

# 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2)\*

— 矩形断面柱の補強に関する実験 —

勝俣 英 雄      小 島 克 朗  
武 田 寿 一

## A Study on Strengthening with Carbon Fiber for Earthquake-Resistant Capacity of Existing Reinforced Concrete Columns (Part 2)

— Tests on Strengthening Square-Sectioned Columns —

Hideo Katsumata      Yoshiro Kobatake  
Toshikazu Takeda

### Abstract

For improvement of the earthquake-resistant capacity of existing reinforced concrete columns, the authors have developed the CF (Carbon Fiber) Winding Method, in which high-strength CF is wound on the surfaces of existing columns as additional spiral hoops.

Ten square-sectioned columns were tested in this study. The results revealed that (1) the CF Winding Method may be use for increasing earthquake-resistant capacity of square-sectioned columns as for circular-sectioned columns, (2) earthquake-resistant capacity increases in proportion to quantity of CF hoop, (3) treatment of the concrete surface is not essential, and (4) the quantity of CF hoop can be converted roughly into the equivalent of steel hoop.

### 概 要

鉄筋コンクリート造の既存柱の耐震補強工法として、高強度炭素繊維を柱コンクリート表面に巻付けてスパイラルフープを増設する工法を開発研究してきた。ここでは、矩形断面の柱に炭素繊維を巻付ける場合について、炭素繊維量・下地処理の有無・帯筋量などを変数とした実験を行なって構造性能を比較検討した。その結果、矩形断面でも炭素繊維を巻付けることによって、円形断面と同様、耐震性能が向上すること、炭素繊維量と耐震性能の関係、特別な下地処理を必要としないこと、炭素繊維量を帯筋量に換算できること、などが明らかになった。

### 1. はじめに

1968年の十勝沖地震を契機として建築基準法の耐震規定の見直しが始まり、1982年に改訂され、従来にも増して高い耐震性が要求されるようになった。増改築の際、旧基準で設計された建物に対しても現行規定が適用されるので、耐震補強が必要となる例もでてきた。一方、土木建築分野においても新素材、特に高強度炭素繊維(図-1参照)の活用が検討され始めてきた。

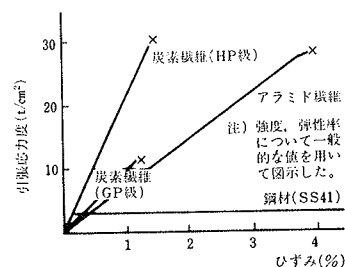


図-1 各種素材の力学的性質の比較

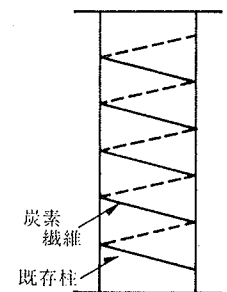


図-2 炭素繊維の巻付け工法

\* 改題：新素材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1) に続く

筆者らは、この二つを考慮し、耐震性能が劣る円形柱に炭素繊維を巻付ける耐震補強工法(図-2)を開発し、

前報<sup>1)</sup>で報告した。本報では、矩形断面柱に同耐震補強工法を適用した実験結果を述べる。

## 2. 実験概要

### 2.1. 主な検討項目

以下に示す因子が、①破壊モード、②最大耐力、③終局変位、④エネルギー消費量、などに及ぼす影響を主な検討項目とした。

**2.1.1. 断面形状** 矩形断面では隅角部において炭素繊維に応力集中が生じて容易に破断する恐れがあり、円形断面に対する場合よりも巻付け補強効果が低下することが考えられるので、断面形状の影響を検討した。

**2.1.2. 炭素繊維の量** 炭素繊維の巻付け量が多いほど耐震補強効果が上がることは前報<sup>1)</sup>でも示したが、ここではより詳細に検討する。

**2.1.3. 下地処理** 炭素繊維はぜい性材であるので、応力集中がないようにコンクリートと炭素繊維を縁切りする下地処理が考えられる。一方、矩形断面では隅角部のみ炭素繊維とコンクリートが接し、各辺の中間部では接しないことが考えられ、下地処理なしでも縁切り処理と同様な効果が得られると予想できる。そこで、下地処理として次の二つを検討した。

① コンクリート表面を縁切り材で被覆し、その上から炭素繊維を巻付けた (アンボンド)。

② コンクリートの上に、直接、下地処理無しに、炭素繊維を巻付けた (直巻き)。

**2.1.4. 横補強筋** 帯筋と巻付けた炭素繊維は横補強筋 (せん断補強および主筋とコンクリートを拘束する鉄筋) として働くのであるが、両者は以下の点が異なる。

① 材料の強度と剛性: 帯筋は鋼材であり、強度を炭素繊維と等しくすれば、剛性が炭素繊維より高くなる。

② 拘束部分: 帯筋は主筋によって囲まれたコンクリートおよび主筋を拘束する。巻付けた炭素繊維はかぶり部分を含めた断面全体のコンクリートを拘束するが、主筋を直接拘束してはいない。

ここでは、炭素繊維を巻付けずに帯筋量だけを増やし、「荒川式」<sup>2)</sup>によるせん断耐力が炭素繊維を巻付けたものと同等になる試験体を用意し、帯筋と巻付け炭素繊維の効果を比較した。なお、炭素繊維量と帯筋量は下式によって、互いに換算できると考えた。

$$P_w \cdot \sigma_{wy} = P_f \cdot \sigma_f \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $P_w$ ; 帯筋比、 $P_f$ ; 巻付け繊維比、 $\sigma_{wy}$ ; 帯筋の降伏点、 $\sigma_f$ ; 炭素繊維の有効強度で、引張強度の2/3。

### 2.2. 試験体

試験体は実物の約1/4、計10体で、その一覧を表-1に示す。試験体名の数字が炭素繊維量を示すが、末尾に

試験体名	目的	帯筋比 $P_w$ (%)	巻付け繊維比 $P_f$ (%) <sup>*</sup>	下地処理
SS00	ベース	0.107	—	—
SS45S	CFと鉄筋の比較	0.46	0.068 <sup>**</sup>	—
SS90S		0.93	0.15 <sup>**</sup>	—
SS06	円との比較	0.107	0.06	アンボンド
SS12			0.12	
SS06N	下地処理の比較	0.107	0.06	直巻き
SS12BC			0.12	コーナー部ボンド
SS09N	CF量の比較	0.107	0.09	直巻き
SS03N			0.03	
SS12EN			端部0.12 中央0.06	

表-1 試験体一覧

$P_f = \frac{af}{b \cdot x}$   
 $af$ : 1組の巻付け繊維断面積  
 $b$ : 柱幅  
 $x$ : 巻付けピッチ  
 増設した横補強筋量の指標となる  
<sup>\*\*</sup> 帯筋量のSS00からの増分を強度の違いを考慮して式1)によって  $P_f$  に換算した値。

コンクリート 圧縮強度 (耐圧強度)	鉄筋 降伏点 (引張強度)			炭素繊維 <sup>*</sup> 引張強度
	D13	6φ	3.2φ	
279 (24.3)	4.190 (6.110)	3.580 (4.790)	3.280 (4.180)	29.300

単位: kgf/cm<sup>2</sup> \* 断面積が0.23cm<sup>2</sup>

表-2 材料強度

Sがある場合は帯筋量を示す。SS-12ENは、中央部の炭素繊維量を端部 (危険断面からDの部分、ここにDは柱の全せい) の半分とした。末尾に文字がないものはアンボンド処理、末尾にNがあれば直巻きを示す。なお、SS12BCは柱の隅角部がボンド処理<sup>1)</sup> (炭素繊維とコンクリートとを完全に接着する方法) で、中間部が直巻きである。

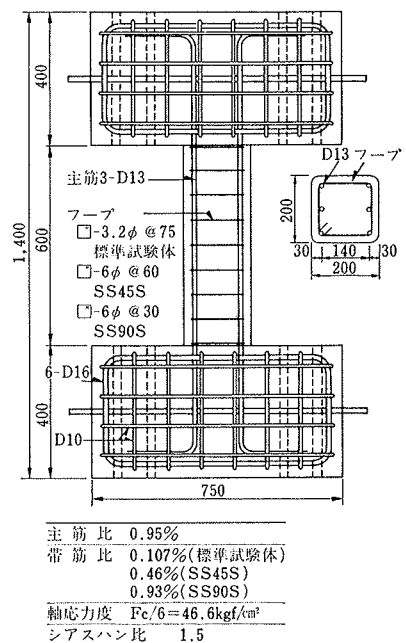


図-3 試験体配筋

試験体の鉄筋コンクリート部分の配筋・形状・寸法を図-3に示す。SS45SとSS90Sで帯筋量を増やしたほかは、すべて同一である。四隅は角を落としてR (半径30mm) をつけた。耐震性能が劣る柱を対象とするので、無補強 (SS00) では破壊モードが耐震性能が劣る「せん断」になるように主筋量・帯筋量・軸力を調整した。

使用した材料の性質を表-2に示す。コンクリート強度が前報より、かなり高かった。なお、炭素繊維はレジンによって一体化して使用した。

加力および測定方法は、前報<sup>1)</sup>と全く同一である。

### 3. 実験結果

実験結果の一覧を表一3に示す。水平荷重—水平変位関係に実験終了時のコンクリートのひび割れ状況と炭素繊維の残存状況を加えたものを図一4に示す。パラメーターごとに整理して説明する。

#### 3.1. 破壊経過

3.1.1. 炭素繊維（横補強筋）の量 無補強のSS00は、部材角1/150で大きなせん断ひび割れが生じるとともに急激に耐力低下してせん断破壊した。

ある程度の補強をすると（SS45S, SS03N），主筋に沿う付着ひび割れが進展し，部材角1/50以降，付着ひび割れに沿って圧壊が生じて耐力低下が顕著となり付着破壊した。主筋は曲げ降伏しなかった。

十分に補強すると（上記以外の試験体），部材角1/80程度で曲げ降伏し，部材角1/50でコンクリートの圧壊が危険断面で始まって最大耐力に達した。ただし，炭素繊維補強では，炭素繊維が最終段階においては破断し，SS12を除いて，同時に耐力を失なった。なお，付着ひび割れがすべての試験体で見られた。

3.1.2. 下地処理 直巻きのもの（末尾がNまたはBC）は，炭素繊維とコンクリートがレジンによって付着していたのであるが，部材角1/100でその付着が切れる音がした。アンボンド（SS06, SS12）ではその種の音は発生しなかった。

3.1.3. 横補強筋 かぶりコンクリートの剥落が帯筋のみ（SS00, SS45S, SS90S）では徐々に生じたが，炭素繊維補強では炭素繊維が破断するまで全く生じなかった。

3.1.4. 断面形状 円形断面柱の実験でも，材料強度が大きく異なるが，破壊モードが炭素繊維の巻付けによって付着から曲げに変わることを確認しており<sup>1)</sup>，矩形断面でも同様であることがわかった。

#### 3.2. 最大耐力の検討

最大耐力とSS00に対する横補強筋増設量との関係を図一5に示す。増設量は炭素繊維の巻付け繊維比に換算して示した（表一1参照）。図中，破線は「RC規準」<sup>3)</sup>の略算式で計算した曲げ耐力，実線は「荒川式」<sup>2)</sup>で計算したせん断耐力である。なお，断面形状の比較は，材料強度の差が大きいため，省いた。

3.2.1. 炭素繊維量 炭素繊維量が多い（巻付け繊維比0.09%以上のものとSS06N）と，せん断耐力が増加して最大耐力が曲げ耐力で決まった。どの試験体でも最大耐力実験値はせん断耐力計算値より高かった。しかし，炭素繊維量の増加に伴うせん断耐力の増分は実験と計算で比較的，対応していた。

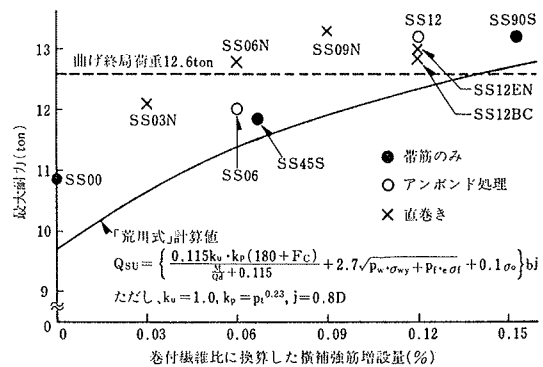
3.2.2. 下地処理 炭素繊維量が少ない場合（SS06,

試験体名	最大耐力 (ton)	強度比	終局変位 (mm)	炭素繊維の最大ひずみ (10 <sup>-6</sup> )	破壊モード	炭素繊維の破断
SS 00	10.9	1.00	4 ㊸	-	せん断	-
SS 45S	11.8	1.08	12 ㊸	-	付着	-
SS 90S	13.2	1.21	42 ㊸	-	曲げ	-
SS 06	12.0	1.10	24 ㊸	13,268	付着+CF破断	あり
SS 12	13.2	1.21	50 <	10,028	曲げ	あり
SS 06N	12.8	1.17	26 ㊸	9,866	曲げ降伏後のCF破断	あり
SS 12BC	12.9	1.18	46 ㊸	10,065	曲げ圧壊後のCF破断	あり
SS 09N	13.3	1.22	24 ㊸	11,066	曲げ降伏後のCF破断	あり
SS 03N	12.1	1.11	15 ㊸	10,135	付着+CF破断	あり
SS 12EN	13.0	1.19	36 ㊸	9,530	曲げ圧壊後のCF破断	あり
CS 00	8.0	1.00	12 ㊸	-	付着	-
CS 06	10.3	1.29	24 ㊸	9,996	付着	あり
CS 12	11.6	1.45	50 <	8,982	曲げ	なし

㊸ 終局変位  
 ㊸ 荷重が最大荷重の80%に低下した変位  
 ㊸ 炭素繊維が破断し、荷重が急激に低下し始める変位

試験体	帯筋比 (%)	巻付け繊維比 (%)	下地処理
CS00	-	-	-
CS06	0.107	0.06	アンボンド
CS12	-	0.12	

表一3 実験結果一覧



図一5 最大耐力の比較

SS06N)は直巻きの方がアンボンドのものより最大耐力が高かったが，炭素繊維量が多い場合（SS12, SS12EN, SS12BC）は両者の差が少なかった。直巻きでは小変形時，コンクリートと炭素繊維が付着しているため，コンクリートが受ける拘束が高いからであると思われる。

3.2.3. 横補強筋 式(1)によって換算した補強量が同等であるものを比較すると，補強量が少ない場合（SS45S, SS06N）は炭素繊維の方がやや最大耐力が高かったが，補強量が多い場合（SS90S, SS12BC）は差が少なかった。

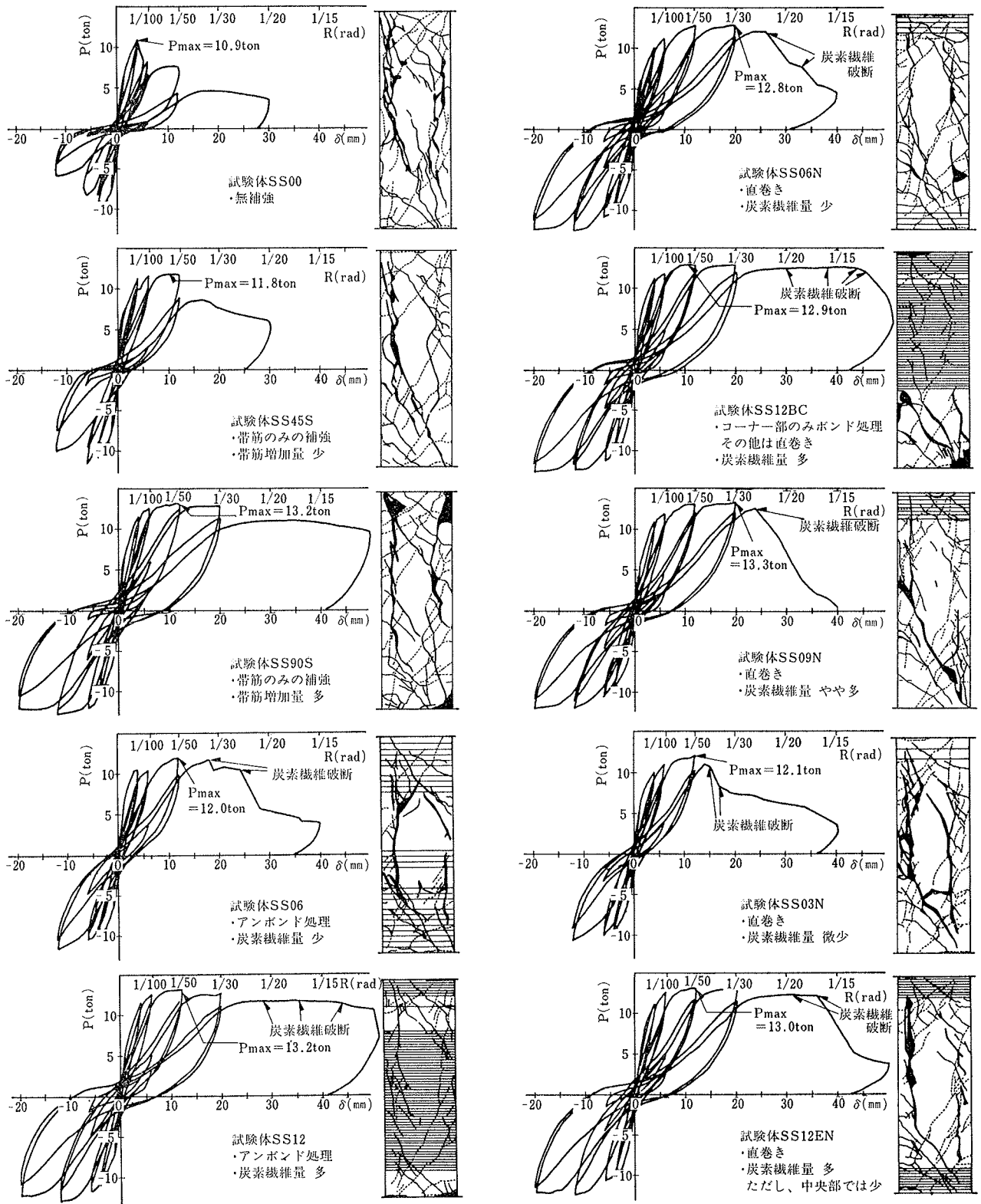
#### 3.3. 終局変位の検討

終局変位（定義は表一3参照）と横補強筋増設量（表示は図一5と同様）との関係を図一6に示す。

3.3.1. 炭素繊維量 炭素繊維量に応じてほぼ直線的に終局変位が増加した。

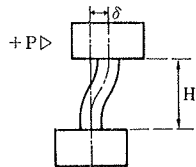
3.3.2. 下地処理 アンボンドのもの（SS06, SS12）は炭素繊維量と同じ直巻きのもの（末尾がNまたはBC）との終局変位の差が比較的，少なかった。

3.3.3. 横補強筋 帯筋を増やした場合（SS45S,



凡例 ・荷重水平変位関係

P : 荷重  
 $\delta$  : 水平変位  
 R : 部材角  
 H : 柱内法高さ



・ひび割れ図

- (1) — 正加力時発生ひび割れ
- 負加力時発生ひび割れ

(2) 水平直線は実験終了時まで残存していた炭素繊維を示す。

図—4 水平荷重と水平変位の関係および実験終了時の損傷状況

SS90S)でも、それと強度が同等な炭素繊維補強のもの(SS06N, SS06, SS12BC, SS12)より終局変位が小さかった。炭素繊維がかぶりコンクリートをも拘束するからであると思われる。

3.3.4. 断面形状 材料強度に差があるのであるが、円形でも矩形でも炭素繊維量が十分(CS12, SS12)であれば、終局変位が部材角で1/12以上となった。

3.4. エネルギー消費量の検討

部材角1/50および1/30での繰り返しにおける履歴エネルギー消費量と横補強筋増設量(表示は図-5と同様)との関係を図-7に示す。エネルギーには強度の影響が入り込むので、断面形状の比較は省いた。

3.4.1. 炭素繊維量 炭素繊維量に応じて直線的にエネルギー消費量が増加した。

3.4.2. 下地処理 アンボンドのもの(SS06, SS12)は炭素繊維量が同じ直巻きのもの(末尾がNまたはBC)とエネルギー消費量の差が少なかった。

3.4.3. 横補強筋 補強量が少ない場合(SS45S, SS06, SS06N)は帯筋補強の方がエネルギー消費量が少なかった。強度が十分には確保されない場合、帯筋のみの補強ではかぶりコンクリートが拘束されず、コンクリートの破壊が進行するためであると思われる。

3.5. 炭素繊維のひずみと下地処理

柱高さ中央でのせい方向の平均ひずみと炭素繊維のひずみとの関係をSS06とSS06Nについて図-8に示し、下地処理の差違を検討する。SS06はコンクリートと炭素繊維を縁切りしたため、直線的な関係が得られた。SS06Nは載荷初期、コンクリートと炭素繊維が付着しているので、炭素繊維のひずみは測定点近傍にひび割れが生じるまで小さく、直後に急増し、その後は同じ平均ひずみに対して徐々に減少する、という履歴が得られた。

4. まとめ

以上の実験結果は次のようにまとめられる。

(1) 炭素繊維を巻付けた柱は補強しない柱と比較して、破壊モードが曲げに変わり、強度およびじん性能(終局変位およびエネルギー消費量)が改善され、炭素繊維の巻付けが円形断面と同様に矩形断面でも耐震補強効果を十分に持つことを確認した。

(2) 炭素繊維量の増加に伴い、終局変位およびエネルギー消費量はほぼ直線的に増加した。終局変位は巻付け繊維比0.12%のとき、無補強の4倍以上となった。

(3) 炭素繊維とコンクリートとを接着しない処理法と、炭素繊維をコンクリートに直接巻付けた場合を比較すると、耐震性能に顕著な差はなく、工程を省略できる後者が有利である。

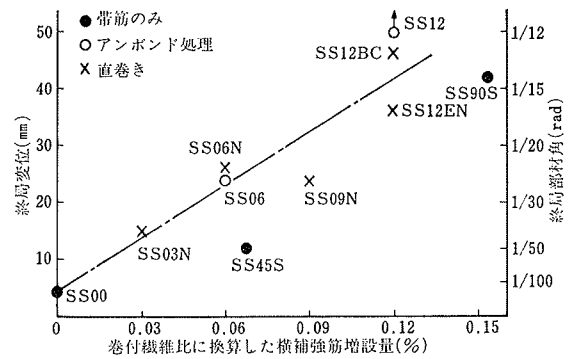


図-6 終局変位の比較

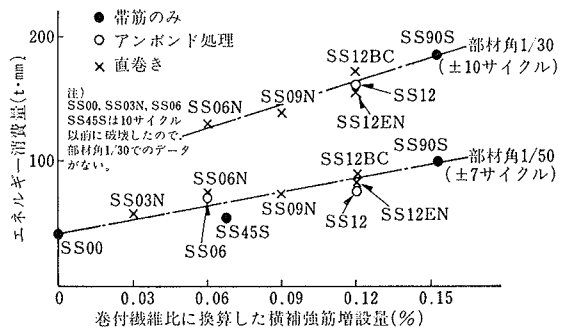


図-7 エネルギー消費量の比較

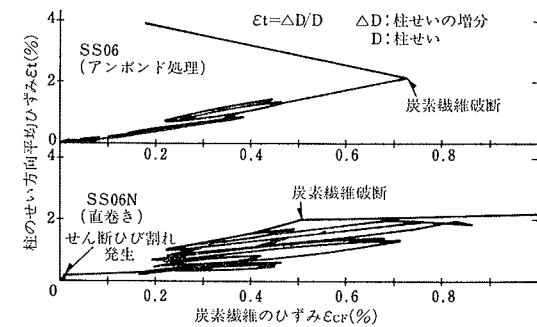


図-8 炭素繊維のひずみ

(4) 炭素繊維量を有効な強度比によって帯筋量に換算すると、炭素繊維補強柱の耐震性能は帯筋のみの通常の鉄筋コンクリート柱と、大略、対応がとれる。

謝 辞

この研究は三菱化成工業(株)との共同研究である。炭素繊維およびレジン提供を受け、同総合研究所 田中常雄氏、安藤達夫氏、谷木謙介氏の助言と協力を得た。

参考文献

- 1) 勝俣, 小島, 武田: 新素材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1), 大林組技術研究所報, No. 33, (1986), pp. 67~71
- 2) 広沢, 後藤: 鉄筋コンクリート部材の強度と靱性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1971), pp. 817~818
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, (1982)