

# 論文 炭素繊維シートで補強した円形コンファインドコンクリートの圧縮実験

伊藤秀樹\*1・辻 誠\*2・畑中重光\*3

**要旨:** 炭素繊維シートで補強した円形コンファインドコンクリートの圧縮破壊挙動におよぼすコンクリート強度, 補強方法, 供試体寸法, 端面摩擦の有無などの影響を実験的に検討した。その結果, コンクリート強度の増大とともに, 炭素繊維シートの横拘束効果が減少すること, 使用する炭素繊維シートの性質が拘束効果に大きく影響すること, 帯筋と炭素繊維シートの複合拘束効果は, 炭素繊維シートの設計用曲げ引張基準強度より算定される計算側圧の2/3の値と帯筋降伏時の計算側圧の重ね合わせによっておおよそ評価できることなどが明らかとなった。

**キーワード:** 炭素繊維シート, 耐震補強, 圧縮塑性, 拘束, コンファインドコンクリート

## 1. はじめに

最近, 地震をはじめとする諸要因により劣化したコンクリート構造物の補修・補強工法の技術開発が進められている。そのうち, 新素材繊維による長繊維巻付け工法, 繊維シート貼付け工法などが, 軽量および簡易施工の面から注目され, 多方面からの研究が進められている。しかし, これらの工法は, 実用化の途に着いてまだ日が浅く, 必ずしも十分な研究データが蓄積されているとは言い難い。

本研究では, 新素材繊維として炭素繊維を取り上げ, コンクリート供試体の圧縮破壊挙動におよぼす炭素繊維シート(CF)の補強効果について, 諸要因の影響を含めて実験的に調べる。その際, 通常用いられる帯筋との複合効果の定量的評価方法についても検討する。

## 2. 実験概要

実験の概要を表-1に示す。

表-1 実験の概要

Fc (MPa)	d (cm)	補強方法	供試体寸法	端面摩擦
20	0	無補強	φ10×20cm	あり
	10	帯筋a CF		
40	20	帯筋a+CF1 <sup>*1</sup>	φ15×30cm <sup>*3</sup>	なし <sup>*4</sup>
	30	帯筋b+CF2 <sup>*2</sup>		
60	40			

[注] Fc: 目標圧縮強度  
 d: CF重ね長さ (CF: 炭素繊維シート)  
 アングルラインの要因はFc=20MPaのみ  
 \*1: 帯筋a: ピッチ1.2cmのスパイラル(CF1層巻きに相当)  
 \*2: 帯筋b: ピッチ2.5cmのスパイラル(CF1層巻きの半分に相当)  
 \*1, \*2: (帯筋+CF)補強のCFの重ね長さは10cmのみ  
 \*3: φ15×30cm供試体はFc=20MPaのCF補強のみ  
 \*4: 端面摩擦なしは無補強; d=10, 40cmのみ

表-2 コンクリートの調査表

Fc (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				SP (C×%)
			セメント	水	細骨材	粗骨材	
20	75	50	255	191	901	912	0.005
40	52	47	317	165	857	975	0.80
60	39	44	411	160	773	994	0.80

(注) Fc: 目標圧縮強度, W/C: 水セメント比  
 S/a: 細骨材率, SP: 高性能AE減水剤

表-3 炭素繊維シートの特長

設計用曲げ引張基準強度 <sup>1)</sup> (MPa)	弾性係数 (GPa)	断面積 (cm <sup>2</sup> /m)	目付量 <sup>2)</sup> (g/m <sup>2</sup> )
2500	240	1.11	200

(注) 1) 引張強度は3500MPa以上  
 2) 目付量: 単位面積当りの炭素繊維シートの重量

\*1 鹿島建設(株) 工修 (正会員)  
 \*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻  
 \*3 三重大学助教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

## 2.1 使用材料

実験で使用したコンクリートの調査表を表-2に、炭素繊維シート(CF)の特性を表-3に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを、粗骨材には碎石(粒径5~20mm)、細骨材には川砂(粒径5mm未満)を使用した。帯筋には、外径97mmのスパイラル状に成形した普通丸鋼( $\phi=3\text{mm}$ 、降伏点 $\sigma_y=280\text{MPa}$ )を使用した。炭素繊維シートの接着にはエポキシ樹脂系接着剤を用いた。

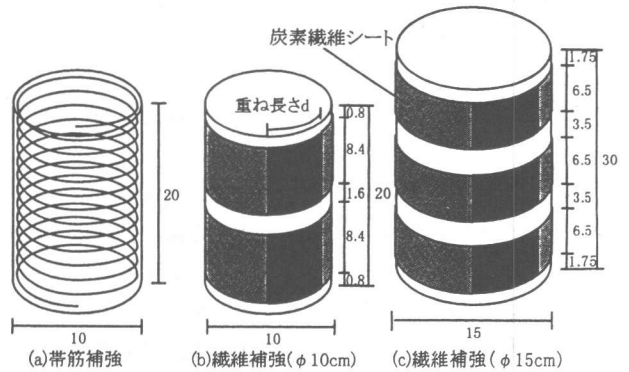


図-1 供試体の形状・寸法 (単位:cm)

## 2.2 供試体の製作

供試体の形状・寸法および補強方法を図-1に示す。供試体は、 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ および $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ の円柱体とし、実験パラメータをコンクリート強度、補強方法(炭素繊維シート、帯筋)、供試体寸法、および炭素繊維シートの重ね長さ(0, 10, 20, 30および40cm)とし、各タイプについて供試体をそれぞれ2体製作した。供試体の名称および諸元を表-4に示す。炭素繊維シートの接着は、材齢28日~31日の間に行った。シートは、表面に樹脂を塗った後に貼り付け、その上から再び樹脂を含浸させた<sup>1)</sup>。炭素繊維シートを重ねて貼り付ける場合は、1層ごとに樹脂を含浸させた。養生方法は、材齢21日まで水中養生、その後は空中養生とした。試験材齢は約40日とした。

## 2.3 載荷および測定方法

載荷には、油圧式耐圧試験機を用い、1軸圧縮実験を行った。ひずみおよび変位の測定方法を図-2に示す。供試体に直接取り付けられた1対の変位計(測定長17cmおよび26cm)で軸方向の変位を、ワイヤーストレインゲージ(長さ67mm)でコンクリートおよび炭素繊維シートの横ひずみを、ロードセルで圧縮荷重を測定した。載荷は、供試体の最大圧縮荷重付近までは荷重制御(毎分約10kN)で行い、その後は変位制御

表-4 供試体の名称および諸元

No.	供試体名	$F_c$ (MPa)	補強の種類	$\sigma_L$ (MPa)	$P_w$ (%)	d (cm)	寸法	備考
1	2CP	20	無補強	0	0		$\phi 10$ $\times 20$ cm	CF 補強
2	2C00		CF (炭素繊維 シート)	3.2	0.19	0		
3	2C10					10		
4	2C20					20		
5	2C30					30		
6	2C40		40					
7	4CP	40	無補強	0	0		$\phi 10$ $\times 20$ cm	CF 補強
8	4C10		CF	3.2	0.19	10		
9	4C40					40		
10	6CP	60	無補強	0	0		$\phi 15$ $\times 30$ cm	CF 補強
11	6C10		CF	3.2	0.19	10		
12	6C40					40		
13	2Ha	20	帯筋a (S=1.2cm)	3.2	0.19	10	帯筋 + CF 補強	
14	4Ha	40						
15	6Ha	60						
16	2HaC	20	CF1 + 帯筋a (S=1.2cm)	3.2 <sup>+</sup>	0.19 <sup>+</sup>	10	帯筋 + CF 補強	
17	4HaC	40						
18	6HaC	60						
19	2HbC	20	CF2 + 帯筋b (S=2.5cm)	1.6 <sup>+</sup>	0.10 <sup>+</sup>	10	帯筋 + CF 補強	
20	4HbC	40						
21	6HbC	60						
22	0CP	20	無補強	0	0		$\phi 15$ $\times 30$ cm	端面 摩擦 なし
23	0C10		CF	3.2	0.19	10		
24	0C40					40		
25	BCP	20	無補強	0	0	55 145	寸法 大	
26	BC1		CF	3.2	0.19			55
27	BC2							145

(注)  $F_c$ : 目標圧縮強度(MPa)、d: 重ね長さ、S: ピッチ  
 $\sigma_L$ : 計算側圧(MPa)、 $\sigma_L = P_w \cdot \sigma_y$ 、 $P_w$ : 断面積比  
 $\sigma_y$ : 降伏強度(MPa)(CFの降伏強度には、設計用曲げ引張基準強度の2/3の値を入力した)

(例No. 26)  $\sigma_L = (1.11 \cdot 6.5 \cdot 6 \cdot 2 / 100 / 450) \cdot (2500 \cdot 2 / 3) \approx 3.2$   
 (毎分約0.2mm)とし、炭素繊維補強の場合にはシートが破断するまで、他の場合には軸ひずみが2%に至るまで載荷を継続した。

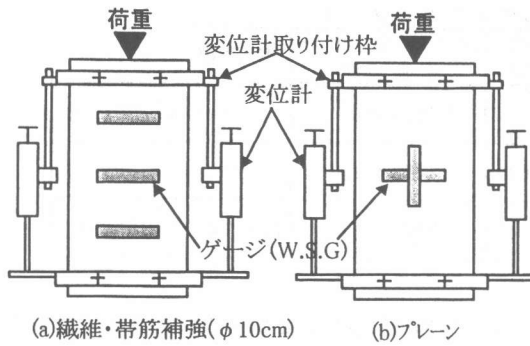


図-2 圧縮実験のひずみの測定方法

### 3. 実験結果とその考察

#### (1) 炭素繊維シートの重ね長さの影響

軸および横方向の応力-ひずみ曲線に及ぼす炭素繊維シートの重ね長さの影響を図-3に示す。図によれば、炭素繊維シート補強供試体では、重ね長さの長短にかかわらず、最大応力が炭素繊維シートの破断(図中の●印)によって決まり、急激な破壊性状を呈するため応力軟化域は得られない。また、上昇域の応力-ひずみ曲線は、重ね長さにかかわらず極めて類似している。

本実験では、重ね長さ0cmの供試体(2C00)では圧縮強度および終局軸ひずみの増加はほとんどみられなかったが、既報<sup>2)</sup>と同様に、10cm以上重ねれば圧縮強度、終局軸ひずみがともに増加し、完全に2層巻き(2C40)になるまで補強すれば、さらに著しい補強効果が得られた。しか

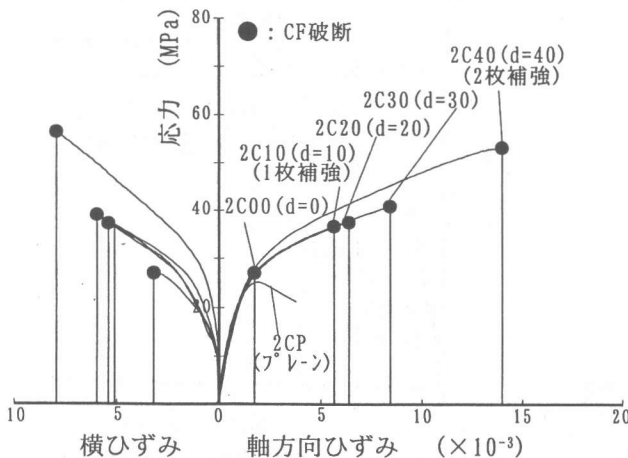


図-3 炭素繊維シートの重ね長さの影響 ( $F_c=20\text{MPa}$ )

し、1層巻きの範囲では、10cm以上重ねても、重ね長さの割増しによる圧縮靱性の向上はあまり期待できないことがわかる。これは、上述した炭素繊維シートの破断がシートの重ね部以外の箇所、すなわち1枚補強の箇所で生じることが主な原因と考えられる。

また、図-3左部分には、軸応力-横ひずみ曲線が示されている。図によれば、炭素繊維破断時の横ひずみの値は、別の材料試験で得られている炭素繊維の引張破断時のひずみ ( $15 \times 10^{-3}$ ) に比べてかなり小さい。これは、後掲の3.(4)で記した理由、またはワイヤーストレインゲージとの間に介在するエポキシ樹脂に生じたずれ変形のためではないかと思われる。他の供試体でも同様な結果が得られているが、本論文では横ひずみに関する考察は差し控え、今後の検討課題としたい。

#### (2) 炭素繊維シートの補強効果に及ぼすコンクリート強度の影響

炭素繊維シートの補強効果に及ぼすコンクリート強度の影響を図-4に示す。図によれば、コンクリート強度にかかわらず、炭素繊維シート補強供試体では、無補強供試体に比べて圧縮強度および終局軸ひずみの大幅な増加がみられることがわかる。圧縮強度は、無補強供試体に比べ、1枚補強では20MPaのコンクリートで1.5倍、40MPaで1.2倍、60MPaで1.1倍、2枚補強では20MPaで2.1倍、40MPaで1.6倍、60MPaで1.4倍と、コンクリート強度が増すにつれて炭素繊維シートの補強効果が相対的に減少している。

#### (3) 既往の実験結果との比較

本実験結果と文献<sup>3)</sup>および<sup>4)</sup>で報告されている結果との比較を図-5に示す。また、各実験におけるパラメータの値を表-5に示す。図-5によれば、炭素繊維シート補強による応力-ひずみ曲線の変化の様子はいずれの実験においても類似しているといえる。しかし、圧縮強度および終局

表-5 既往の研究における各パラメータ

	供試体寸法	7°レ-ンコンクリート 圧縮強度	1枚補強 圧縮強度	炭素繊維シート 引張強度	断面積	目付量
文献3)	φ10×20cm 円柱体	38.8 (MPa)	61.2 (MPa)	3950 (MPa)	1.11cm <sup>2</sup> /m	200g/m <sup>2</sup>
文献4)	φ10×20cm 円柱体	39.3 (MPa)	64.2 (MPa)	2770 (MPa)	1.67cm <sup>2</sup> /m	300g/m <sup>2</sup>
本実験	φ10×20cm 円柱体	40.4 (MPa)	48.6 (MPa)	2500 (MPa)	1.11cm <sup>2</sup> /m	200g/m <sup>2</sup>

軸ひずみの値には、実験間でかなりの差がみられるものもある。これは、表-5に示すように、使用した炭素繊維シートの性質に違いがあるためと考えられる。すなわち、本実験と比べ、文献3)ではシートの断面積および目付量は同じであるが、引張強度に大きな差があり、文献4)では引張強度はほとんど変わらないがシートの断面積および目付量に大きな差がある。このことから、拘束圧が上昇し続ける炭素繊維補強の場合、使用する炭素繊維シートの性質が供試体の終局挙動に大きく影響するものと考えられる<sup>5)</sup>。

(4)補強方法の違いによる比較

補強方法の異なるコンクリートの応力-ひずみ曲線の比較を行う。コンクリート強度20MPaのものを図-6に、40MPaのものを図-7に、60MPaの

ものを図-8に示す。これらの図によると、計算側圧 $\sigma_1$ が等しい場合、帯筋補強のみの供試体、炭素繊維シート補強のみの供試体、および帯筋+炭素繊維シート補強供試体の圧縮強度にはあまり差がみられない。

筆者らは、既報2)において炭素繊維シートの補強効果が炭素繊維の設計用曲げ引張基準強度(ばらつきを考慮した引張強度の保証値)のおおよそ2/3を用いて推定できるとの結果を得た。

また、同様の結果が文献6)にも報告されている。このように、繊維の能力が最大限に発揮されない理由として以下のことが考えられる。すなわち、シートが破断する際には、まず、一部の炭素繊維の破断が生じ、瞬時に他の繊維の破断へとつながるため、シート全体の破断は、初期の破断に大きく支配されるものと考えられる。

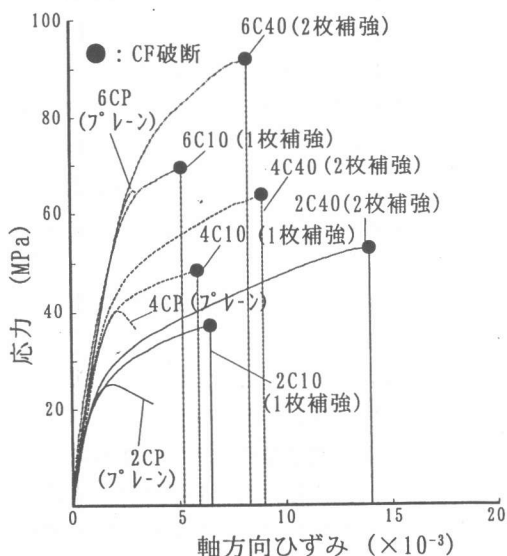


図-4 炭素繊維シートの補強効果に及ぼすコンクリート強度の影響

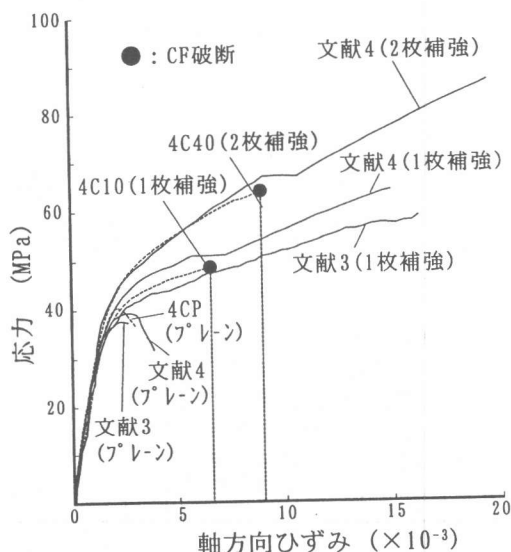


図-5 他の研究者の実験結果との比較

この現象は炭素繊維が降伏伸びを全く有しないことも一因と考えられる。

本実験では、炭素繊維シート1枚補強の計算側圧が4.8MPaとなるため、上記の結果に基づき、その有効側圧を2/3倍の3.2MPaと見なし、帯筋補強のみの供試体では計算側圧が3.2MPaになるように、また帯筋+炭素繊維シート補強供試体では帯筋の計算側圧が1.6MPa、炭素繊維シートの計算側圧が1.6MPaの3/2倍の2.4MPaになるよう設定した。すなわち、帯筋+炭素繊維シート補強供試体の実際の側圧(有効側圧)が3.2MPaとなるように設計した。この算出方法は2枚補強の供試体でも同様である(表-4参照)。

本実験結果によれば、帯筋の補強効果と炭素繊維シートの複合補強効果は、以上の方法で求めた計算側圧を足し合わせることによっておおよそ推定できると考えられる。

### (5) 炭素繊維シートの拘束効果に及ぼす供試体寸法の影響

炭素繊維シートの拘束効果に及ぼす供試体寸法の影響を図-9に示す。図によれば、計算側圧が同じ場合、供試体寸法が大きくなると最大応力は低下するが、靱性が若干増すことがわかる。これは、側圧を等しくするためには、供試体寸法が大きいほど炭素繊維シートの巻き数を多くする必要があることも一因と思われる。すなわ

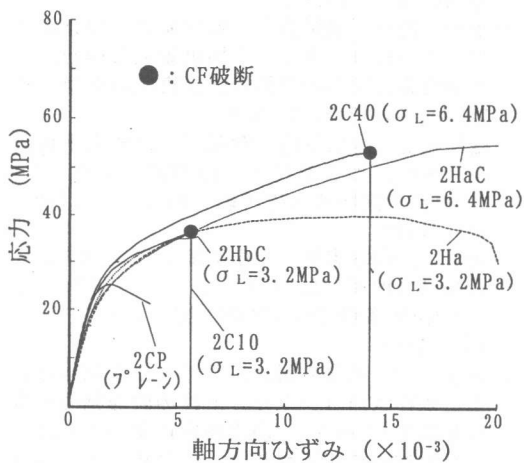


図-6 補強方法による影響 (Fc=20MPa)

ち、φ10×20cmの供試体では、側圧3.2MPaのとき1層巻き、側圧6.4MPaのとき2層巻きであるのに対し、φ15×30cmの供試体では側圧3.2MPaのとき2層巻き、側圧6.4MPaのとき4層巻きとなる。

### (6) 端面摩擦の有無による影響

供試体と載荷板間の摩擦、すなわち端面摩擦の有無による影響を図-10に示す。図によれば、

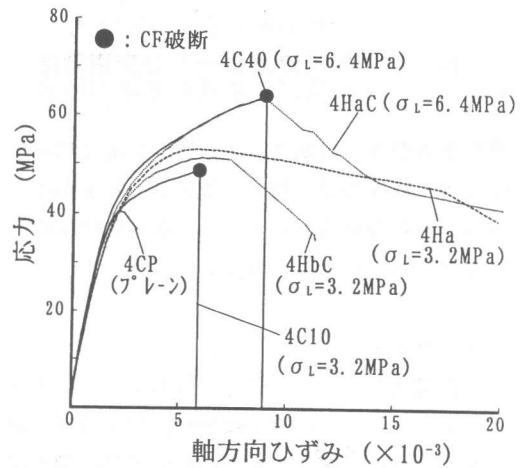


図-7 補強方法による影響 (Fc=40MPa)

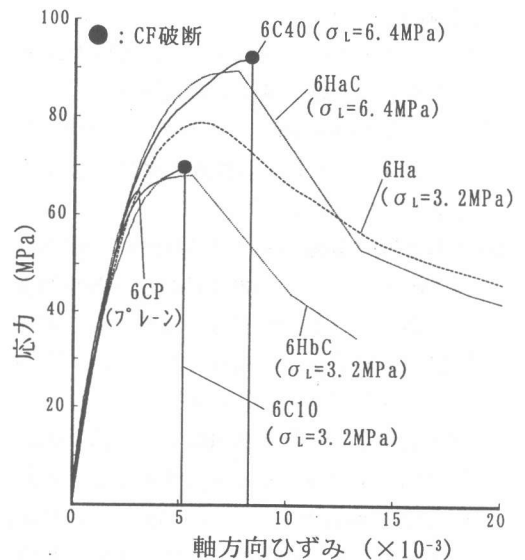


図-8 補強方法による影響 (Fc=60MPa)

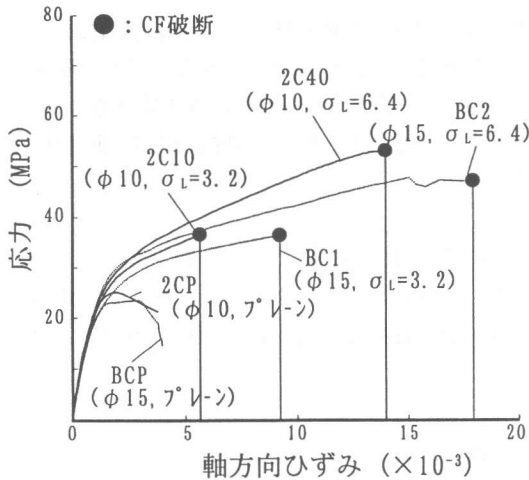


図-9 炭素繊維シートの拘束効果に及ぼす供試体寸法の影響

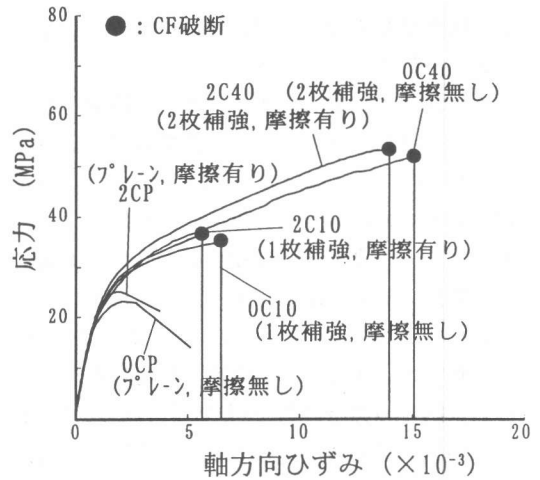


図-10 端面摩擦の有無による影響

端面摩擦がない供試体は端面摩擦がある供試体に比べて靱性が若干増し、最大応力が下がっていることが分かる。しかし、両者の間にはそれほど大きな違いはみられない。

#### 4. まとめ

炭素繊維シートで補強した円形コンファインドコンクリートの圧縮破壊挙動におよぼすコンクリート強度、補強方法、供試体寸法、端面摩擦の有無などの影響を実験的に検討した。本研究で得られた結果は、おおよそ以下のようにまとめられる。

- (1) コンクリート強度が増すと、炭素繊維シートの横補強効果が減少する(図-4)。
- (2) 使用する炭素繊維シートの性質に応じて、コンクリートに対する拘束効果はかなり異なる(表-5, 図-5)。
- (3) 帯筋と炭素繊維シートの複合拘束効果は、炭素繊維シートの設計用曲げ引張基準強度より算定される計算側圧の2/3の値と帯筋降伏時の計算側圧の重ね合わせによっておおよそ評価できる(図-6~8)。
- (4) 側圧を等しくした炭素繊維シート補強供試体では、供試体の寸法が大きくなると最大応力は下がるが靱性は若干増す。これは、大径の供試体では、側圧を等しくするために炭素繊維シートの巻き数が増えることも

一因と考えられる(図-9)。

- (5) 端面摩擦の有無による違いはあまりみれなかった(図-10)。

#### [謝辞]

本研究を実施するにあたり、山本温彦氏(三菱化学(株))、片桐榮志氏(㈱コンステック)、並びに畑中研究室の諸氏にご協力いただいた。ここに深く感謝致します。

#### [参考文献]

- 1) CFルネサンス協会：CFルネサンス工法(説明資料)
- 2) 伊藤秀樹, 畑中重光：炭素繊維シートを用いたコンクリート部材の補強に関する基礎研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp. 667-668, 1997. 9
- 3) 小牟禮健一, 栗原慎介, 松井繁之：炭素繊維による円柱コンクリート拘束効果の検討, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 948-949, 1996. 9
- 4) 藤巻敏之, 本田義博, 渡部憲, 磯雅人：繊維シート補強コンクリートの実験的研究(その1), 東急建設技術研究所報, No. 22, pp. 153-156, 1996
- 5) 大野了, 山本忠久, 小島克朗：炭素繊維を巻き付けて拘束したコンクリートの圧縮性状, 土木学会第47回年次学術講演会, pp. 736-737, 1992
- 6) 勝俣英雄, 小島克朗, 武田寿一：炭素繊維による既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強に関する研究(その3)-炭素繊維によって拘束されたコンクリートの圧縮性状-, 大林組技術研究所報, No. 38, pp. 54-58, 1989