

炭素繊維シートによるコンクリート柱の横拘束効果に関する研究

A STUDY ON CONFINEMENT EFFECT OF CONCRETE CYLINDERS BY CARBON FIBER SHEETS

細谷 学*、川島一彦**

Manabu HOSOTANI and Kazuhiko KAWASHIMA

*工修 東京工業大学研究生 (大成建設) 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

**工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

To reflect confinement by carbon fiber sheets in seismic strengthening of reinforced concrete bridge piers, a series of compressive loading tests of concrete cylinders were conducted and a stress-strain relation was obtained. It was found from the tests that rate of stress deterioration after peak stress highly depends on carbon fiber ratio ρ_{cf} . When ρ_{cf} is in the range of 0.05~0.15%, the stress takes its peak at strain of about 3500 μ , and then it deteriorates over this strain. The deteriorating rate decreases as ρ_{cf} increases. On the other hand, the stress keeps to increase without deterioration when ρ_{cf} is larger than a certain amount of value. It is therefore concluded that the confinement effect be included in seismic strengthening of reinforced columns by means of carbon fiber sheets.

Key Words: carbon fiber sheet, confinement effect, stress-strain relation, seismic strengthening, seismic retrofit, bridge

1. まえがき

兵庫県南部地震で被害を受けた鉄筋コンクリート橋脚 (以下、RC橋脚と記す) の多くは、じん性の重要性が考慮されるようになった1980年よりも前の耐震基準で設計されたものであり、このような耐震基準により設計された既存橋脚の耐震補強が急務となっている。RC橋脚の耐震補強工法としては、RC巻立て工法や曲げ耐力制御式鋼板巻立て工法が採用されているが、施工性の良さから、炭素繊維シート (以下、CFSと記す) 巻立て工法が注目されている。既往の研究によれば、CFSが主鉄筋段落し部や基部のせん断耐力の向上に対して有効であることが報告されている^{1) 2)}。しかし、横拘束を高めることによるじん性の向上という観点からの研究は少ないのが現状である。

著者らは、CFSによる横拘束効果を耐震補強に取り入れてじん性の向上を図ることを目的として、CFSによる横拘束効果をRC橋脚の地震時保有水平耐力法による耐震補強計算に反映できるように、CFSによる横拘束下でのコンクリートの軸方向応力度～軸方向ひずみ関係について研究を行ってきた^{3) 4)}。CFSで横拘束されたコンクリート柱試験体の一軸圧縮試験の結果より、後述するカーボンファイバー比 ρ_{cf} が0.05~0.15%程度であれば、コンクリートの最大応力度 f_{cc} やそれが生じる時のひずみ ε_{cc} はあまり増加しないが、最大圧縮応力

度以後の軸方向応力度の低下割合や終局時のひずみが改善されることが明らかとなった。

本研究では、カーボンファイバー比 ρ_{cf} がより大きい場合の実験を行い、 ρ_{cf} が0.05~0.15%程度に小さい場合の結果と合わせて、CFSの横拘束効果によるコンクリート柱の軸方向応力度～軸方向ひずみ関係を検討することとした。

2. 実験概要

本実験では、断面形状、CFS補強量をパラメータとして、星隈らの帯鉄筋による横拘束効果の実験⁵⁾を参考に表-1に示すように合計12体の試験体を用いた。断面形状は円形と正方形の2種類とし、試験体寸法は直径または辺長を200mm、高さを600mmとした。CFS量は、次式のコンクリートに対するCFSの体積比 ρ_{cf} (カーボンファイバー比) で与えることとした³⁾。

$$\rho_{cf} = 4 \times n \times t_{cf} / d \quad (1)$$

ここで、 t_{cf} : CFS 1層の厚さ (mm), n : CFSの巻立て層数, d : コンクリート柱の断面長である。 d としては、円形断面の場合は直径を、また、正方形断面の場合は辺長をとる。

カーボンファイバー比 ρ_{cf} としては、表-1に示すよ

うに0.05～0.15%と比較的小さい場合と、1.336%と大きい場合を与えた。 ρ_{CF} が0.05～0.15%というのは、実橋レベルでのコストや施工性を考慮して定めた値であり、例えば、直径3mの円柱に対してCFSを2～6層程度巻いた場合に相当する。 ρ_{CF} が1.336%というのは直径3mの円柱に対してCFSを60層程度巻いた場合に相当し、現実的な補強量ではないが、前述のように ρ_{CF} を大きくすることによりCFSによる横拘束効果がより顕著に現れる領域を検討対象としたものである。

CFSの取り付け方法を図-1に示す。 ρ_{CF} が0.05～0.15%程度の場合には、CFSを幅1～3cmの帯状にして一定間隔で取り付けた。これは、CFSを全面に巻くと1層だけでも上記の ρ_{CF} を上回ってしまうためである。C-3～C-5およびS-3～S-5には繊維目付け量（単位面積当たりのCFSの質量）が200g/m²のCFSを用いたが、C-6およびS-6には繊維目付け量が300g/m²のCFSを用いた。これは、C-6およびS-6は ρ_{CF} が非常に大きいため、CFSの接着性や施工性を考慮して、CFSの巻付け層数を少なくするためである。CFSの巻付け方向は、いずれの試験体も帯鉄筋方向とし、ラップ長は10cmとした。正方形断面の試験体では、隅角部でCFSが応力集中により破断するのを防ぐため、半径30mmの面取りを施した。使用したCFSを材料メーカーが試験した結果が表-2である。

コンクリートには、早強ポルトランドセメントを使用し、呼び強度は30N/mm²、またスランブは8cmとした。粗骨材には最大粒径20mmの碎石を使用した。なお、試験体は平成7年10月（C-1、C-3～C-5、S-1、S-3～S-5）と平成8年2月（C-2、C-6、S-2、S-6）に分けて製作した。

試験体には軸方向鉄筋を配置し、面積比で1%程度になるようにした。これは、一般の橋脚に配置されている

のと同程度である。

載荷は変位制御による単調一軸圧縮とし、載荷速度は毎分0.2mmとした。試験体の軸方向ひずみは、変位計で測定した試験体上下間の変位を試験体の高さで割って算出した。

表-1 実験に用いた試験体

No.	断面形状	断面寸法	コンクリートの設計強度(N/mm ²)	炭素繊維シート		
				公称弾性係数(N/mm ²)	繊維目付け量(g/m ²)	ρ_{CF} (%)
C-1	円形	$\phi 200\text{mm} \times h 600\text{mm}$	30	2.30×10^5	200	0.056
C-2						0.111
C-3						0.167
C-4					300	1.336
C-5						
C-6						
S-1	正方形	$\square 200\text{mm} \times h 600\text{mm}$	30	2.30×10^5	200	0.056
S-2						0.111
S-3						0.167
S-4					300	1.336
S-5						
S-6						

表-2 実験に用いたCFSの材料特性

公称値	繊維目付け量	g/m ²	200	300
	シート厚さ	mm	0.111	0.167
	引張強度	N/mm ²	3,481	
	弾性係数	N/mm ²	2.30×10^5	
	破断ひずみ	%	1.5	1.5
試験値	繊維目付け	g/m ²	200	300
	シート厚さ	mm	0.110	0.167
	引張強度	N/mm ²	4,227	4,433
	弾性係数	N/mm ²	2.43×10^5	2.52×10^5
	破断ひずみ ^(注)	%	1.74	1.76

注) 破断ひずみは実測していないため、ここに示す値は引張強度を弾性係数で除して求めたものである。

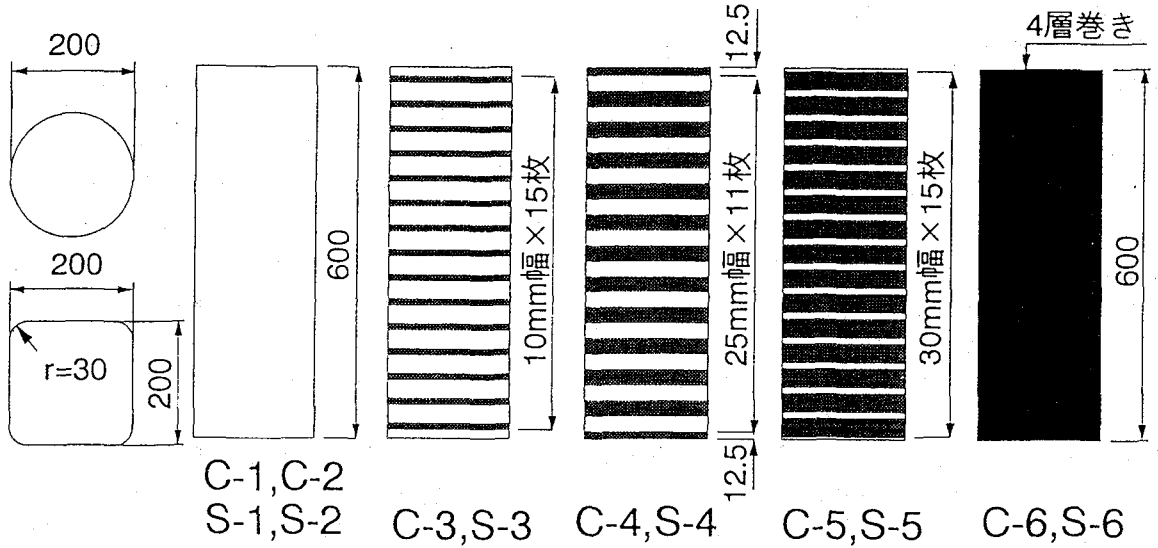
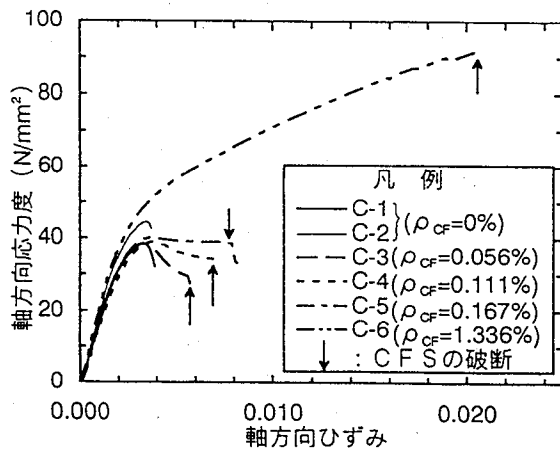
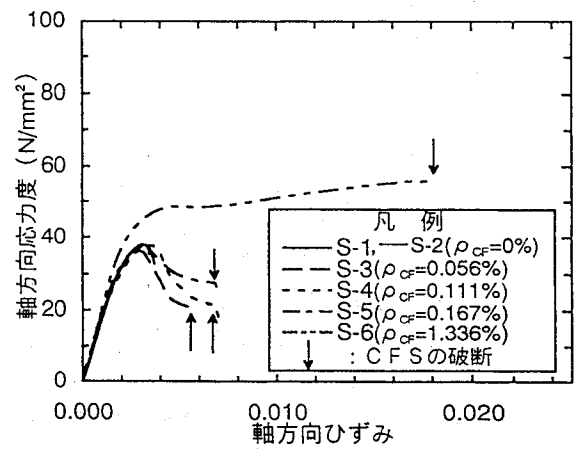


図-1 CFSの取り付け方



(a)円形断面の場合



(b)正方形断面の場合

図-2 コンクリートの軸方向応力度～軸方向ひずみの関係

3. 横拘束したコンクリートの軸方向応力度～軸方向ひずみの関係

図-2にコンクリート柱の軸方向応力度～軸方向ひずみの関係を示す。無補強試験体の場合には、円形断面(C-1、C-2)、正方形断面(S-1、S-2)ともに、コンクリートの軸方向ひずみが3,000～3,500 μ 付近で最大圧縮応力度 f_{cc} に達し、その後、軸方向ひずみの増加とともに急速に応力度が低下した。

CFSで拘束した場合には、いずれも最終的にはCFSが破断し、コンクリートの軸方向耐力が急速に低下して終局状態となった。拘束コンクリートの初期剛性は約 $2.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ で、断面形状や ρ_{CF} によらず、ほとんど変化しない。

C-3～C-5(円形断面)およびS-3～S-5(正方形断面)のように ρ_{CF} が比較的小さい場合と、C-6(円形断面)およびS-6(正方形断面)のように ρ_{CF} が大きい場合に分けて、コンクリートの軸方向応力度～軸方向ひずみの関係を整理すると以下ようになる。

(1) ρ_{CF} が0.05～0.15%程度と比較的小さい場合

円形断面(C-3～C-5)、正方形断面(S-3～S-5)ともに、最大圧縮応力度 f_{cc} は37～41 N/mm^2 、これが生じる時の軸方向ひずみ ϵ_{cc} は2,500～3,000 μ である。これらに対しては、断面形状および ρ_{CF} の違いによる影響はあまり顕著には現れていない。

しかし、最大圧縮応力度以後の下降勾配(2次勾配)は ρ_{CF} の増加につれて緩やかになり、また終局時のひずみも ρ_{CF} が大きくなるにつれて増加する。このような傾向は、正方形断面より円形断面の方が顕著であり、円形断面の方が正方形断面よりも拘束効果が大きいことがわかる。

このように、 f_{cc} や ϵ_{cc} に対しては ρ_{CF} が増加してもその効果があまり現れてこないが、2次勾配に対しては ρ_{CF} の効果が現れてくるのは、 ρ_{CF} が0.05～0.15%程度と比較的小さい場合には、応力上昇域ではCFSによる横

拘束力がまだ小さく、CFSの横拘束効果が顕著には現れていないためと考えられる。その後コンクリートが最大圧縮応力度に達して周方向に膨張し始め、後述するように周方向ひずみが1,000～2,000 μ 程度に達すると、CFSによる拘束力は急速に大きくなり、その横拘束効果が現れてくると同時に、試験体の形状による影響も次第にはっきりしてくるためと考えられる。

(2) ρ_{CF} が1.336%と大きい場合

円形断面(C-6)、正方形断面(S-6)ともに、コンクリートの軸方向ひずみが3,000～3,500 μ に達しても、軸方向応力度は、無補強試験体や ρ_{CF} が0.05～0.15%と小さい場合のように低下することなく、CFSが破断するまで軸方向ひずみの増加とともに上昇し続ける。CFSが破断して終局状態となったのは、円形断面、正方形断面ともに、コンクリートの軸方向ひずみが約20,000 μ に達した時であった。

ρ_{CF} が1.336%と大きい場合には、拘束効果に及ぼす断面形状の影響もはっきり現れている。まず、円形断面(C-6)の場合を見てみると、最初は無補強試験体(C-2)とほぼ同じ $2.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 程度の初期剛性で軸方向応力度は上昇するが、コンクリートの軸方向ひずみが約3,000 μ に達すると、軸方向応力度の上昇勾配(2次勾配)は約 $2.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ と緩くなり、その後、終局に至るまで、ほぼこの2次勾配で軸方向応力度は上昇し続ける。終局時のコンクリートの軸方向応力度は91.9 N/mm^2 で、そのときの軸方向ひずみは20,470 μ であった。

一方、正方形断面(S-6)の場合には、円形断面(C-6)の場合と同様に初期剛性は $2.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 程度であるが、軸方向ひずみが約3,000 μ に達すると、この後の2次勾配はほぼ水平に近くなり、軸方向応力度の上昇勾配は約 $6.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ と小さい。また、S-6の終局時のコンクリートの応力度は56.1 N/mm^2 で、そのときのひずみは18,230 μ であった。このようなことから、 ρ_{CF} が1.336%と同じでも、円形断面の方が正方形

断面よりCFSによる拘束効果が大きいことがわかる。

4. 横拘束効果の特徴

前章で示したCFSによる横拘束効果の定性的な特徴を、ここでは定量的に表すこととする。前述した星限らの研究を参考にして⁵⁾、横拘束効果と最大圧縮応力度 f_{cc} 、これが生じる時の軸方向ひずみ ϵ_{cc} 、最大圧縮応力度以後の2次勾配 E_g の関係を求める。

(1) コンクリートの最大圧縮応力度 f_{cc}

図-3はCFSによる横拘束が変化すると最大圧縮応力度 f_{cc} がどのように変化するかを示したものである。ここで、 f_{cf} はCFSの引張強度、 f_{co} は無補強試験体の圧縮強度である。なお、C-6およびS-6試験体では前述のように軸方向応力度が上昇し続けるため、図-4に示す初期勾配から2次勾配に変化し終える点(図中の点(3))での軸方向応力度を f_{cc} とみなすこととし、それぞれ $f_{cc}=54.8\text{N/mm}^2$ (C-6)、 48.7N/mm^2 (S-6)とした。

帯鉄筋による横拘束が f_{cc} に及ぼす影響は、次式で与えることができる⁵⁾。

$$f_{cc}/f_{co} = 1.0 + 3.83 \alpha \rho_s f_{yh}/f_{co} \quad (2)$$

ここで、円形断面の場合には $\alpha=1.0$ 、正方形断面の場合には $\alpha=0.2$ としている。

式(2)において $\rho_s \rightarrow \rho_{cf}$ 、 $f_{yh} \rightarrow f_{cf}$ と置き換えて、CFSの横拘束効果を評価した結果が図-3中の実線(円形断面の場合)および破線(正方形断面の場合)である。

帯鉄筋で拘束した場合には円形断面の方が正方形断面より拘束効果が大きい、CFSで拘束した場合には断面形状による違いはそれほど顕著ではなく、いずれの断面でも f_{cc} はそれ程増加していない。また、 f_{cc} に対するCFSの横拘束効果を、上述の式(2)を用いて評価すると、計算値は実験値よりもかなり大きくなる。

(2) コンクリートに最大圧縮応力度が生じる時の軸方向ひずみ ϵ_{cc}

CFSによる横拘束効果と最大圧縮応力度時のひずみ ϵ_{cc} の関係を図-5に示す。C-6およびS-6試験体の ϵ_{cc} は、前述した(1)で f_{cc} とみなした点における軸方向ひずみとし、それぞれ $\epsilon_{cc}=4600\mu$ (C-6)、 4950μ (S-6)とした。

図-5中の実線(円形断面)および破線(正方形断面)は、CFSによる横拘束効果を、 f_{cc} の場合と同様にして、式(3)に示す帯鉄筋で横拘束した場合の ϵ_{cc} に

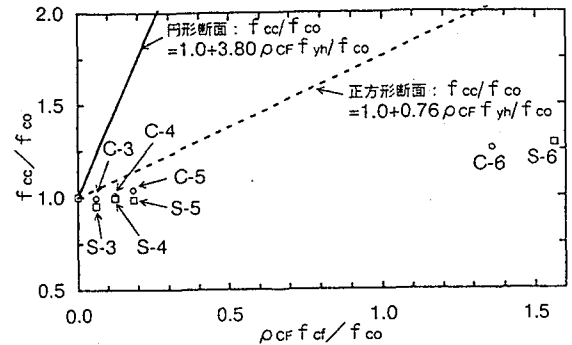


図-3 横拘束と f_{cc} の関係

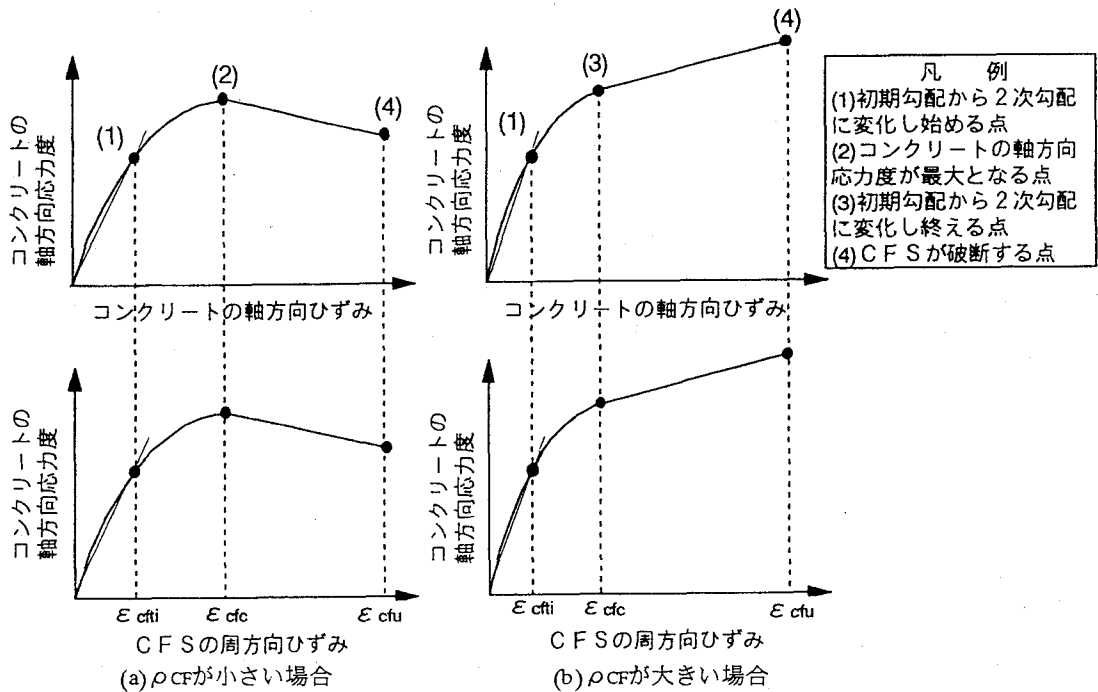


図-4 コンクリートの軸方向応力度～軸方向ひずみの関係において、コンクリートが各状態になる時のCFSの周方向ひずみの定義

対する関係式⁵⁾により評価したものである。

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033 \rho_s f_{yh} / f_{co} \quad (3)$$

ここで、円形断面の場合には $\beta=1.0$ 、正方形断面の場合には $\beta=0.4$ としている。

最大圧縮応力度 f_{cc} の場合と同様に、横拘束が大きくなっても ε_{cc} はあまり増大せず、断面形状による違いも大きくない。式(3)によりCFSの横拘束効果を評価すると、計算値は実験値よりも大きくなる。

(3) 最大圧縮応力度以後の2次勾配 E_g

2次勾配 E_g としては、図-6(a)に示すように、最大圧縮応力度時から終局破壊に至るまでの間の平均弾性係数を、またC-6およびS-6については、図-6(b)に示すように、(2)において ε_{cc} とみなした点と終局破壊に至るまでの間の平均弾性係数をそれぞれ E_g と定義し、実験結果を最小二乗近似して求めた。 E_g の符号は、軸方向ひずみの増加につれて軸方向応力度が増加する時を正としている。

図-7はCFSによる横拘束と2次勾配 E_g の関係を示したものである。図中の実線は、CFSによる横拘束効果を、式(4)に示す帯鉄筋で横拘束した場合の下降勾配 E_{des} (=2次勾配 E_g)に対する関係式⁵⁾を用いて、 f_{cc} の場合と同様に評価したものである。なお、式(4)において E_{des} の符号は、本研究における E_g と一致させている。

$$E_{des} = -11.2 \frac{f_{co}^2}{\rho_s f_{yh}} \quad (4)$$

CFSで横拘束した場合には、CFSによる横拘束が大きくなるにつれて E_g も増加し、 ρ_{CF} が1.336%と大きくなると E_g は正の値となる。また、同一の横拘束を与えた場合の E_g は円形断面の方が正方形断面よりも大きく、円形断面の方が拘束効果が大きいことがわかる。一方、帯鉄筋で横拘束した場合には、2次勾配に対しては断面形状による違いはなく、また横拘束をどんなに大きくしても E_g は正の値とはならない。こうした点は、CFSで横拘束した場合と大きく異なっており、したがって、 E_g に対するCFSの横拘束効果を式(4)を用いて評価した結果は、実験値を正しく表すことはできない。

5. コンクリートの軸方向応力度とCFSの周方向ひずみの関係

CFSで拘束した場合と帯鉄筋で拘束した場合は、コンクリートの軸方向応力度～軸方向ひずみ関係における拘束効果に違いがあることがわかった。そこで、このような違いが生じる原因を明らかにするために、軸圧縮力を作用させた時に、CFSに生じる周方向ひずみがど

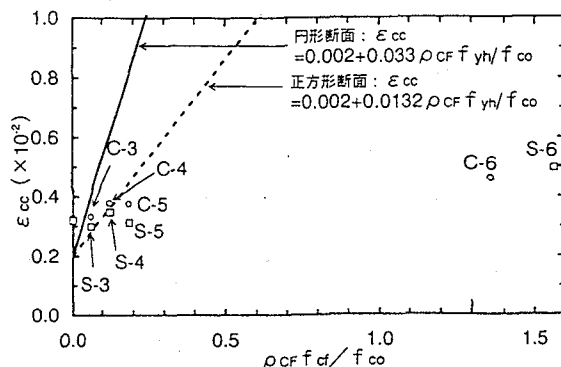
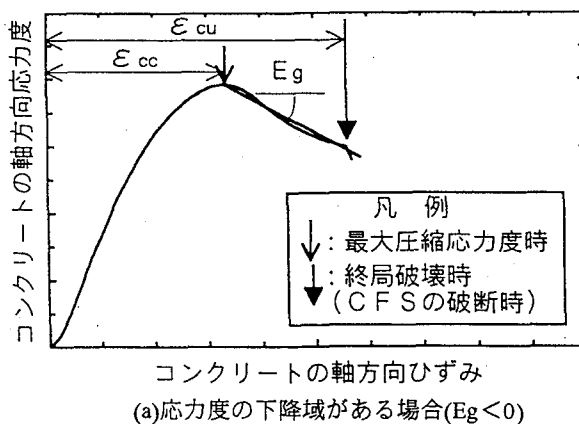
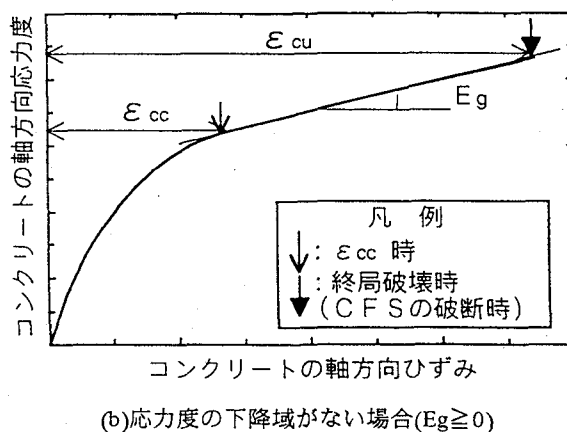


図-5 横拘束効果と ε_{cc} の関係



コンクリートの軸方向ひずみ
(a) 応力度の下降域がある場合($E_g < 0$)



(b) 応力度の下降域がない場合($E_g \geq 0$)

図-6 2次勾配 E_g の定義

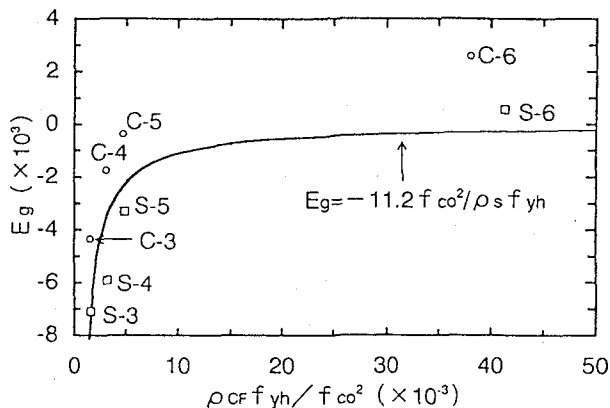
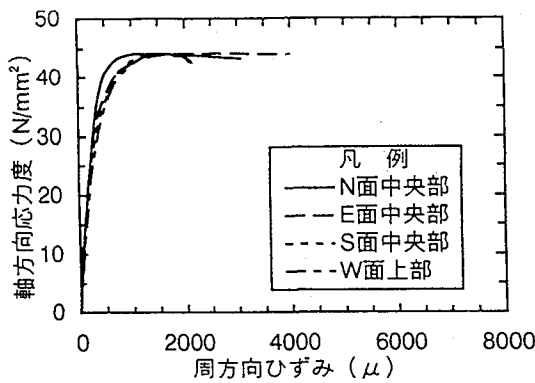
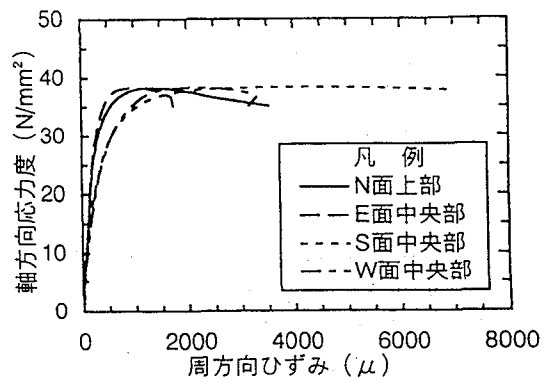


図-7 横拘束効果と E_g の関係

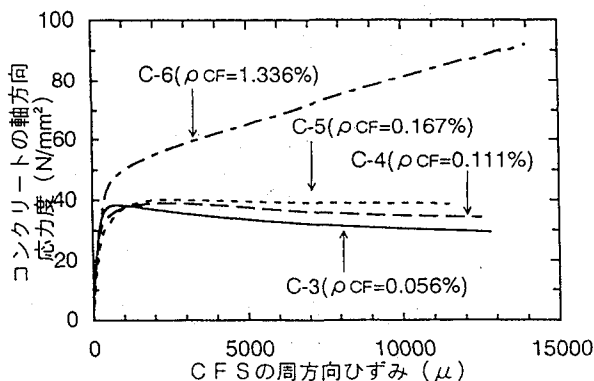


(a)円形断面の場合 (C-2)

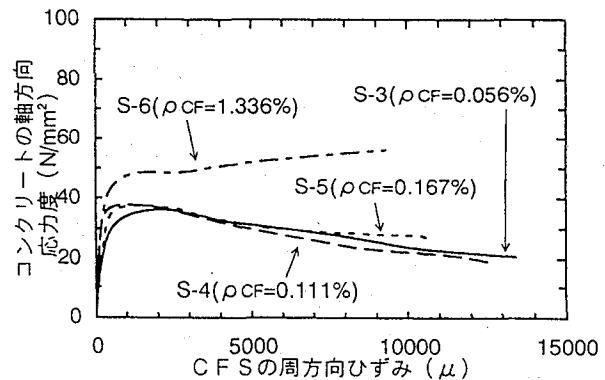


(b)正方形断面の場合 (S-2)

図-8 コンクリートの軸方向応力度～周方向ひずみの関係



(a)円形断面の場合



(b)正方形断面の場合

図-9 コンクリートの軸方向応力度～CFSの周方向ひずみの関係

のように変化するかを求めることとした。また、これと比較し、CFSで拘束していないコンクリートがどのように変形するかを把握するため、無補強試験体の周方向ひずみも求めることとした。

(1) 無補強試験体の場合

図-8は、それぞれ無補強試験体C-2およびS-2に軸圧縮応力度を作用し始めると、どのように試験体の周方向のひずみが増加するかを示した結果である。ひずみの測定は、コンクリート柱の周方向に貼り付けたひずみゲージにより、試験体の高さ方向には上部、中央部、下部の3箇所、周方向にはN面、E面、S面、W面の4面の合計12箇所で行った。図-8には、各面で、3箇所の高さ方向のうち損傷が最も大きい部分のひずみだけを示している。載荷開始後の初期段階では、コンクリートの軸方向応力度と周方向ひずみはほぼ比例して増加するが、コンクリートの周方向ひずみが1,000～2,000μ程度に達すると、軸方向応力度の増加割合に対して、周方向ひずみの増加割合が急速に大きくなり始め、その後、軸方向応力度はほぼ一定値に落ち着く傾向を示す。これは、コンクリートの圧壊によるものである。そこで、軸方向応力度の増加にともない周方向のひずみが急速に増加した後、軸方向応力度がほぼ一定値に達する時の周方向ひずみを求めた。これは、この点がコンクリー

表-3 コンクリートが急速に膨張し始める時のコンクリートの周方向ひずみ

No.	断面形状	コンクリートの設計強度 (N/mm²)	コンクリートが急速に膨張し始める時の周方向のひずみ(μ)およびこれが生じた位置				
			N面	E面	S面	W面	4面の平均
C-2	円形	30	1,050 (中央部)	1,520 (中央部)	1,350 (中央部)	1,470 (上部)	1,350
S-2	正方形		1,240 (上部)	890 (中央部)	2,060 (中央部)	1,580 (中央部)	1,440

トの圧壊が進展して、急速にコンクリートの体積膨張が生じた点であると考えられるためである。このようにして求めた結果が、表-3である。これより、無補強試験体では、コンクリートが急速に膨張し始める時の周方向ひずみは1,000～2,000μ程度であることがわかる。

(2) CFSで拘束した場合

コンクリートの軸方向応力度をCFSに生じる周方向ひずみとの関係で整理すると図-9のようになる。ひずみの測定位置は、試験体の高さ方向には上部、中央部、下部の3箇所、周方向にはE面、W面の2面の合計6箇所を標準としたが、C-6およびS-6では、周方向にN面、E面、S面、W面の4面の合計12箇所で行った。ただし、図-9には、それぞれの試験体で最も損傷が大きい箇所のひずみだけを示している。

前章と同様に、 ρ_{cf} が0.05～0.15%と比較的小さい場合と、 ρ_{cf} が1.336%の場合に分けて、コンクリートの軸方向応力度とCFSの周方向ひずみの関係を整理すると以下ようになる。

a) ρ_{cf} が0.05～0.15%と比較的小さい場合

1) 载荷の初期ではコンクリートの軸方向応力度とCFSの周方向ひずみはほぼ比例して増加する。コンクリートが最大圧縮応力度に達する付近から、CFSの周方向ひずみは急速に大きくなり、初期勾配から2次勾配に変化し始める。初期勾配から2次勾配に変化し始める時のCFSの周方向ひずみを図-4に示すように ε_{cfti} と定義し、これを求めると表-4のようになる。 ε_{cfti} は、軸方向応力度と軸方向ひずみの関係の変曲点をグラフ上で肉眼で求めたものである。これは、最大圧縮応力度に達するところからコンクリートの破壊が始まり、急速に周方向に膨張し始めたことを表している。なお、表-4には後述する ε_{cfc} 、 ε_{cft} 、 ε_{cfu} の値も示している。

2) 図-4に示したコンクリートの軸応力度が最大となる時のCFSの周方向ひずみ ε_{cfc} を求めると表-4のようになる。これによれば、ばらつきはあるが、いずれの試験体も $\varepsilon_{cfc}=1,100\sim 2,500\mu$ 程度である。CFSの弾性係数は表-2から $2.43\times 10^4\text{N/mm}^2$ であり、この程度のひずみでは、CFSには $250\sim 550\text{N/mm}^2$ 程度の応力度しか生じていない。したがって、この段階ではCFSの最大引張力の1/10程度の横拘束力(引張力)しか生じていないことになる。

3) 図-4に示したCFSの破断ひずみ ε_{cfu} は、公称 $15,000\mu$ 程度といわれているが、本実験では表-4に示す通りであり、CFSの破断ひずみは $9,300\sim 13,500\mu$ 程度であった。公称値の2/3程度で破断した例もあるが、これはCFSのひずみが周方向に必ずしも一様でなく、ひずみゲージが破断箇所のひずみを計測しているとは限らないことによると考えられる。このようにCFSの破断時に生じる周方向ひずみにばらつきがあることを考慮すると、耐震補強設計でCFSの終局ひずみを評価する際には、公称ひずみではなく、これにある程度の安全率を見込んだひずみを考慮する必要があると考えられる。

b) ρ_{cf} が1.336%と大きい場合

1) C-6(円形断面)およびS-6(正方形断面)のように ρ_{cf} が大きい場合には、図-2に示したように軸方向ひずみが増加してもコンクリートの軸方向応力度の2次勾配E_gはマイナスとはならない。初期勾配から2次勾配に変化し終える時のCFSの周方向ひずみ ε_{cft} を図-4のように定義すると、表-4のようになる。これによれば、 ε_{cft} は $1,930\mu$ (C-6)、 $1,810\mu$ (S-6)であった。この値は ρ_{cf} が0.05～0.15%と比較的小さい場合に、コンクリートの軸方向応力度が最大となるときにCFSに生じる周方向ひずみとほぼ同程度である。また、前述した無補強試験体が急速に膨張し始め

表-4 各状態におけるCFSの周方向ひずみ

No.	断面形状	ρ_{cf} (%)	CFSの周方向ひずみ(μ)				ひずみ測定位置
			ε_{cfti}	ε_{cfc}	ε_{cft}	ε_{cfu}	
C-3	円形	0.056	260	1,750	—	12,800	W面中央部
C-4		0.111	290	2,420	—	12,510	E面上部
C-5		0.167	730	2,540	—	11,480	E面上部
C-6		1.336	—	—	1,930	13,960	S面下部
S-3	正方形	0.056	640	2,190	—	13,440	E面上部
S-4		0.111	180	1,140	—	12,790	E面中央部
S-5		0.167	390	1,600	—	10,700	W面中央部
S-6		1.336	—	—	1,810	9,300	W面中央部

る時のひずみ(1,000～2,000 μ)ともほぼ同じである。したがって、コンクリートの周方向ひずみがこの程度の値に達するとコンクリートは破壊し始めるが、 ρ_{cf} が0.05～0.15%と小さければ、このときにコンクリートの軸方向応力度は最大値 f_{cc} に達するのに対して、 ρ_{cf} が1.336%と大きければ、その後もなおコンクリートの軸方向応力度は上昇し続けることを示している。

2) 終局時のCFSの周方向ひずみ ε_{cfu} (CFSの破断ひずみ)をまとめると表-4のとおりであり、 ε_{cfu} は $13,960\mu$ (C-6)、 $9,300\mu$ (S-6)である。これは ρ_{cf} が0.05～0.15%の場合とほぼ同じである。

6. 帯鉄筋との比較からみたCFSによる横拘束効果の特徴

以上より、CFSで拘束した場合には、 ρ_{cf} が0.05～0.15%程度であれば、コンクリートの軸方向応力度の上昇域における拘束効果は小さく、軸方向応力度の下降域(2次勾配域)になって初めて拘束効果が発揮されることが明らかとなった。

前述したようにコンクリートの圧縮応力度が最大となる時には、CFSに生じる周方向のひずみ ε_{cfc} は $1,100\sim 2,500\mu$ 程度にしか達していない。CFSの破断時のひずみ ε_{cfu} は約 $15,000\mu$ であるから、この程度の ε_{cfc} では、CFSには $250\sim 550\text{N/mm}^2$ 程度の周方向の応力度しか生じていない。すなわち、CFSが最大発揮できる1/10程度の拘束力しか生じていない。

帯鉄筋は $1,800\mu$ 程度で降伏するため、帯鉄筋で拘束した場合には、コンクリートの周方向ひずみがほぼ同じ値に達したときにコンクリートの破壊と帯鉄筋の降伏が生じるのに対して、CFSで横拘束した場合には、CFSが破断ひずみに達する前にコンクリートが破壊し始める点が帯鉄筋で拘束した場合とは異なっている。

CFSで補強する場合には、CFSの引張強度は $3,500\sim 4,500\text{N/mm}^2$ で帯鉄筋の降伏強度の約10倍であるため、CFSの断面積を帯鉄筋の1/10程度とすることがある。つまり、CFSで補強する場合の $f_{cf}\times\rho_{cf}$ が、帯鉄筋で補強する場合の $f_{yh}\times\rho_s$ (f_{yh} :帯鉄筋の降伏強度、 ρ_s :帯鉄筋の体積比)に等しくなるように ρ_{cf} を設定するわけである。しかし、このようにCFSの断面

積を帯鉄筋の断面積の1/10とすれば、帯鉄筋に比べてCFSの方が横拘束に対する引張剛性が小さく、同じ変形量ではCFSによる拘束力は帯鉄筋の1/10程度しか生じない。したがって、コンクリートの応力上昇域ではCFSによる拘束効果は現れず、コンクリートが最大応力度に達し、破壊が始まってCFSによる拘束力が増加した段階で、拘束効果が次第に現れてくる。断面形状の影響については応力上昇域では拘束力が小さいため形状による拘束効果の差が現れにくい、最大応力後は拘束力が大きくなっていくため、形状による効果の差が現れ始めたものと考えられる。

7. 結論

CFSによる横拘束効果を把握するために、CFSで補強した直径または辺長が200mmで高さ600mmの円形試験体および正方形試験体を用いた一軸圧縮試験を行い、カーボンファイバー比が増加した場合のコンクリート柱の軸方向応力度～軸方向ひずみの関係を求めた。ここで得られた結論は以下のとおりである。

(1) 無補強試験体に軸圧縮応力度を作用させると、コンクリートの周方向ひずみが1,000～2,000 μ 程度に達すると、コンクリートに圧壊が進展して、急速に体積膨張が生じる。

(2) ここで検討対象とした ρ_{cf} が0.05～1.336%の範囲では、拘束コンクリートの初期剛性はほぼ $2.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ であり、これは ρ_{cf} や試験体の断面形状によらない。また、いずれの試験体もCFSが破断し、コンクリートの軸方向耐力は急速に低下して終局状態に至った。

(3) ρ_{cf} が0.05～0.15%程度と比較的小さい場合には、CFSによるコンクリートの横拘束効果の特徴は、以下の通りである。

a) この範囲で ρ_{cf} が増加しても、コンクリートの最大圧縮応力度は37～41 N/mm^2 でありあまり変化しない。また、この値は無補強試験体の場合と比較してもあまり増加していない。

b) この範囲で ρ_{cf} が増加しても、コンクリートが最大圧縮応力度に達する時の軸方向ひずみは3,000～3,500 μ でありあまり変化しない。なお、 f_{cc} および ε_{cc} に達する時のコンクリートの周方向ひずみは、1,000～2,000 μ である。これらの値は無補強試験体と比較してもあまり変わらない。

c) この範囲で ρ_{cf} が増加すると、コンクリートの最大圧縮応力度に達した後の下降勾配(2次勾配)は緩やかになり、終局ひずみを増大させる効果がある。

(4) ρ_{cf} が1.336%の場合には、CFSによるコンクリートの横拘束効果の特徴は、以下の通りである。

a) 無補強供試体や ρ_{cf} が0.05～0.15%の拘束コンクリートのように、3,000～3,500 μ の軸方向ひずみでコンクリートが最大圧縮応力度に達し、その後、下降域に

入っていくのではなく、コンクリートの軸方向応力度は軸方向ひずみの増加とともに単調に増加し続ける。

b) コンクリートの軸方向ひずみが3,000 μ 付近、周方向ひずみが1,000～2,000 μ 付近に達すると、コンクリートの軸方向ひずみの増加にともなう軸方向応力度の2次勾配は緩くなるが、CFSが破断して終局状態になるまで、一次直線的にコンクリートの応力度は上昇し続ける。ただし、円形断面に比較すると正方形断面の場合にはその2次勾配は小さい。

(5) CFSの引張強度が帯鉄筋の引張強度の10倍程度あることから、CFSの断面積を帯鉄筋の1/10程度にしてコンクリートを横拘束しても、横拘束に対するCFSの引張剛性は帯鉄筋の1/10程度しかなく、CFSの拘束がきき始める前にコンクリートが破壊し始めることから、有効な横拘束効果を得ることはできない。

謝 辞

本研究に際しては、炭素繊維補修・補強工法技術研究会幹事長植村政彦氏より実験の推進にあたって数々の御援助を得ました。また、(財)土木研究センター「炭素繊維を用いた耐震補強法研究会」において、横浜国立大学池田尚治教授、東京大学前川教授をはじめとする委員の各位から、大変有益な御意見を賜りました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 宇治公隆、横田和直、池田尚治：シート状炭素繊維による既設構造物の耐荷性能向上機構、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp.695-700、1992。
- 2) 藤原博、東田典雅、大野了、岡島豊行：炭素繊維によるRC橋脚の耐震補強効果について(その1 載荷実験)、土木学会第46回年次学術講演会、V-377、pp.770-771、1991.9。
- 3) 細谷学、川島一彦、星隈順一、宇治公隆：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) 細谷学、川島一彦、星隈順一：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、東京工業大学地震工学研究グループ、TIT/EERG96-2、1996.8。
- 5) 星隈順一、川島一彦、長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係、土木学会論文集、No.520/V-28、pp.1-11、1995.8。

(1996年9月6日受付)