

# 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）

——炭素繊維による円形断面柱の補強実験——

勝 俣 英 雄      小 畠 克 朗  
武 田 寿 一

## A Study on the Strengthening by a “New Material” for Earthquake-Resistant Capacity of Existing Reinforced Concrete Columns (Part 1)

——Tests on Cylindrical Columns Reinforced with Carbon Fibers——

Hideo Katsumata      Yoshiro Kobatake  
Toshikazu Takeda

### Abstract

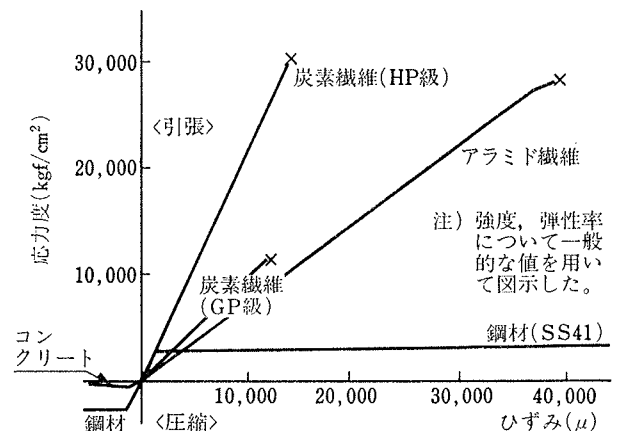
Recently, “New Materials,” especially, carbon fiber (CF), have been developed for use in civil engineering and building construction. Meanwhile, not a few existing reinforced concrete buildings need strengthening to increase their earthquake-resistant capacities in some cases by a column-reinforcing method. In this study the authors attempt to provide solutions for the above two needs, and present a new strengthening method, i.e., spirally winding single endless CF strand on the surface of an existing column. Some tests of cylindrical columns reveal that this strengthening method is applicable for improvement of the earthquake-resistant capabilities of existing columns.

### 概 要

最近、土木建築分野においても、新素材、特に炭素繊維の用途開発が検討されるようになった。一方、既存鉄筋コンクリート構造物の耐震補強が設計基準の改訂や増改築に伴って必要になり、柱補強工法が採用される場合も多い。この研究はこの両者に対し解答を与えようと企画された。柱補強の新工法として、長繊維高強度の炭素繊維をスパイラル状に既存柱表面に巻付けることを考案し、今回は円形断面の柱の実験を行なった。その結果、この新工法によって耐震性能が十分に改善されることが明らかになった。

### 1. 序

最近、各種の「新素材」の研究がさまざまな業種で進められ、土木建築分野においてもその用途開発に真剣に取り組むべき状況にある。これら新素材は、耐久性や耐熱性に富んでいたりと、力学的性質（強度・弾性率）が優れていたりする。ここでは構造体としての用途開発的を絞ることにする。土木建築分野で使われてきた素材（鋼材およびコンクリート）と「新素材」の応力—ひずみ関係を比較して図—1に示す。まず「新素材」はコンクリートと比べ、強度とひずみの桁が全く異なることがわかる。特に、HP級（高性能型）の炭素繊維は鋼材と比較すると、弾性率がほぼ同等、強度は約10倍であり、構造材として優れた性質をもっていることが理解できる。



図—1 各種素材の力学的性質の比較

一方、既存の建物のなかには耐震補強が必要な場合がある。それは、次の二つが考えられる。

- (1) 旧建築基準法や設計規準・指針によって建てられたため、設計上、もともとの耐震性能が低い場合
- (2) 建物の増改築に際して構造部材を、一部、撤去したり、建物階数を増やす場合

耐震補強工事は、耐震性能を満足させるだけでなく、既存部分の活用も要求されるため、適切な工法の採用が必要になる。

そこで、この研究は上記二つのニーズに対して解答を与えるべく企画されたもので、新素材を用いた耐震補強工法の開発を試みた。

## 2. 耐震補強工法の開発

### 2.1. 耐震補強の設計の考え方と既往の工法

耐震補強設計の考え方を簡単に説明する<sup>1),2)</sup>。そもそも、建物の耐震性能は強度とじん性能（変形能力）の一種の“積”としたエネルギー消費能力として考えることができる（図-2）。したがって、耐震補強効果を上げるにはエネルギー消費性能を増せばよいことになり、大きく分けると、①強度を高める（強度指向型）、または②じん性を改善する（じん性指向型）、の二つの方向が考えられる。

鉄筋コンクリート建物の既往の補強工法<sup>3)</sup>を、大きく分類して表-1に示す。補強工法の選択は、耐震性能・意匠・工期・工費などの要因に左右される。建物機能を重視すると、オープンスペースが確保できる柱補強工法を採用せざるを得ない場合もある。

### 2.2. 新しい耐震補強工法

この研究では、新しい耐震補強工法の一つとして、補強材を鉄筋コンクリート柱の表面にスパイラル状に巻付ける方法を開発考案した（写真-1）。この補強工法は補強材に鉄筋コンクリート柱のスパイラルフープとしての機能を持たせることを目的とし、柱の強度の増加とじん性能の向上という二つの効果が期待できる。

この工法の補強材として望ましい性質を以下に述べる。

- (a) 力学的性質：強度と弾性率が高いこと  
（スパイラルフープの効果を高めるため）
- (b) 施工性：①長いこと  
（スパイラル状に巻くため）  
②しなやかであること  
（コンクリート表面に巻付けるため）

これらを満足するものとして、HP級炭素繊維の長繊維（エンドレスタイプ）が考えられる。これを用いた場合、メリットとして、①腐食の心配がない、②軽量である、

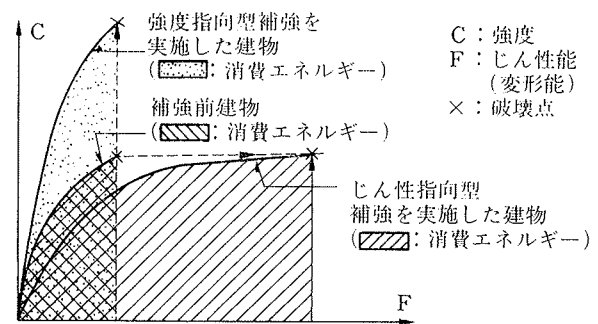


図-2 建物の強度とじん性能（変形能）の関係と耐震補強設計

種類	壁の増設	柱の補強
概要	柱・梁による架構の中に壁を増設して、建物強度を高める。	柱の周囲を鉄板や鉄筋で補強して柱の強度と粘り強さを増加させる。
立面図		
平面図		
耐震性能の向上方向	強度指向型	じん性指向型
重量増	大	小
意匠上の問題	採光・通風が悪くなる。 部屋を区切る。狭苦しい。	大空間が維持できる。 必要な場所 （ホテルのロビー 銀行のカウンター 駅のコンコース）

表-1 既往の耐震補強工法

などがあり、一方、デメリットのカバーも可能である。例えば、以下のようなものである。

(1) ぜい性的性質：スパイラルフープは塑性変形を期待しないので、ぜい性材を用いることも可能である。

(2) 耐火性：コンクリートの熱容量が大きいので、比較的軽便な耐火被覆で耐火性が満足される。

そこで、この研究では炭素繊維を巻付ける工法を検討する。

ところで、炭素繊維にはコンクリートにせん断ひび割れが生じた後の引張補強の効果が期待されている。炭素繊維とコンクリートの付着が良い場合は、ひび割れ近傍の炭素繊維のみにひび割れが集中する。炭素繊維はぜい性材料であるので、ひび割れの集中は不利である。したがっ

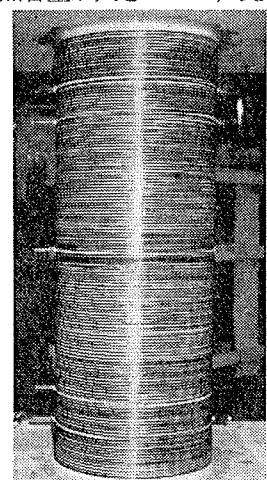


写真-1 新しい補強工法

て、コンクリートと炭素繊維との付着の有無によって耐震補強効果が変化すると予想される。そこで、次に示す下地処理法を考えた (図-3)。

- (1) 付着を良好にする処理 (ボンド): コンクリート面と炭素繊維とをプライマーによって接着する。
- (2) 付着を切る処理 (アンボンド): コンクリートと炭素繊維の間に縁切り材を挿入する。

### 3. 実験概要

#### 3.1. 試験体

この工法の耐震補強工法を実験的に確認するために、実物の1/4、計5体の試験体を計画した (表-2)。パラメータは次の二つとした。

- (1) 炭素繊維の補強量 (なし, 少, 多)  
(ただし、同一の炭素繊維を用い、巻付けピッチの増減によって補強量を変えている。)
- (2) 炭素繊維の下地処理法

なお、試験体名の数字が炭素繊維の補強量 (巻付け繊維比) を示し、00が無補強, 06が補強量少, 12が補強量多, である。また試験体名の最後にBがあればボンド処理, なければアンボンド処理であることを示す。

試験体の鉄筋コンクリート部分は5体とも同一とした。その配筋・形状・寸法を図-4に示す。既存の矩形断面を円形に整形することを想定し、コンクリートは円形とし、主筋は矩形上に配した。また、耐震性能が劣る柱を補強する場合を考え、無補強の試験体は耐震性能が悪いせん断破壊が生じるように設計した。

炭素繊維の巻付けは、下地処理を施した後、張力をかけながら行なった。

#### 3.2. 使用材料

この実験で使用した炭素繊維は、繊維を6,000本束ねてストランドとした長繊維である。また、この実験ではレジンによってストランド状の炭素繊維を一体化させ、強度発現上、不利にならないようにした。

使用した材料の強度を表-3に示す。

試験体名	炭素繊維量 (巻付け繊維比)	炭素繊維の 処 理
C S - 00	なし	—
C S - 06	少 (0.06%)	アンボンド
C S - 06B	少 (0.06%)	ボ ン ド
C S - 12	多 (0.12%)	アンボンド
C S - 12B	多 (0.12%)	ボ ン ド

$$\text{巻付け繊維比 } P_f = \frac{af}{b \cdot x}$$

af: 1組の繊維断面積  
b: 柱幅(等断面積の正方形の一辺の長さ)  
x: 巻付けピッチ

表-2 試験体一覧

コン ク リ ー ト	圧 縮 強 度		
	199		
鉄 筋	降伏強度	引張強度	
	D 13	3,720	5,310
	3.2φ	3,370	4,340
炭 素 繊 維	引張強度		
	31,400		

単位 kg/cm<sup>2</sup>

表-3 材料強度

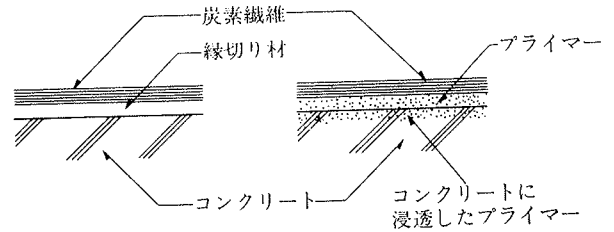
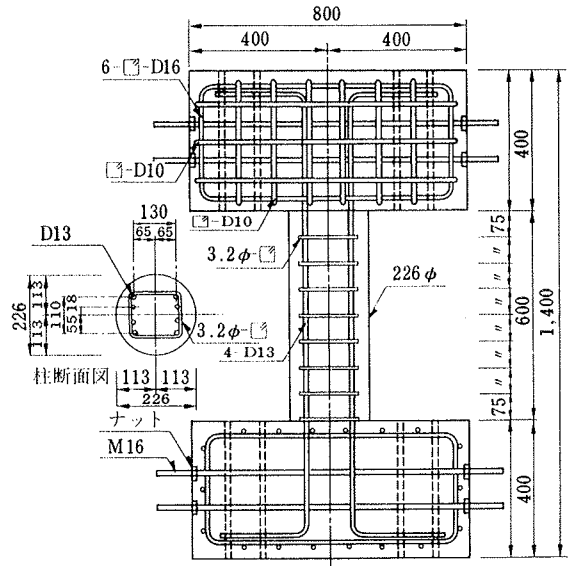


図-3 炭素繊維の巻付け下地処理



柱の諸元		柱の諸元は等断面積の正方形に置換して求めた。 Fe(コンクリート強度)=199kgf/cm <sup>2</sup> なので軸応力度は33.3kgf/cm <sup>2</sup> となる。
主筋比	1.27%	
帯筋比	0.107%	
軸応力度	F <sub>c</sub> /6	
せん断スパン比	1.5	

図-4 試験体配筋図

#### 3.3. 加力・測定計画

加力は建研式の加力装置を用いた (図-5)。加力履歴は文献1を参考にした。

測定は、荷重、水平変位、局部変位、鉄筋のひずみ、および炭素繊維のひずみについて行なった。また、適宜、コンクリートのひび割れを観察し、炭素繊維の破断の有無、破断位置、および破断順序などに注意した。

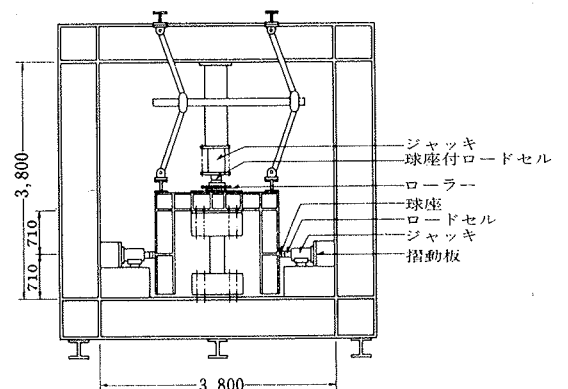


図-5 加力装置

### 4. 実験結果

#### 4.1. 実験経過

実験結果の一覧を表-4に、荷重-水平変位関係に実験終了時におけるコンクリートのひび割れ状況と炭素繊維の破断状況を加えて図-6に示す。以下、各試験体ごとに説明する。

CS-00: 主筋に沿った付着割裂ひび割れが進展し、付着破壊が生じた。部材角1/250で最大耐力に達し、その後、耐力が低下した。

CS-06: 付着ひび割れが生じたけれども、部材角1/25で炭素繊維の破断が始まるまで、ひび割れ幅は小さく、耐力低下も少なかった。主筋は降伏せず、曲げ降伏荷重(11.9 ton)に最大耐力は達しなかった。

CS-06B: 部材角1/54で炭素繊維が破断し始めると、せん断ひび割れと付着ひび割れが開き出し、大きく耐力低下した。最大耐力はほぼ曲げ降伏荷重に達した。

CS-12: 付着ひび割れが生じたが、ごく細いものであり、むしろ端部の曲げひび割れやコンクリートの圧壊が顕著

であった。主筋は降伏した。部材角1/12まで載荷したが、炭素繊維は破断しなかった。

CS-12B: CS-12と同様な破壊経過をたどったが、部材角1/17で炭素繊維が破断すると、付着ひび割れが開き、耐力が大きく低下した。

試験体	最大荷重 ton (荷重比)	最大荷重時の 変位 mm (部材角 rad)	終局変位 mm (部材角 rad)	破壊状況
CS-00	8.0 (1.0)	2.64 (1/227)	Ⓐ 12 (1/50)	付着割裂破壊
CS-06	10.3 (1.28)	19.99 (1/30)	Ⓑ 24 (1/25)	大変形の後炭素繊維破断、 付着ひび割れも進展
CS-06B	11.7 (1.46)	11.04 (1/54)	Ⓐ 12 (1/50)	曲げ降伏直前炭素繊維 破断、材端せん断破断
CS-12	11.6 (1.45)	19.99 (1/30)	50< (1/12)	曲げ破壊
CS-12B	12.2 (1.53)	12.02 (1/50)	Ⓑ 36 (1/17)	曲げ降伏後、大変形の うち炭素繊維破断

荷重比: CS-00の最大荷重を基準にした  
 部材角: 柱の上端と下端の相対変位/柱の長さ  
 終局変位: Ⓐ 荷重が最大荷重の80%に低下した変位  
 Ⓑ 炭素繊維が破断し、荷重が急激に低下した変位

表-4 実験結果一覧

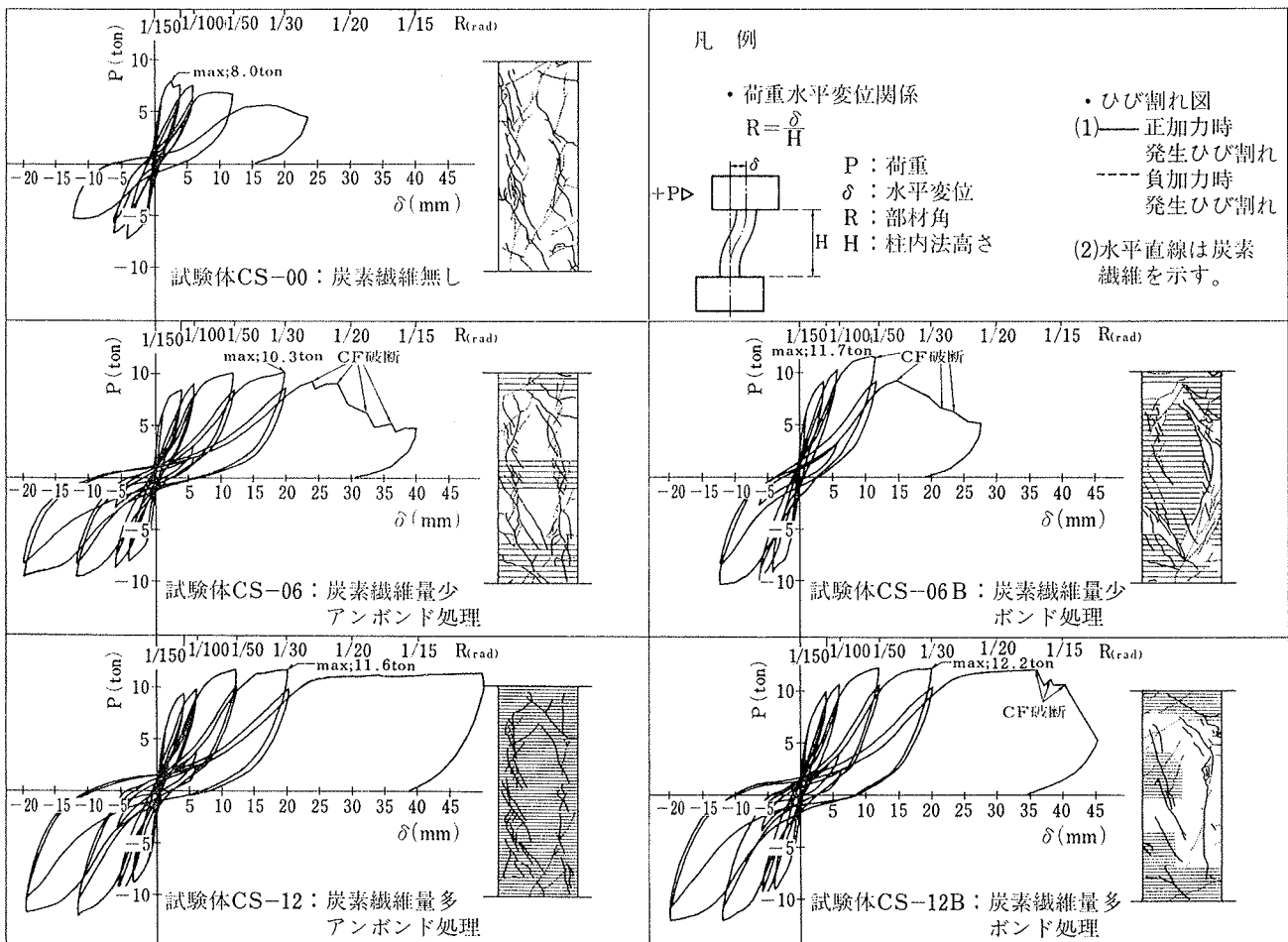


図-6 荷重-水平変位関係および最終破壊状況

#### 4.2. 最大耐力の検討

各試験体の最大耐力を比較する（表-4 参照）。

- (1) 炭素繊維によって補強した試験体の最大耐力は、補強しない CS-00 より 1.2~1.4 倍高かった。
- (2) 炭素繊維量が多いほど最大耐力が高かった。
- (3) ボンド処理の試験体はアンボンドのものとは比べ、炭素繊維量が同一でも、最大耐力が高かった。

#### 4.3. 終局変位の検討

各試験体の終局変位（定義は表-4 の注参照）を比較する（表-4 参照）。

- (1) 炭素繊維によって補強した試験体の終局変位は、CS-06B を除くと、無補強の CS-00 を大きく上回り、CS-12 では部材角 1/12 を越えた。
- (2) 炭素繊維量が多いものは終局変位がかなり大きかった。
- (3) アンボンド処理の試験体はボンドのものとは比べ、炭素繊維量が同一でも、終局変位が大きかった。

#### 4.4. エネルギー消費量

各試験体の履歴エネルギー消費量の累積値を、部材角 1/50 および 1/30 の各半サイクルごとに図-7 に示す。ただし、CS-00、CS-06B は破壊以前のサイクルの値を示した。また、小振幅（部材角 1/100 以下）時は、各試験体ごとの差が少ないので、省いた。

- (1) 炭素繊維を巻いたものは、無補強の CS-00 よりエネルギー消費量が多かった。
- (2) 炭素繊維量が多いほどエネルギー消費量が多かった。
- (3) ボンド処理の試験体はアンボンドのものより、耐力が高い分、エネルギー消費量が多かったが、炭素繊維が破断して柱が破壊すると、アンボンドのものよりエネルギー消費量が小さくなった。

#### 4.5. 炭素繊維のひずみ

図-8 に柱高さ中央における柱の横方向平均ひずみ（柱径の増分を柱直径で除した値）と炭素繊維のひずみの関係の例を示す。アンボンド処理の CS-06 は平均ひずみと炭素繊維のひずみがほぼ比例し、下地処理のねらいどおり、局部的なひずみの集中がなか

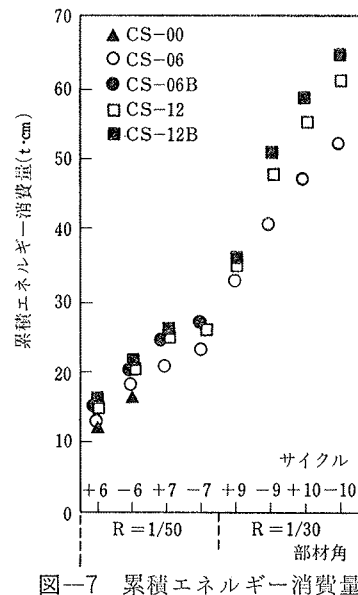


図-7 累積エネルギー消費量

ったと思われる。

なお、炭素繊維のひずみは最大 10,000  $\mu$  に達した（CS-06）。ひずみの測定点と破断箇所は一致していないので、実際のひずみはさらに大きかったことも考えられる。

#### 5. むすび

この実験結果は次のようにまとめることができる。

- (1) 炭素繊維を巻付けた柱は補強しない柱と比較して、強度は 1.2~1.4 倍、変形能力は最大 4 倍以上に伸び、エネルギー消費量も増加した。破壊モードを付着から曲げに変えることも可能であり、炭素繊維の巻付けが耐震補強効果をもつことを確認した。
- (2) 炭素繊維の巻付け量が多いもの（巻付け比 0.12%）は少ないもの（巻付け比 0.06%）と比較して、特に変形能力が顕著に改善され、耐震性能が向上した。
- (3) 炭素繊維とコンクリートとを接着したもの（ボンド処理）と、縁切りしたもの（アンボンド処理）とを比較すると、前者は強度の改善が著しく、後者は変形能力の向上に優れていたが、エネルギー消費量や炭素繊維の破断の有無なども考慮した総合的な耐震性能には差が少なかった。

#### 参考文献

- 1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，（1977）
- 2) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説，（1977）
- 3) 日本コンクリート工学協会：既存鉄筋コンクリート構造物の耐震補強ハンドブック，（1984）

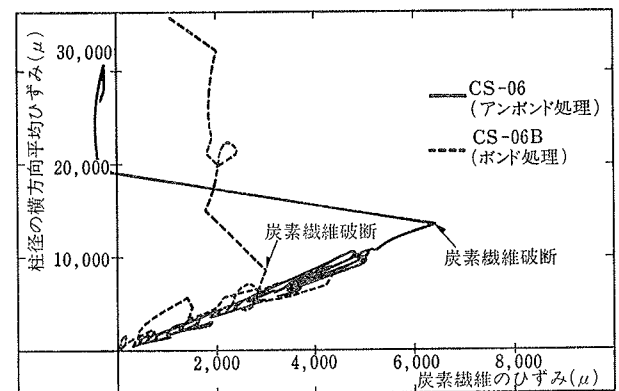


図-8 柱の平均横方向ひずみと炭素繊維のひずみとの関係