参考に定めた。シリーズAは1/2モデル試験体とし、試験体の断面が30cm×90cmおよび30cm×60cmの矩形の柱で、逆対称加力形式の合計3体とした。試験体A1とA2では軸方向鉄筋比は $pt = 3.15\%$  (22-D22)であり、試験体A3では $pt = 3.44\%$  (16-D22)で、パラメータは炭素繊維シートの補強枚数および断面の形状である。シリーズBは実大モデルとし、試験体の断面が一辺60cmの正方形の柱で、片持ち梁加力形式の合計4体とした。全ての試験体で軸方向鉄筋比は $pt = 4.41\%$  (20-D32)で、パラメータは炭素繊維シートの補強枚数および軸力の大きさである。試験体のせん断スパン比も実際の地下鉄のRC柱を参考に定め、全試験体で $a/d = 3.0$  ( $d$ :有効高さ)とした。

## 2.2 使用材料

### 2.2.1 コンクリート

実際の地下鉄のRC柱に使用されたコンクリートの強度を参考に、試験体には目標圧縮強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ のレディーミックストコンクリート(早強)を使用した。実験時におけるコンクリートの性質を表-2に示す。

### 2.2.2 鉄筋

試験体に使用した鉄筋の性質を表-3に示す。

### 2.2.3 炭素繊維シート

実験には、繊維重量 $200\text{g}/\text{m}^2$ の炭素繊維シートを使用した。炭素繊維シートの性質を表-4に示す。

## 2.3 炭素繊維シートの施工方法

各試験体のコーナー部は、制作時に型枠に加工を施し、一辺約10mmの面取りを施した後、下地処理の段階でR10mmの丸みづけを行った。炭素繊維の継手長さは、20cmとした[4]。

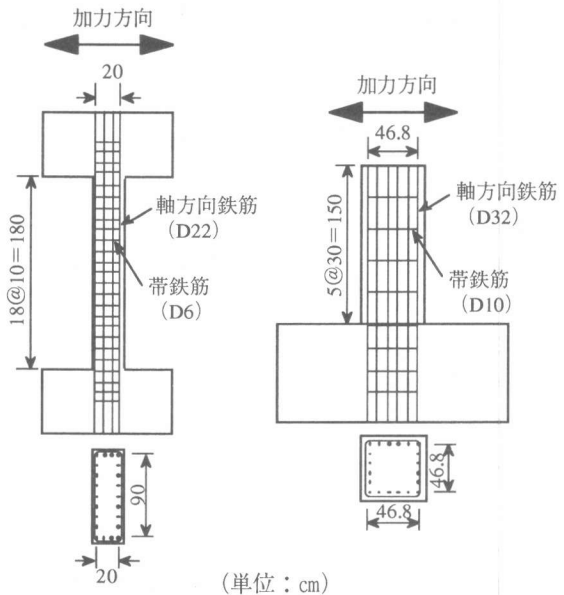


図-1 試験体概要図 (シリーズA)

図-2 試験体概要図 (シリーズB)

表-2 コンクリートの性質

シリーズ	材齢 (日)	圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	ヤング係数 $\times 10^5$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
A	11	25.6	2.7	0.265
B	12	27.5	2.3	0.256

表-3 鉄筋の種類

シリーズ	鉄筋	降伏強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	降伏ひずみ $\times 10^{-6}$	引張強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	ヤング係数 $\times 10^5$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
A	D22 軸方向鉄筋	391	1945	581	1.97
	D6 帯鉄筋	389	1946	506	2.00
B	D32 軸方向鉄筋	391	1985	598	1.97
	D10 帯鉄筋	354	1972	499	1.79

表-4 炭素繊維シートの性質

試験片	公称強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	ヤング係数 $\times 10^5$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	換算厚さ (cm)
炭素繊維シート	3430	4175	2.39	0.0111

## 2. 4 載荷方法

加力装置の概要を図-3に示す。載荷方法を以下に示す。

- (1) 載荷方法は一定軸力下の正負交番載荷とする。
- (2) 柱軸方向鉄筋のひずみが $\pm 1000 \mu$ に達するまで、荷重制御で1サイクル載荷する。
- (3) 柱軸方向鉄筋のひずみを確認しながら荷重制御で載荷し、軸方向鉄筋の降伏を確認した点を降伏変位 $\delta y$ と定める。降伏変位は正側と負側、それぞれに定める。
- (4) 変位制御で $2 \delta y$ 、 $4 \delta y$ 、 $\dots$ の交番載荷を正負3サイクルずつ繰り返す。

軸力に関しては次に示すとおりとした。試験体A1とA2では2120kN、A3では1410kN、B1~B3では2820kN、B4では2390kNである。

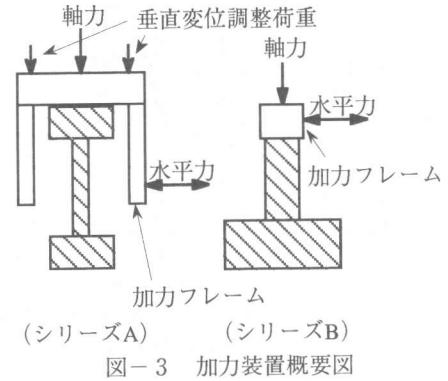


図-3 加力装置概要図

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1 破壊性状

炭素繊維シートで補強していない試験体B1はせん断破壊型であった。また、シリーズAとシリーズBのいずれの試験体も、炭素繊維シートで補強した試験体の炭素繊維シートは破断しなかった。

### 3. 2 変位性状

各試験体の水平荷重と加力位置の水平変位の関係を図-4~10に、また軸方向鉄筋の降伏荷重と最大荷重および最大荷重時の部材角(部材頂部水平変位/部材長さ)を表-5に示す[4]。

試験体A1とA2を比較すると、最終荷重時の水平変位が増加しており、炭素繊維シートによる変形性能の改善効果が認められた。また、A3については、荷重と変位の関係は試験体A1とA2に比べて改善されている。これは、炭素繊維による換算補筋比が他の2体より大きく、せん断補強効果が大きいことと、断面縦横比が1に近く炭素繊維シートによる拘束効果が大きいためと考えられる。また、表-5から試験体A1とA2およびA3の負側加力では軸方向鉄筋の降伏前に、A3の正側加力では軸方向鉄筋の降伏直後に、水平耐力が低下したことがわかる。これは、軸力が $0.33 f_c$ と大きいと、形状効果のため付着割裂破壊が生じ、水平耐力が低下したためと考えられる。しかし、いずれの試験体も水平耐力低下後も軸力を保持していた。なお、試験終了後に炭素繊維シートをはがして柱部材の破壊性状を確認したところ、柱全高にわたって軸方向鉄筋に沿って斜めひび割れが連続する付着割裂的な破壊性状が見られた。このことから、炭素繊維シートによる拘束効果によりかぶりコンクリートの剥落と、軸方向鉄筋の座屈が防止されて、水平耐力低下後の軸力保持能力が確保されたと考えられる。

試験体B1と試験体B2とB3を比較すると、荷重と変位の関係はB1に比べて改善されている。また、最終荷重時の水平変位が増加しており、炭素繊維シートによる変形性能の改善効果が認められた。また、表-5から試験体B2およびB3の正側加力では軸方向鉄筋の降伏と同時に、B2の負側加力およびB3では軸方向鉄筋の降伏直後に水平耐力が低下したことがわかる。シリーズAとBの両方で同じ状況となったことから、軸力比が0.33程度の高軸力下では、軸方

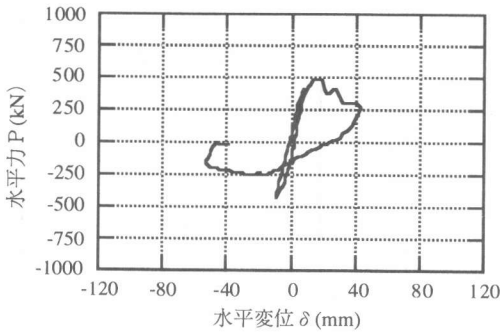


図-4 水平荷重と水平変位の関係  
(試験体A 1)

向鉄筋降伏とはほぼ同時に、または降伏以前に水平耐力が低下する現象が生じると考えられる。

軸力を変更した試験体B 2とB 4を比較すると、荷重と変位の関係および荷重についてもほぼ同じであるから、本実験の範囲内では、軸力比0.28~0.33程度の構造物ではその変位性状に大きな差は生じないと考えられる。

ここで、シリーズAとBの変形性能の改善効果について比較すると、試験体A 1とA 2および試験体B 2とB 3は、表-1に示す炭素繊維

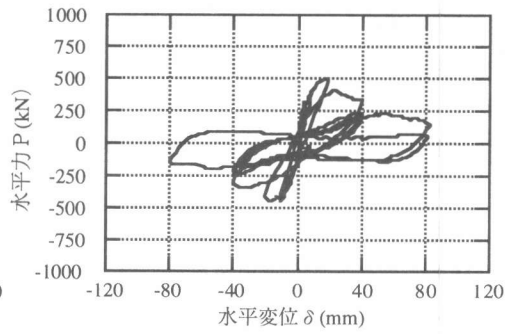


図-5 水平荷重と水平変位の関係  
(試験体A 2)

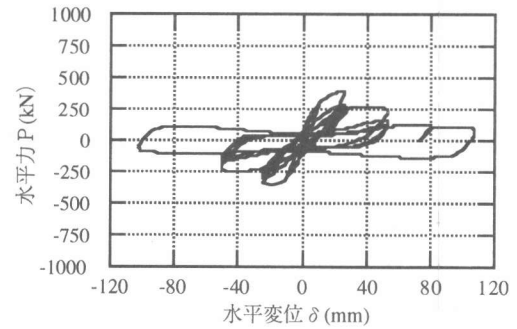


図-6 水平荷重と水平変位の関係  
(試験体A 3)

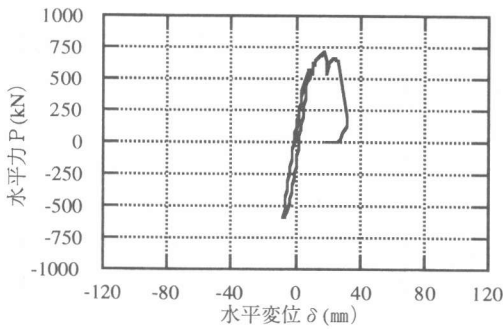


図-7 水平荷重と水平変位の関係  
(試験体B 1)

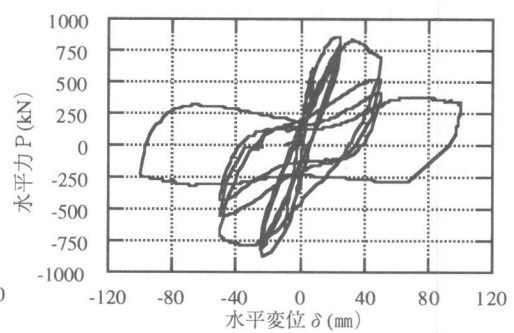


図-8 水平荷重と水平変位の関係  
(試験体B 2)

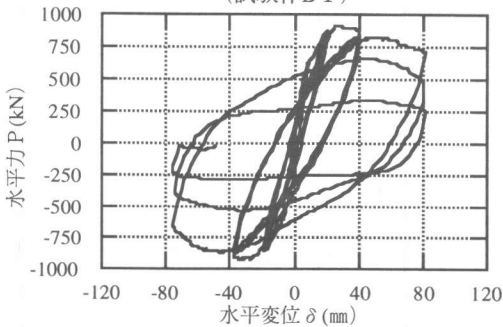


図-9 水平荷重と水平変位の関係  
(試験体B 3)

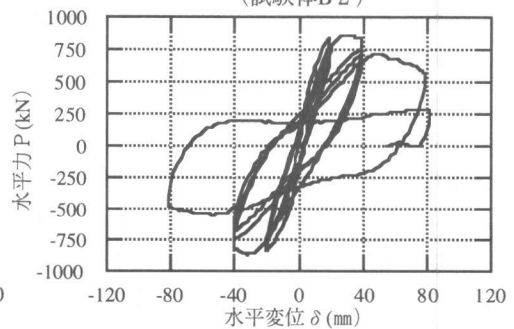


図-10 水平荷重と水平変位の関係  
(試験体B 4)

による換算帯鉄筋比がどちらも後者は前者の2.7倍と等しい。一方、表-5に示す部材角については、試験体A1に対するA3の増加は12%であるが、試験体B2に対するB3の増加は52%となっている。このことから、本実験の範囲では、炭素繊維による換算帯鉄筋比の増加に対する部材角つまり変形性能の向上は、断面縦横比が1に近い程大きいと言える。この理由は、断面縦横比が1に近い程、炭素繊維シートによる拘束効果が大きいためと考えられる。

表-5 諸荷重（軸方向鉄筋）および部材角

試験体	軸方向鉄筋降伏時				最大荷重時						
	降伏荷重 $P_y$ (kN)			変位 $\delta_y$ (mm)	最大荷重 $P_{max}$ (kN)			変位 $\delta$ (mm)	部材角 ( $\times 10^{-3}$ )		
	計算値	実験値	実/計		計算値	実験値	実/計				
A 1	454	正	-	-	-	507	正	484	0.96	16.3	0.91
		負	-	-	-		負	423	0.83	8.9	-
A 2	454	正	-	-	-	507	正	493	0.97	18.1	-
		負	-	-	-		負	453	0.89	18.4	1.02
A 3	322	正	389	1.21	26.8	357	正	391	1.10	24.6	1.37
		負	-	-	-		負	350	0.98	18.6	-
B 1	872	正	-	-	-	904	正	712	-	17.5	0.97
		負	-	-	-		負	593	-	7.1	-
B 2	872	正	863	0.99	24.7	904	正	863	0.95	24.7	1.29
		負	880	1.01	24.1		負	880	0.97	24.1	-
B 3	872	正	878	1.01	20.3	904	正	878	0.97	20.3	-
		負	863	0.99	18.8		負	912	1.01	37.6	2.09
B 4	872	正	837	0.96	19.6	904	正	865	0.96	27.3	-
		負	844	0.97	20.5		負	866	0.96	32.0	1.78

### 3.3 ひずみ性状

最大荷重時における帯鉄筋および炭素繊維シートのひずみの高さ方向の分布を図-11と12に示す。

シリーズAでは、図-11の帯鉄筋のひずみ分布から、最大荷重時にはいずれの試験体ともひずみが $2000\mu$ 以下であり、帯鉄筋の降伏以前に付着割裂破壊が生じ始めるものと考えられる。また、最大荷重時における炭素繊維シートの最大ひずみは試験体A1では $1500\mu$ で、A2では $1000\mu$ で、A3では $1200\mu$ 程度であった。そして、炭素繊維シートのひずみ分布から、ひずみは部材端部から $30\sim 60\text{cm}$  ( $1d\sim 2d$ )の範囲が大きく、この部分から破壊が進行したことがわかる。

シリーズBでは、図-12の帯鉄筋のひずみ分布から、最大荷重時にはいずれの試験体ともひずみが $2000\mu$ 以上に達しており、帯鉄筋は降伏していることがわかる。また、炭素繊維シートの最大ひずみは試験体B2では $4000\mu$ で、B3では $2000\mu$ で、B4では $4000\mu$ 程度であった。また、炭素繊維シートのひずみは柱基部から $60\sim 90\text{cm}$  ( $1d\sim 1.5d$ )の部分が大きく、この部分の破壊が進み、試験体が膨らんでいることがわかる。

シリーズAとBの炭素繊維シートのひずみ分布から、本実験の範囲内では、部材端より $1.5d$  (正方形断面)  $\sim 2d$  (長方形断面)の範囲で、破壊が進行したことが確認された。

#### 4. まとめ

高軸力下のRC柱の耐震補強に炭素繊維シートを使用した場合の効果について、本実験より得られた主な結果は次の通りである。

(1) RC柱を炭素繊維シートで補強した場合、補強枚数に応じて変形性能が増加し、補強効果が認められた。

(2) 高軸力下のRC柱では、軸方向鉄筋の降伏とほぼ同時、または降伏以前に水平耐力が低下する現象が生じる。しかし、炭素繊維シートで補強した場合には、水平耐力低下後も軸力を保持しうることを確認した。

(3) 本実験では、炭素繊維シートのひずみ分布から、部材端より1.5d(正方形断面)～2d(長方形断面)の範囲で、破壊が進行したことが確認された。

#### 謝辞

本研究は、「炭素繊維シートによる地下鉄コンクリート構造物の補強工法研究推進会」から(財)鉄道総合技術研究所に委託された研究業務「炭素繊維シートによる地下鉄

RC柱の耐震補強効果確認実験」に基づくものである[3]。(財)鉄道総合技術研究所ならびに炭素繊維シートによる地下鉄コンクリート構造物の補強工法研究推進会の関係各位に謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] 炭素繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領、日本道路公団、1995
- [2] 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針、(財)鉄道総合技術研究所、1996
- [3] 炭素繊維シートによる地下鉄RC柱の耐震補強効果確認実験報告書、(財)鉄道総合技術研究所、1996
- [4] 炭素繊維シートによる地下鉄RC柱の耐震補強工法設計・施工指針、(財)鉄道総合技術研究所、1997

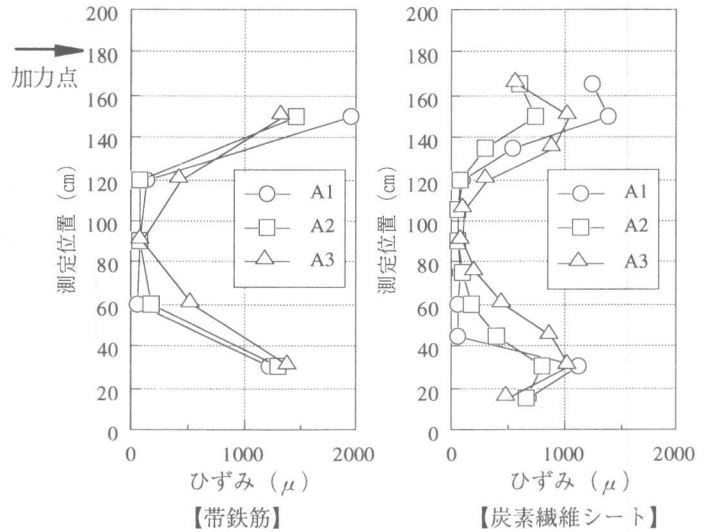


図-11 高さ方向のひずみ分布 (Aシリーズ)

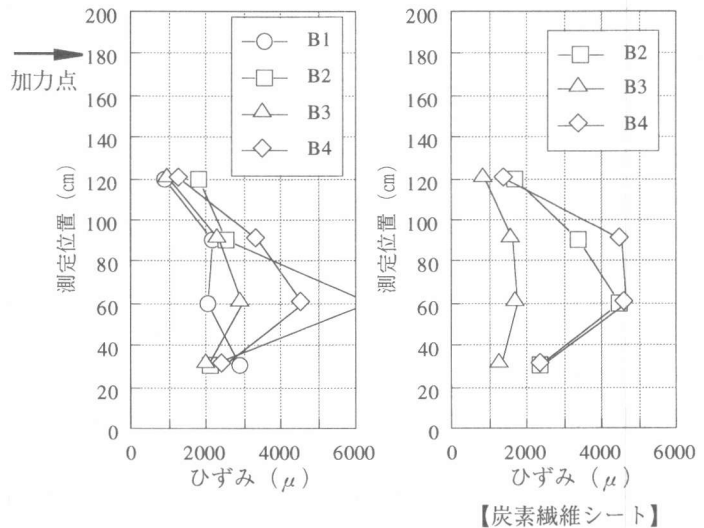


図-12 高さ方向のひずみ分布 (Bシリーズ)