

# 論文 連続繊維シート補強の剛性がコンクリート柱の横拘束効果に及ぼす影響

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：本研究においては，将来新たな力学的特性を有する連続繊維シートが開発された場合をも想定して，高強度型炭素繊維シート，高弾性型炭素繊維シートおよびアラミド繊維シート貼付けによるコンクリート柱の横拘束効果について連続繊維シート補強の剛性の面から検討した。その結果，(1)連続繊維シートの種類が異なっても補強の剛性が同じ場合には，軸応力～軸ひずみ関係はほぼ同じ経路をたどる，(2) 軸応力～軸ひずみ関係の塑性域における傾きは，連続繊維シートの種類に関係なく，補強の剛性ととも増大する。等の結論が得られた。

キーワード：連続繊維シート，補強，横拘束効果，補強の剛性

## 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連続繊維シート貼付けによる補強方法は極めて有望である。シート貼付けによる補強においては，主に炭素繊維シートやアラミド繊維シートが用いられているが，補強に用いる連続繊維シートの強度，弾性係数などの特性や，積層数等が異なれば，当然のことながら補強の効果は異なってくる<sup>1), 2), 3)</sup>。しかし剛性を1つのパラメータとして考えれば，力学的特性の異なる連続繊維シートによる補強効果を統合的に扱えるものと考えられる。また，将来新たな力学的特性を有する連続繊維シートが開発された場合においても，剛性をパラメータとして補強への適用が検討可能である。そこで本研究においては，将来新たな力学的特性を有する連続繊維シートが開発された場合をも想定して，高強度型炭素繊維シート，高弾性型炭素繊維シートおよびアラミド繊維シート貼付けによるコンクリート柱の横拘束効果について連続繊維シート補強の剛

性の面から検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および実験計画

実験計画の一覧を表-1に示す。補強に用いた連続繊維シートは，高強度型炭素繊維シート，高弾性型炭素繊維シートおよびアラミド繊維シートの3種類である。実験要因は，連続繊維シート補強の剛性 $\rho_F E_F$  ( $\rho_F$ : 連続繊維補強量で後述の式(1),  $E_F$ : 連続繊維シートの弾性係数で表-2の規格値)とし， $\phi 10-20\text{cm}$ の供試体で，剛性 $\rho_F E_F$ が約1000, 500, 200 $\text{N/mm}^2$ の3水準， $\phi 15-30\text{cm}$ の供試体で剛性 $\rho_F E_F$ が約670, 330, 130 $\text{N/mm}^2$ の3水準となるように選定した。供試体は同一条件ごとに2体作製し試験に供した。補強に用いた連続繊維シートの機械的性質を表-2に示す。コンクリートには試験時材齢(35日以降)における目標圧縮強度が30 $\text{N/mm}^2$ のものを用いた。

供試体は材齢7日で脱型した後，試験時ま

\*1 四国職業能力開発大学校助教授 住居環境科 博(工) (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) トウシート部(正会員)

で実験室内放置とした。連続繊維シートの貼付けは、材齢 28 日を目標に供試体の表面が十分に乾燥した状態で表面整形を施して行った。供試体の高さを 50mm 間隔に区切った中心位

置に、所要量の連続繊維シートの中心が一致するように円周方向に貼り付けた。シートの重ね部の長さは 6cm とした。連続繊維シートの貼付け方法を図-1 に示す。

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)	連続繊維 シートの 種類	連続繊維 補強量 $\rho_F$ (%)	剛性 $\rho_F E_F$ (N/mm <sup>2</sup> )	最大応力 $f_{cc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	終局 軸ひずみ $\epsilon_{cu}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$f_{cc} / f_{co}$	$\epsilon_{cu} / \epsilon_{co}$	塑性域の 傾き $E_p$ (kN/mm <sup>2</sup> )	
N30L	$\phi 15$ $\times 30$	無補強	—	—	26.7	2120	1.00	1.00	-4.86	
C30L-1		高強度型 炭素繊維	0.293	675	34.5 ↑	**9570 ↑	1.29 ↑	4.51 ↑	**0.61	
C30L-2			0.147	338	28.7	5828	1.07	2.75	-1.06	
C30L-3			0.059	135	28.9	2794	1.08	1.32	-3.71	
H30L-1		高弾性型 炭素繊維	0.176	690	31.9	4499	1.19	2.12	-0.27	
H30L-2			0.088	345	28.8	4286	1.08	2.02	-0.85	
H30L-3			0.037	144	29.6	4362	1.11	2.06	-2.68	
A30L-1		アラミド 繊維	0.515	607	38.1	16076	1.43	7.58	0.59	
A30L-2			0.288	340	26.3	8850	0.99	4.17	-0.21	
A30L-3			0.113	134	28.8	6511	1.08	3.07	-2.48	
N30S		$\phi 10$ $\times 20$	無補強	—	—	26.7(27.8)	2002	1.00	1.00	-4.03
C30S-1			高強度型 炭素繊維	0.440	1014	49.8	9956	*1.79	4.97	1.79
C30S-2	0.220			507	32.3	9379	1.21	4.68	0.15	
C30S-3	0.088			203	28.3	6610	1.06	3.30	-0.93	
H30S-1	高弾性型 炭素繊維		0.264	1025	**37.9	**3950	1.42	1.97	1.38	
H30S-2			0.132	517	30.7	4202	1.15	2.10	-0.37	
H30S-3			0.055	216	29.2	3132	1.09	1.56	-3.26	
A30S-1	アラミド 繊維		0.772	911	58.5	15183	*2.11	7.58	1.51	
A30S-2			0.463	547	35.4	10714	1.33	5.35	0.36	
A30S-3			0.193	228	27.3	7111	1.02	3.55	-1.57	

供試体記号：N：無補強，C：高強度型炭素繊維，H：高弾性型炭素繊維，A：アラミド繊維

L： $\phi 15 \times 30$ ，S： $\phi 10 \times 20$

連続繊維補強量  $\rho_F$ ：式(1)による。

\*印： $f_{co}=27.8 \text{ N/mm}^2$ に対する値，\*\*印：供試体1体の値

↑印：連続繊維シート破断前に重ね部がはがれたため、実際の値は表の値よりも大きい

表-2 連続繊維シートの機械的性質（規格値，（）：特性値）

シートの種類	繊維目付 (g/m <sup>2</sup> )	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
高強度型炭素繊維	200 (205)	0.111	3,480 (4,130)	230 (242)
	300 (302)		2,900 (3,700)	392 (378)
高弾性型炭素繊維	280 (285)	0.193	2,060 (2,800)	118 (124)

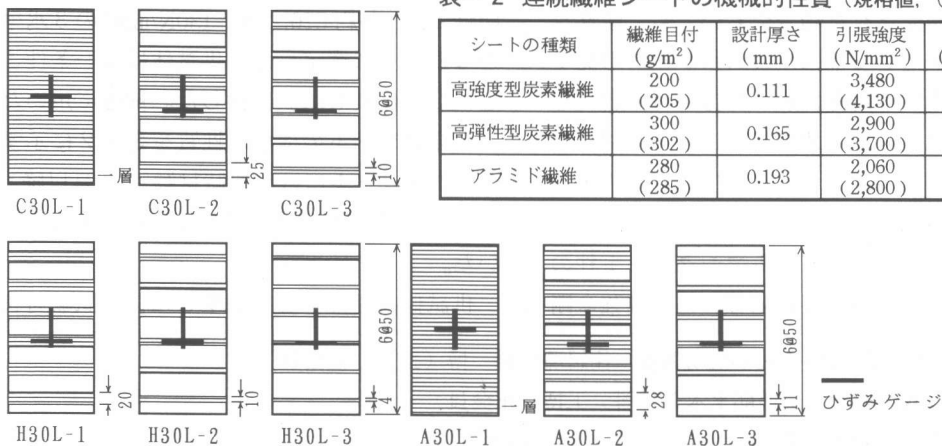


図-1 連続繊維シートの貼付け方法（単位：mm）

## 2.2 実験方法

1MN 万能材料試験機を用いて一軸圧縮試験を行った。試験中は、軸方向変位、軸ひずみ、周方向ひずみを測定した。供試体の軸方向の変位は対角位置に設置した2台の変位計によって載荷板間で測定した。また、軸ひずみおよび周方向ひずみは電気抵抗線ひずみゲージ（ゲージ長67mm）を用いて測定した。

載荷中、無補強供試体の最大荷重に相当する荷重までは、 $\phi 10-20\text{cm}$  の供試体では9.8kN毎に、 $\phi 15-30\text{cm}$  の供試体では19.6kN毎に測定した。ピーク以降は、原則として変位制御により載荷し、荷重が最大荷重の約1/3に低下するまで、または、破壊が激しく載荷不能となるまで試験を続行し随時測定した。

## 3. 実験結果および考察

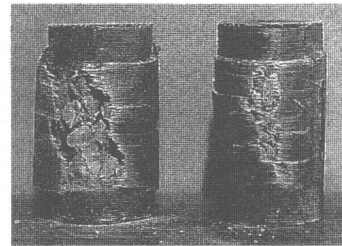
連続繊維シートで補強した円柱供試体の一軸圧縮試験結果を表-1に示す。結果は一部（表-1中における\*\*印）を除き2体の供試体の平均値で示してある。表-1における終局軸ひずみは、最初に連続繊維シートが破断した時点（図-2、3中における▼印）の軸ひずみとした。軸ひずみは、対角位置に設置した2台の変位計による測定値の平均値を供試体の高さ（200mmまたは300mm）で除した値である。ただし、載荷初期の供試体と載荷板との間の隙間等による変位のシフトを補正するために、無補強供試体の最大荷重の約1/3以前は、2枚のひずみゲージの測定値の平均値を用いた。また、表-1中の連続繊維補強量は次式により求めた値である。

$$\rho_F = 4nt / \phi \quad (1)$$

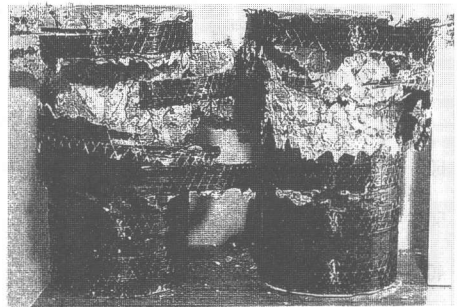
ここに、 $\rho_F$ ：連続繊維補強量、 $n$ ：連続繊維シートの貼付け枚数（ストライプ状の場合、シート幅を貼付け間隔50mmで除した値：例えば、C30L-2の場合、 $n=0.5$ ）、 $t$ ：連続繊維シートの厚さ（mm）、 $\phi$ ：連続繊維シートで拘束される部分の直径（mm）

## 3.1 破壊状況

一軸圧縮試験終了後の破壊状況の一例を写真-1に示す。連続繊維シートによって補強された供試体は、無補強供試体の圧縮強度を過ぎたあたりからひびわれが顕著になり変形が大きくなった。更に変形が大きくなると、補強量の少ない供試体（例えば、A30S-3）では、次第に荷重が低下し、ついにはストライプ状のシートが破断するのに伴って荷重が急激に低下した（以後「低下型」と称す）。一方、補強量の多い供試体（例えば、C30S-1）では、無補強供試体の圧縮強度を過ぎた後も荷重が徐々に増加し、ついにはシートが破断し、荷重が急激に低下して破壊した（以後「漸増型」と称す）。



(a) A30S-1



(b) C30L-2

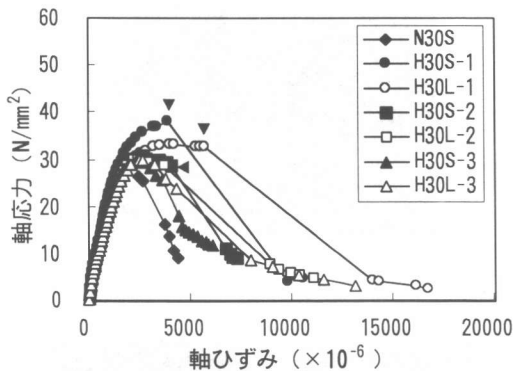
写真-1 破壊状況の一例

## 3.2 軸応力～軸ひずみ関係

実験から得られた各供試体の軸応力～軸ひずみ関係を図-2に示す。図には2体の供試体のうち、終局ひずみが大きかった方の供試体について示されている（図-3も同様）。

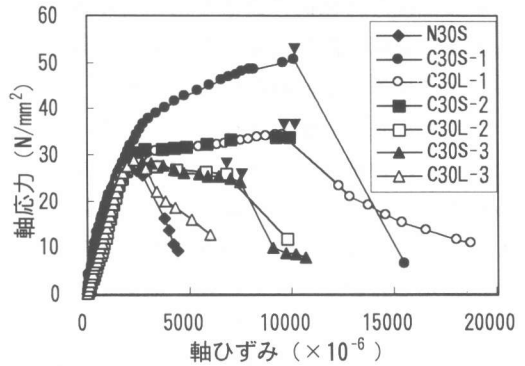
図より、連続繊維シートの種類に関係なく、補強の剛性  $\rho_F E_F$  が大きい場合には最大応力、終局軸ひずみ共に大きく増大することがわかる。また、補強の剛性  $\rho_F E_F$  があまり大きくない場合には、最大応力は無補強のコンクリートに比較してほとんど増大しなかったが、終局軸ひずみは増大した。

図-3は、剛性  $\rho_F E_F$  がほぼ同じ連続繊維シートで補強した供試体の軸応力～軸ひずみ関係の一例を表したものである。これより、連続繊維シートの種類が異なっても、補強の剛性  $\rho_F E_F$  が同じ場合には、シートが破断するまでは軸応力～軸ひずみ関係は、ほぼ同じ経路をたどることがわかる。ただし、シートの種類によって破断時のひずみが異なるため、シート破断時の軸応力および軸ひずみには差

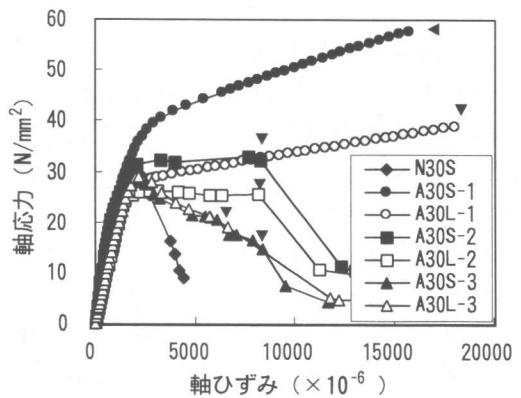


(b) 高弾性型炭素繊維シート

が生じ、シート破断時の軸ひずみは、アラミド繊維シート、高強度型炭素繊維シート、高弾性型炭素繊維シートを用いた供試体の順に大きくなった。

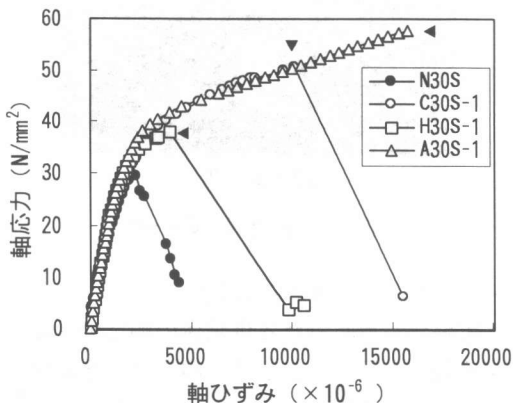


(a) 高強度型炭素繊維シート

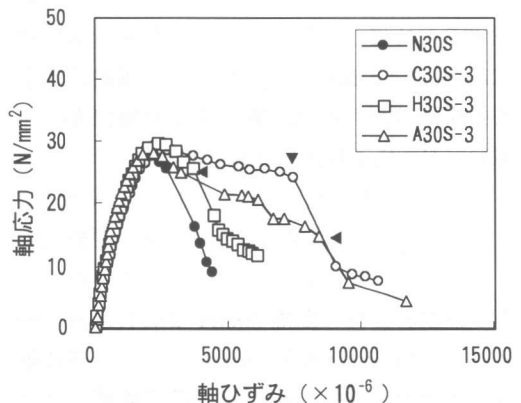


(c) アラミド繊維シート

図-2 軸応力～軸ひずみ関係



(a) 剛性  $\rho_F E_F$ : 約 10000N/mm<sup>2</sup> の場合



(b) 剛性  $\rho_F E_F$ : 約 2000N/mm<sup>2</sup> の場合

図-3 軸応力～軸ひずみ関係

図-4は、軸応力～軸ひずみ関係における塑性域の傾きと補強の剛性との関係を示したものである。塑性域の傾き $E_p$ は、塑性域の始点と終局時との間の測定値より最小二乗法によって求めた値（2体の平均値）である。塑性域の始点としては、漸増型においては、（軸応力の増分/軸ひずみの増分）がほぼ一定値となる時点とした。また、低下型においては、軸応力～軸ひずみ関係におけるピーク時とした。ここで、塑性域の傾きが正のものは、軸応力～軸ひずみ関係が漸増型であることを意味し、負のものは低下型であることを意味している。図-4より、連続繊維シートの種類や供試体の寸法に関係なく、塑性域の傾きは補強の剛性が増加するとともに増大し、両者の間には強い関係があることがわかる。

### 3.3 周方向ひずみ～軸ひずみ関係

図-5は、剛性 $\rho_F E_F$ がほぼ同じ連続繊維シートで補強した供試体の周方向ひずみと軸ひずみの関係の一例を表したものである。周方向ひずみは、2体の供試体のうち測定値が大きかった供試体について示している。また、周方向ひずみは2カ所（対角位置）の平均値を用いた。これより、連続繊維シートの種類が異なっても、補強の剛性 $\rho_F E_F$ が同じ場合には、周方向ひずみと軸方向ひずみの関係は、ほぼ同じ形態になることが推察される。

図-6は連続繊維シートの種類ごとの周方向ひずみと軸ひずみとの関係を表したものである。図より、連続繊維シートの種類に関係なく、補強の剛性が低いほど、同一軸ひずみに対する周方向ひずみが大きくなる傾向があることがわかる。また図中に、終局時における周方向ひずみの平均値 $\varepsilon_{cuav}$ （同一種類の連続繊維シートを貼り付けた計6体の供試体のひずみゲージの値の平均値）を示す。これより、多少のばらつきはあるものの、補強に用いた連続繊維シートの種類が同じであれば、補強の剛性に関係なく終局時における周方向ひずみはほぼ一定になるものと思われる。

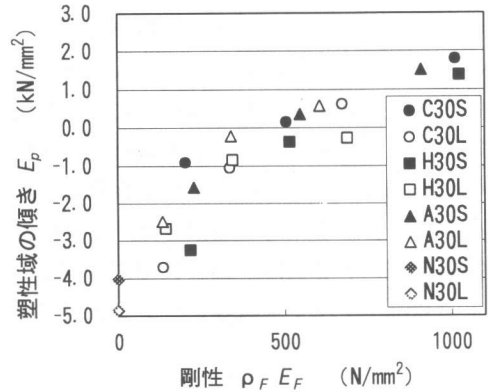
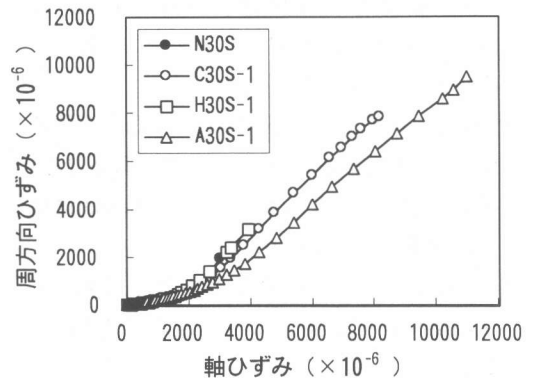
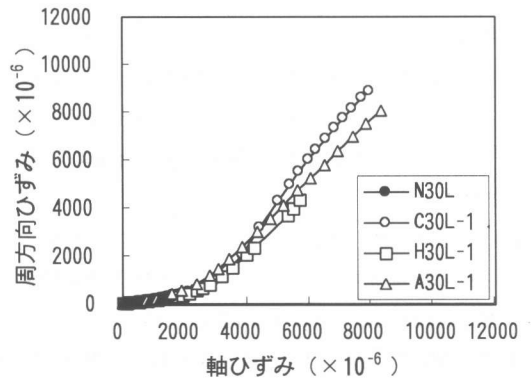


図-4 塑性域の傾きと $\rho_F E_F$ との関係



(a) 剛性 $\rho_F E_F$ : 約1000N/mm²の場合



(b) 剛性 $\rho_F E_F$ : 約670N/mm²の場合

図-5 周方向ひずみ～軸ひずみ関係の一例

なお、終局時における周方向ひずみの平均値  $\epsilon_{cuav}$  の破断ひずみ（シートの引張強度をシートの弾性係数で除した値）に対する割合は、高強度型炭素繊維シートで 44%，高弾性型炭素繊維シートで 51%，アラミド繊維シートで 47%であった。また、周方向ひずみの最大測定値の破断ひずみに対する割合は、高強度型炭素繊維シートで 83%，高弾性型炭素繊維シートで 88%，アラミド繊維シートで 86%であった。

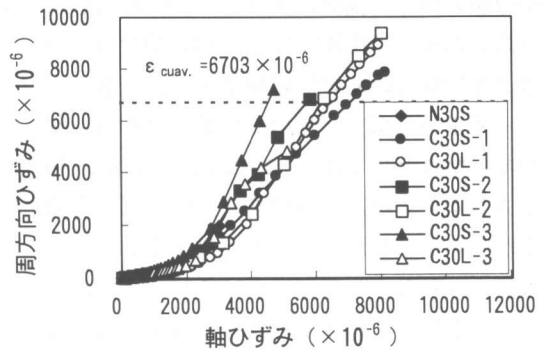
#### 4. まとめ

本研究で次のことが明らかとなった。

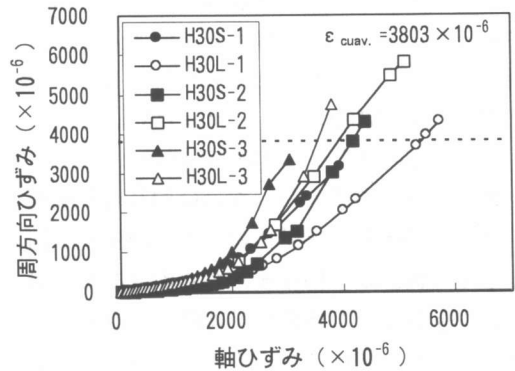
- (1) 連続繊維シートの種類が異なっても、補強の剛性が同じ場合には、軸応力～軸ひずみ関係はほぼ同じ経路をたどる。
- (2) 軸応力～軸ひずみ関係における塑性域の傾きは、連続繊維シートの種類に関係なく、補強の剛性ととともに増大し、両者の間には強い関係が認められる。
- (3) 連続繊維シートの種類が異なっても、補強の剛性が同じ場合には、周方向ひずみ～軸ひずみ関係はほぼ等しくなる。また、終局時における周方向ひずみはほぼ一定である。

#### 参考文献

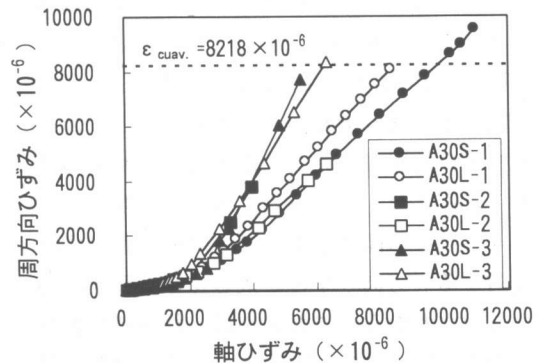
- 1)中塚 信ほか：炭素繊維シートを用いたコンファインドコンクリートの軸応力度-軸ひずみ度特性，コンクリート工学論文集，Vol.9, No.2, pp.65-78, 1998.7
- 2)宮内 克之ほか：炭素繊維シートによるコンクリート柱の補強効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.3, pp.1453-1458, 1999
- 3)須田 康之ほか：FRP シートにより横方向補強されたコンクリートの圧縮性状に及ぼすハイブリット効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.2, pp.337-342, 2000



(a) 高強度型炭素繊維シート



(b) 高弾性型炭素繊維シート



(c) アラミド繊維シート

図-6 周方向ひずみ～軸ひずみ関係