

## 論文 炭素繊維シートによるコンクリート柱の補強効果

宮内克之<sup>\*1</sup>・井上正一<sup>\*2</sup>・黒田 保<sup>\*3</sup>・小林 朗<sup>\*4</sup>

要旨：既存の鉄筋コンクリート構造物の補強方法として炭素繊維シート貼付けによる補強方法は極めて有望である。本研究においては、炭素繊維シート貼付けによる圧縮強度の増大とじん性向上効果を、普通強度のコンクリートおよび今後利用が高まるとされる高強度コンクリートのコンクリート柱によって検討した。また、実験結果をもとに、炭素繊維シート貼付けによって補強されたコンクリートの軸応力-軸ひずみ関係を定式化した。

キーワード：炭素繊維シート、炭素繊維シートによる補強、補強効果、応力-ひずみ関係

### 1. はじめに

既存の鉄筋コンクリート構造物の補強方法として、あるいはじん性に乏しい高強度コンクリートの補強方法として炭素繊維シート貼付けによる補強方法は極めて有望である。橋脚のような柱部材を対象とした炭素繊維シート貼付けによる補強に関しては、最近積極的に実験・研究が実施されており、炭素繊維シート貼付けによって補強されたコンクリートの応力-ひずみ関係も提案されつつある<sup>1)</sup>。しかし、高強度コンクリートまでも含む研究は十分とは言えない。そこで本研究においては、炭素繊維シート貼付けによる圧縮強度の増大とじん性向上効果を、普通強度のコンクリートおよび今後利用が高まるとされる高強度コンクリートのコンクリート柱によって検討した。また、実験結果をもとに、著者らが過去に提案<sup>2)</sup>した応力-ひずみ関係を、高強度コンクリートをも含め定式化した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および実験計画

コンクリート柱への補強を想定して行った実験計画の一覧を表-1に示す。なお、供試体は

同一条件ごとに2体作製し試験に供した。

実験要因は、コンクリート強度（試験時想定材齢35日の強度： $f_{35} = 20, 30, 50, 100 \text{ N/mm}^2$ の4水準）、炭素繊維シート貼付け枚数、供試体寸法とした。炭素繊維シートをストライプ状に貼り付ける場合の、貼付け方による補強効果の差を検討するために、1/2層の場合は図-1に示す2種類の貼付け方法とした。補強に用いた炭素繊維シートの機械的性質を表-2に示す。

供試体は打設翌日に脱型した後、材齢7日まで屋外水中養生を施し、その後試験時まで恒温室（20℃、RH80%以上）で養生した。供試体の含水量が落ち着くのを待ち、材齢28日を目標に表面が十分に乾燥した状態で表面整形を施し、炭素繊維シートの繊維方向が供試体の円周方向と一致するように貼り付けた。2層貼り付ける場合には、1層目の重ね合わせ部と2層目の重ね合わせ部がそれぞれ180度ずれる位置に、3層貼り付ける場合には、1層目、2層目、3層目の重ね合わせ部が120度ずつずれる位置に貼り付けた。なお重ね合わせ部の長さは、内層（3層の場合には、1, 2層目）で4cm、外層で6cmとした。

\*1 香川職業能力開発短期大学校助教授 住居環境科 工博（正会員）

\*2 鳥取大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

\*3 鳥取大学助手 工学部土木工学科 工修（正会員）

\*4 日鉄コンポジット（株）構造技術部長（正会員）

表-1 実験計画および実験結果一覧表

供試体 記号	供試体 寸法 (cm)	目標強度 $f_{35}$ (N/mm <sup>2</sup> )	貼付け 層数	炭素繊維 補強量 $\rho_{CF}$ (%)	$f_r / f_{co}$	最大応力 $f_{cc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	最大応力 時ひずみ $\epsilon_{cc}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$f_{cc} / f_{co}$	$\epsilon_{cc} / \epsilon_{co}$
N50L	$\phi 15 \times 30$	50	—	0.000	0.0000	45.2	2188	1.000	1.000
C50L-1			1層	0.293	0.1131	59.4	9450	1.315	4.319
C50L-2			2層	0.587	0.2261	79.4	12450	1.757	5.690
N30L		30	—	0.000	0.0000	31.2	1950	1.000	1.000
C30L-1			1層	0.293	0.1639	52.4	12125	1.683	6.218
C30L-2			2層	0.587	0.3276	67.4	15538	2.164	7.968
C30L-3		3層	0.880	0.4918	81.7	20125	2.621	10.321	
N20L		20	—	0.000	0.0000	23.6	1803	1.000	1.000
C20L-1			1層	0.293	0.2161	36.5	15892	1.547	8.814
C20L-2			2層	0.587	0.4322	50.8	23835	2.153	13.220
C20L-3		3層	0.880	0.6483	64.3	—	2.725	—	
N100S		$\phi 10 \times 20$	100	—	0.000	0.0000	109.5	2870	1.000
C100S-1	1層			0.440	0.0699	117.3	3460	1.071	1.206
C100S-2	2層			0.880	0.1399	122.5	3247	1.119	1.131
						*110.8	*5512	*1.012	*1.921
N50S	50		—	0.000	0.0000	51.9	1922	1.000	1.000
C50S-1			1層	0.440	0.1476	75.2	9563	1.450	4.976
C50S-2			2層	0.880	0.2952	104.6	12750	2.016	6.634
N30S	30		—	0.000	0.0000	33.7	1898	1.000	1.000
C30S-1/3			1/3層	0.147	0.0757	36.6	7884	1.086	4.154
C30S-1/2			1/2層	0.220	0.1136	41.6	9739	1.234	5.131
C30S-1/2d			1/2層d	0.220	0.1136	42.5	9646	1.261	5.082
C30S-1			1層	0.440	0.2272	69.6	14063	2.065	7.409
C30S-2		2層	0.880	0.4543	88.0	14875	2.611	7.837	
C30S-3		3層	1.320	0.6815	109.9	19000	3.259	10.011	
N20S	20	—	0.000	0.0000	26.3	1925	1.000	1.000	
C20S-1		1層	0.440	0.2912	50.7	19913	1.928	10.344	
C20S-2		2層	0.880	0.5824	70.9	23556	2.696	12.237	
C20S-3		3層	1.320	0.8736	84.9	—	3.228	—	

\*印：低下型における終局時の値であることを表す， $f_r$ ：終局拘束応力；式(2)， $\rho_{CF}$ ：炭素繊維補強量；式(3)  
 $f_{co}$ ， $\epsilon_{co}$ ：無補強供試体の最大応力および最大応力時の軸ひずみ

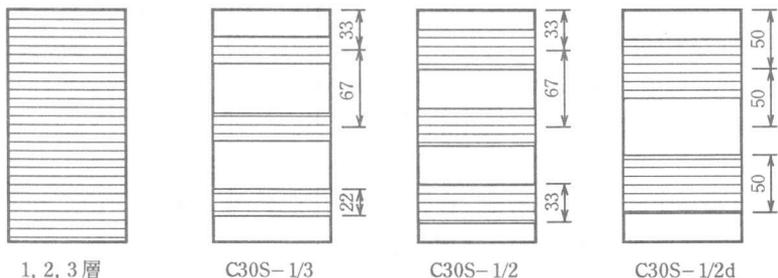


図-1 炭素繊維シートの貼付け方法 (単位：mm)

## 2.2 一軸圧縮試験

供試体の圧縮試験は、1 MN 万能試験機および2 MN 耐圧試験機を用いて行った。荷重にあたっては、荷重はロードセルを用いて測定し、原則として最大荷重に達する直前から変位制御で荷重した。また、供試体の軸方向のひずみを電気抵抗線式ひずみゲージによって測定した。

## 3. 炭素繊維シートの補強効果と補強効果の定量化

炭素繊維シートで補強した円柱供試体の一軸圧縮試験結果を表-1に示す。結果は2体の供試体の平均値で示してあるが、同一条件における2体の供試体の軸応力と軸方向ひずみの関係は、非常によく一致していたため、一部は一体の値で代表させてある。破壊状況は、供試体寸法、コンクリート強度、炭素繊維シート貼付け

枚数に関係なく、全て供試体中央部付近で炭素繊維シートが破断して破壊に至った。試験終了後の供試体の破壊状況の一例を写真-1に示す。

表-2 炭素繊維シートの機械的性質

設計厚さ (mm)	繊維目付 (g/m <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
0.110	200	3,481	230.5

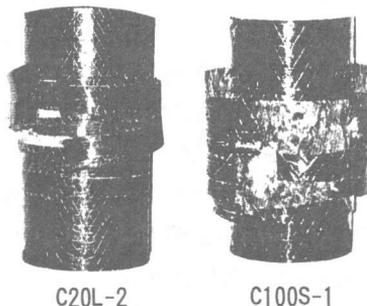
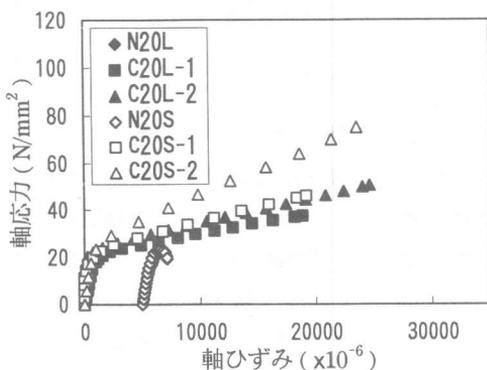
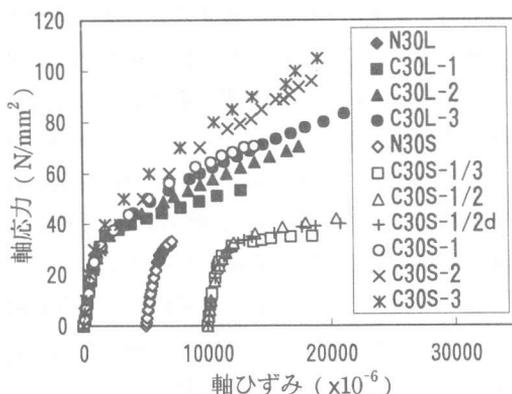


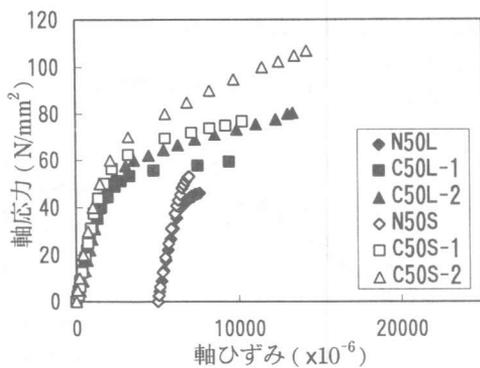
写真-1 破壊状況の一例



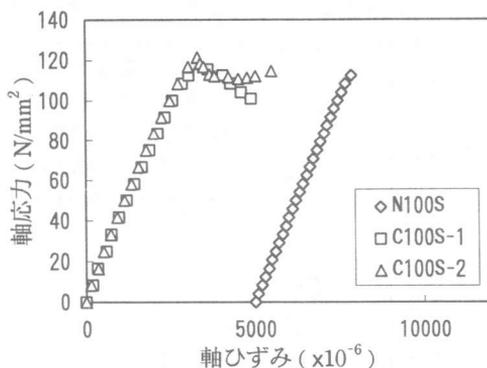
(a)  $f_{35} = 20 \text{ N/mm}^2$



(b)  $f_{35} = 30 \text{ N/mm}^2$



(c)  $f_{35} = 50 \text{ N/mm}^2$



(d)  $f_{35} = 100 \text{ N/mm}^2$

図-2 軸応力-軸ひずみ関係の一例

### 3.1 軸応力-軸ひずみ関係

一軸圧縮試験によって得られた軸応力-軸ひずみ関係の一例を図-2に示す。図において、無補強供試体に関しては、原点を  $5000 \times 10^{-6}$  ひずみ、C30Sの一部は原点を  $10000 \times 10^{-6}$  ひずみ平行移動した位置に表示してある。炭素繊維シートを貼り付けることにより、圧縮強度、じん性ともに大きく改善されている様子が伺われる。また剛性についてみると、軸応力が無補強供試体の圧縮強度の60%程度までは、炭素繊維シートで補強した供試体も無補強供試体も大差はない。また、炭素繊維シートを1/2層ストライプ状に貼り付けた供試体の場合、補強効果に及ぼす貼付け方の影響はほとんどなかった。

炭素繊維シートで補強されたコンクリートの軸応力-軸ひずみ関係は、図-2に示すようにC100Sを除いてはすべて単調増加となるため、終局時と最大応力時は一致する（以後、漸増型と称する）。しかしC100Sでは、最大応力に達した後応力が低下して破壊するため、最大応力時と終局時とが異なる（以後、低下型と称する）。このため以後の検討においてC100Sの場合には、最大応力に達した後、無補強供試体の圧縮強度まで応力が低下した時点を終局時とした。

図-3は、軸応力-軸ひずみ関係の形状が漸増型と低下型とに分かれる条件を検討するために、全供試体について、 $f_{co}$ と $\rho_{CF} E_{CF} / f_{co}^2$ とに関してプロットしたものである（ $\rho_{CF}$ ：式(3)、 $E_{CF}$ ：炭素繊維シートの弾性係数）。図中には、

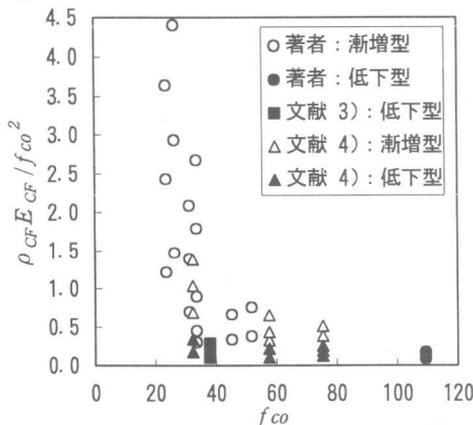


図-3 漸増型となるための条件

参考文献3),4)の結果も合わせて示す。これより、 $\rho_{CF} E_{CF} / f_{co}^2$ の値が0.2~0.3程度を境に、漸増型と低下型とに分かれるものと推察される。

### 3.2 圧縮強度

C100Sを除く漸増型の場合、炭素繊維シート貼付け供試体は、最大応力時が終局時となるため、圧縮強度は炭素繊維シートの破断強度を仮定することによって得られる側圧 $f_r$ （以後、終局拘束応力と称する）を導入することによって評価できる。

図-4は漸増型に関して、無補強供試体の圧縮強度で正規化された圧縮強度と終局拘束応力との関係を示したものである。これより漸増型の場合、コンクリート強度および供試体の寸法に関係なく、終局拘束応力の増加に伴って強度が増大することがわかる。実験結果より得られる回帰線は式(1)となった。

$$f_{cc} / f_{co} = 1.0 + 2.98 f_r / f_{co} \quad (1)$$

$$f_r = \frac{1}{2} \rho_{CF} f_{CF} \quad (2)$$

$$\rho_{CF} = 4 n t / \phi \quad (3)$$

ここに、 $f_{cc}$ ：炭素繊維シートで補強された供試体の圧縮強度（N/mm<sup>2</sup>）、 $f_{co}$ ：無補強供試体の圧縮強度（N/mm<sup>2</sup>）、 $f_r$ ：終局拘束応力（N/mm<sup>2</sup>）、 $\rho_{CF}$ ：炭素繊維補強量、 $f_{CF}$ ：炭素繊維シートの引張強度（N/mm<sup>2</sup>）、 $n$ ：炭素繊維シートの貼付け枚数、 $t$ ：炭素繊維シートの厚さ（mm）、 $\phi$ ：炭素繊維シートで拘束される部分の直径（mm）

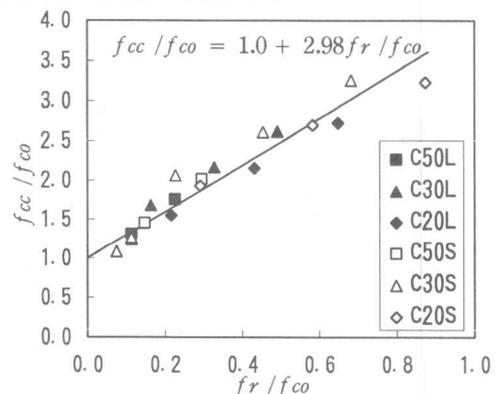


図-4 圧縮強度と終局拘束応力との関係

### 3.3 終局時の軸ひずみ

無補強供試体の最大応力時の軸ひずみで正規化された各供試体の終局時の軸ひずみと、無補強供試体の圧縮強度で正規化された終局拘束応力との関係を図-5に示す。終局時の軸ひずみは、圧縮強度と異なり終局拘束応力の増大に伴って、指数関数的に増加していることがわかる。さらに、同一終局拘束応力における終局時の軸ひずみの増加は、コンクリート強度が高いほど小さく、コンクリート強度が高いほど炭素繊維シート貼付けによるひずみ増加の効果が現れにくいようである。これは、コンクリートが高強度になればより脆性的となり、同一の軸方向変形能力を確保しようとする、より大きな横拘束力を必要とすることを意味している。終局時の軸ひずみと終局拘束応力との関係を、指数関数を用い、式(4)のように定量化した。

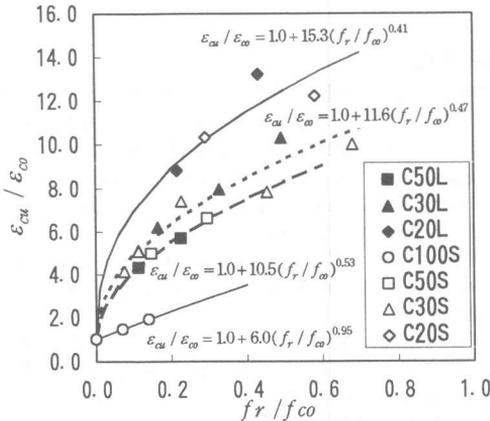


図-5 終局時の軸ひずみと  
終局拘束応力との関係

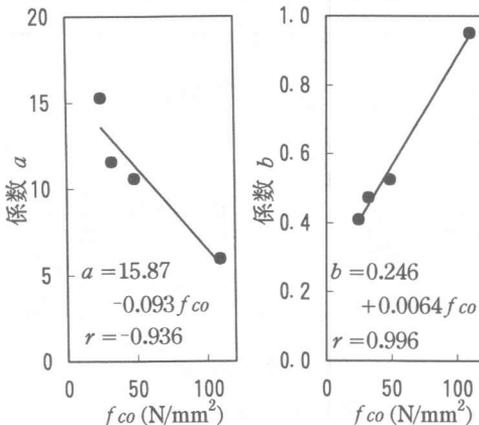


図-6 a - f<sub>co</sub> 関係

b - f<sub>co</sub> 関係

$$\varepsilon_{cu} / \varepsilon_{co} = 1.0 + a(f_r / f_{co})^b \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon_{cu}$  : 炭素繊維シートで補強された供試体の終局時の軸ひずみ、 $\varepsilon_{co}$  : 無補強供試体の最大応力時の軸ひずみ、 $a, b$  : 係数

最小自乗法によって求めた式を図-5中に示す。また、式(4)における係数 $a, b$ と無補強供試体の圧縮強度との関係を図-6に示す。これより式(4)における各係数 $a, b$ と無補強供試体の圧縮強度との間には、概ね式(5),(6)で表される直線関係が成り立つものと考えられる。

$$a = 15.87 - 0.093f_{co} \quad (5)$$

$$b = 0.246 + 0.0064f_{co} \quad (6)$$

### 4. 炭素繊維シートで補強されたコンクリートの軸応力-軸ひずみ関係

前述したように、炭素繊維シートで補強されたコンクリートの軸応力-軸ひずみ関係における初期剛性は、無補強のものと大差がないこと、また図-2に示したように、塑性域における軸応力-軸ひずみ関係はほぼ直線であることを考慮して、漸増型の場合、放物線とこれに接する直線からなる軸応力-軸ひずみ関係を提案した。また低下型の場合、放物線と下降域を表す直線からなる軸応力-軸ひずみ関係を提案した(図-7参照)。

< 漸増型の場合 >

O-A 区間 ( $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{tan}$ )

$$f_c = f_0 \{2(\varepsilon_c / \varepsilon_0) - (\varepsilon_c / \varepsilon_0)^2\} \quad (7)$$

A-B 区間 ( $\varepsilon_{tan} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$ )

$$f_c = f_{cu} - \lambda(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_c) \quad (8)$$

$$\lambda = \{2f_0(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0) + (4f_0(f_0\varepsilon_{cu}^2 - 2f_0\varepsilon_0\varepsilon_{cu} + f_{cu}\varepsilon_0^2))^{1/2}\} / \varepsilon_0^2 \quad (9)$$

$$\varepsilon_{tan} = \varepsilon_0 - \lambda\varepsilon_0^2 / (2f_0) \quad (10)$$

$$f_{tan} = f_0 \{2(\varepsilon_{tan} / \varepsilon_0) - (\varepsilon_{tan} / \varepsilon_0)^2\} \quad (11)$$

< 低下型の場合 >

O-C 区間 ( $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0$ )

$$f_c = f_0 \{2(\varepsilon_c / \varepsilon_0) - (\varepsilon_c / \varepsilon_0)^2\} \quad (12)$$

C-D 区間 ( $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$ )

$$f_c = f_0 + (\varepsilon_c - \varepsilon_0)(f_{cu} - f_0) / (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0) \quad (13)$$

ここで、 $f_0$ ：漸増型の場合、無補強コンクリートの最大応力；低下型の場合、炭素繊維シートで補強されたコンクリートの最大応力、 $\varepsilon_0$ ：漸増型の場合、無補強コンクリートの最大応力時の軸ひずみ（一定値：0.002）；低下型の場合、炭素繊維シートで補強されたコンクリートの最大応力時の軸ひずみ、 $f_{cu}$ ：炭素繊維シートで補強されたコンクリートの終局時の軸応力、 $\varepsilon_{cu}$ ：炭素繊維シートで補強されたコンクリートの終局時の軸ひずみ

図-8は、実験によって得られた軸応力-軸ひずみ関係と、提案した軸応力-軸ひずみ関係との比較の一例を示したものである。なお低下型の場合、最大応力および最大応力時の軸ひずみは、実験値（表-1の値）をそのまま用いた。両者は概ね一致しており、提案した軸応力-軸ひずみモデルによって、炭素繊維シートで補強

されたコンクリートの軸応力-軸ひずみ関係が表されるものと考えられる。

## 5. 結論

本研究で、次のことが明らかとなった。

- (1) 炭素繊維シート貼付けにより補強されたコンクリートの圧縮強度は、漸増型の場合、終局拘束応力の増加に伴って増大し、式(1)で概ね予想できる。
- (2) 炭素繊維シート貼付けにより補強されたコンクリートの終局時の軸ひずみは、終局拘束応力の増加に伴って指数関数的に増加し、式(4)~(6)で概ね予想できる。
- (3) 炭素繊維シートで補強されたコンクリートの軸応力-軸ひずみ関係として、漸増型の場合、式(7)~(11)で、低下型の場合、式(12),(13)で表される軸応力-軸ひずみ関係を提案した。

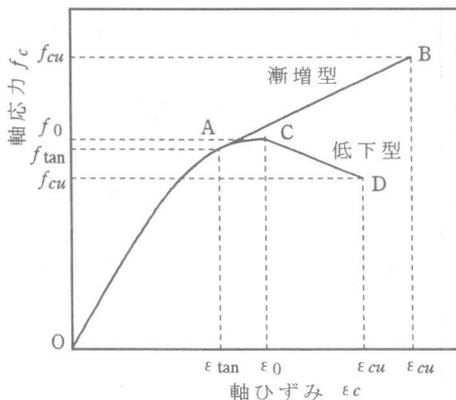
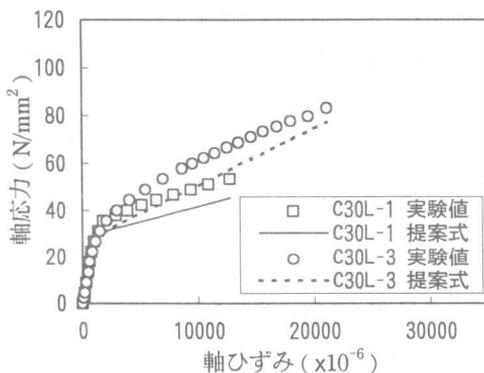


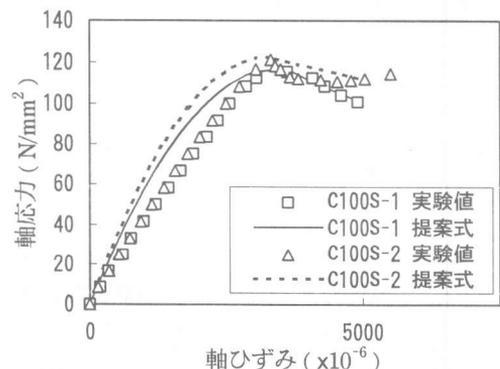
図-7 炭素繊維シートで補強されたコンクリートの軸応力-軸ひずみ関係

## 参考文献

- 1)中塚 信ほか：炭素繊維シートを用いたコンファインドコンクリートの軸応力度-軸ひずみ度特性，コンクリート工学論文集，Vol.9，No.2，pp.65-78，1998.7
- 2)Miyachi, K., et al., " Estimation of Strengthening Effects with Carbon Fiber Sheet for Concrete Column," Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Japan Concrete Institute, pp.217-224, Oct. 1997
- 3)細谷 学ほか：炭素繊維シートで横拘束されたコンクリート柱の応力度-ひずみ関係，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.95-100，1996
- 4)小牟禮 建一ほか：炭素繊維シートによるコンファインドコンクリートの強度・変形特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.777-782，1997



(a)  $f_{35} = 30 \text{ N/mm}^2$



(b)  $f_{35} = 100 \text{ N/mm}^2$

図-8 提案した軸応力-軸ひずみ関係と実験値との比較の一例