

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3）

——炭素繊維によって拘束されたコンクリートの圧縮性状——

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 3)

—— Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Spiral Hoop under Compressive Stresses ——

Hideo Katsumata Yoshiro Kobatake
Toshikazu Takeda

Abstract

The authors have developed a method of strengthening reinforced concrete columns by covering with carbon fiber spiral hoops, which fulfill two roles, i. e., (1) shear reinforcement, and (2) confinement of concrete. The latter is discussed in this study, compression tests of concrete confined by carbon fiber spiral hoops being carried out. The major findings were that both compressive strength and ductility can be improved by carbon fiber hoops, and that, such confinement effects are expected to increase in the following two cases, i. e., (1) increased carbon fiber quantity, and (2) use of cylindrical concrete specimens instead of prisms.

概 要

筆者らは、炭素繊維を既存鉄筋コンクリート柱に巻付けて耐震補強とする工法を開発した。巻付けた炭素繊維はせん断補強およびコンクリートの拘束の役目を果たす。ここでは、後者に着目し、炭素繊維を巻付けた無筋コンクリートの純圧縮試験を行なった。その結果、炭素繊維の巻付けによって、圧縮強度および圧縮じん性が向上することがわかった。さらに、炭素繊維量が多いほど、またコンクリート断面が矩形より円形の方が、圧縮強度や圧縮じん性が高まり、拘束効果が期待できることが明らかになった。

1. はじめに

筆者らは炭素繊維を既存鉄筋コンクリート柱に巻付けて耐震補強とする工法（図-1）を開発した^{1),2)}。巻付けた炭素繊維はせん断補強として働く他に、コンクリートを拘束する役目がある。拘束コンクリートの研究としてRichart³⁾の静水圧を側圧として加えた中心圧縮の実験が有名である。その結果、圧縮強度 f_{cc} が、拘束のない場合 (f_{co}) から増大することがわかった。

$$f_{cc} = f_{co} + 4.1f_l \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 f_l ：側圧

さらに、圧縮じん性も向上することが報告されている。

一般の鉄筋コンクリート柱では帯筋が拘束力を与え、この帯筋の効果について各種の研究がなされている。し

かし、炭素繊維で拘束する場合、その応力ひずみ関係が一般の鋼材とかなり異なることから、拘束効果もまた異なることが報告されている⁴⁾。この研究では、無筋コンクリートに炭素繊維を巻付けて、それが圧縮強度および圧縮じん性に与える影響を検討し、炭素繊維巻付け耐震補強工法の基礎的資料とした。

2. 実験計画

実験パラメータを以下に示す。

(1) 炭素繊維量；炭素繊維量の尺度は拘束コンクリートの研究で用いられる横補強筋体積比(ここでは ρ_f と示す)とした。 ρ_f と炭素繊維応力の積が等しければ拘束応力も等しい。量の調節は巻付けピッチを変えて行なった。同一横補強筋比でも帯筋ピッチが広がると拘束領域が減

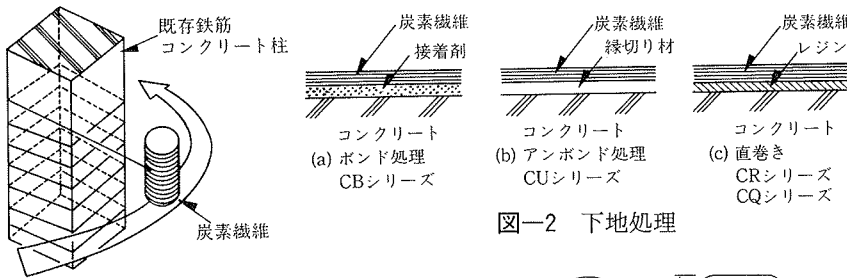


図-1 炭素繊維巻付け工法

少するが、文献5)の方法で試算すると、最大でも約6%の減少であり、比較的小さい。

(2) 断面形状；耐震補強の主な対象である矩形断面柱，および既往の拘束コンクリートの研究で検討されてきた円形断面柱に対応して断面形状の比較を円と正方形で行なった。なお，矩形断面では前報²⁾にならって隅角部に面取りを施し，炭素繊維の応力集中を緩和した。

(3) 下地処理；炭素繊維と下地コンクリートとの付着の程度によって補強効果が異なるので¹⁾，図-2に示す下地処理をパラメータとした。なお，前報²⁾の実験ではボンド処理と直巻き処理の間に，付着が切れた際の状況などに関して違いが少なかったので，この両処理法を同一のパラメータとして扱うことにした。

(4) スケール；炭素繊維およびコンクリートはスケールが大きいくほど強度が低下する。そこで，拘束効果に及ぼすスケールの影響を検討した。

試験体の一覧を表-1に示す。同一パラメータで3本ずつ実験した。試験体は無筋コンクリートに炭素繊維を巻付けたものであり，次の3種（図-3）である。

①直径 100 mm×高さ 200 mm の円柱。なお，下地処理はボンド (CB シリーズ) およびアンボンド (CU シリーズ) である。

②直径 150 mm×高さ 300 mm の円柱 (CR シリーズ)

③底面 150 mm 角×高さ 300 mm の角柱 (CQ シリーズ)

実験に用いた炭素繊維の材料試験結果を図-4に示す。炭素繊維はレジンで一体化した。コンクリートの骨材の最大粒径は 10 mm で，強度は表-1に示す。

加力は JIS A1108 「コンクリートの圧縮試験方法」に準じた。測定はコンクリートの縦ひずみと炭素繊維のひずみについて行なった。縦ひずみは，CU および CB シリーズでは高さ中央部の変形から求めたが，CR および CQ シリーズでは全高の変化から求めた。中央部の変形が著しく，あらかじめ埋め込んだボルトが傾いてしまって軸

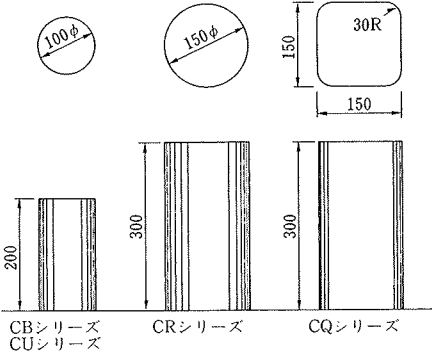


図-2 下地処理

図-3 試験体

試験体	形状・寸法 (断面積 A : cm ²)	炭素繊維量 ρ _f : %	下地処理
C00		0.00	—
CB10	100φ×200 ^h (78.54)	0.102	ボンド
CB20		0.20	
CU10	Fc=315	0.102	アンボンド
CU20		0.20	
CR00	150φ×300 ^h (176.7)	0.00	—
CR20		0.20	
CR40	Fc=244	0.41	直巻き
CQ00	150 [□] ×300 ^h (217.3)	0.00	—
CR12		0.116	
CQ24		0.23	
CQ30		0.29	
CQ40		0.39	

$$\rho_f : \text{横補強筋体積比} \quad \rho_f = \frac{a_f \cdot \ell}{A \cdot X}$$

x : 巻付けピッチ

ℓ : 周長

a_f : 炭素繊維断面積

F_c : コンクリート素材の強度(kgf/cm²)

表-1 試験体の一覧

方向の変形を正確に測定することが不可能になったからである。

3. 実験結果

3.1. 実験経過

圧縮強度の一覧を表-1に示す。実験終了時の試験体の状況を写真-1に例示する。

3.1.1. 応力ひずみ関係 図-5に応力ひずみ関係の代表例を示す。

炭素繊維を巻付けないものでは縦ひずみ0.2~0.3%付近で最大応力を経験し，その後，徐々に応力が低下した。一方，炭素繊維を巻付けた場合は，縦ひずみ0.3%を超えると応力の増加が緩やかになり，炭素繊維量が少ないときには若干の応力低下があったが，無補強のものよりは高い応力を維持した。最終的には，炭素繊維の破断が始まると，すぐ近傍の炭素繊維も破断し，急激な応力低下が生じた。なお，炭素繊維の間からコンクリートがはらみ出るとは，巻付けピッチが最大の9mmの場合

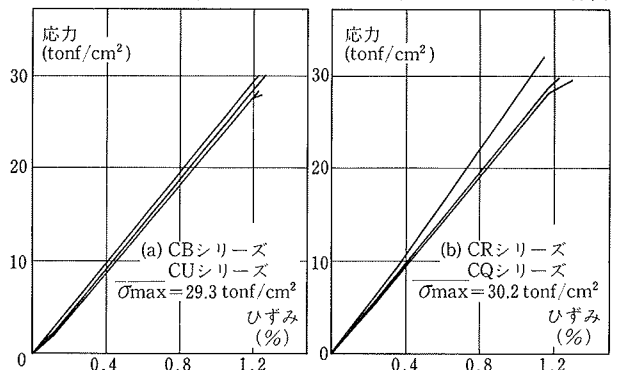


図-4 炭素繊維の材料試験結果

(CB10およびCU10)も無かった。巻付けピッチが広がって拘束領域が減少するよりも、炭素繊維の破断の方が大きな影響を持っていたことがわかる。

炭素繊維量が多いほど、断面形状・下地処理・スケールが違ってても、圧縮強度が高く、圧縮じん性もよく、縦ひずみ0.3%を超えた領域で維持する応力も高かった。特にCR40とCQ40では、縦ひずみ0.7%以上で炭素繊維が破断するまで応力の増加が続いた。

断面形状の比較をCRおよびCQシリーズについて行なう。炭素繊維量が同一の場合、円形断面(CR)の方が矩形断面(CQ)よりも圧縮じん性がよく、縦ひずみ0.3%以降の応力が維持される傾向があった。

下地処理やスケールが異なった場合でも、応力ひずみ関係の概略には大きな変化がなかった。

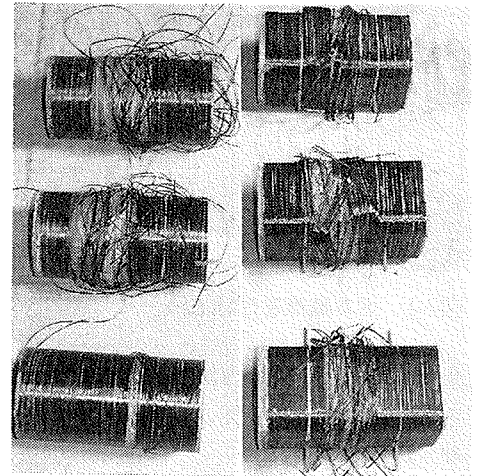
3.1.2. 炭素繊維のひずみ コンクリートの縦ひずみと炭素繊維のひずみとの関係の例を図一6に示す。

炭素繊維のひずみは縦ひずみ0.2%前後から急増した。縦ひずみの増分に対する炭素繊維のひずみの増分の比は、コンクリートと炭素繊維が密着していると見なせば、ポアソン比に対応する。この比は接線をとった場合は最大1.4~2.5、割線をとった場合にも最終的にほとんどのケースで1以上となった。これは、コンクリートにかなり

試験体	fc (kgf/cm ²)	k
C00	315	—
CB10	342	1.36
CB20	377	1.58
CU10	347	1.61
CU20	348	0.85
CR00	244	—
CR20	256	0.79
CR40	349	1.51
CQ00	240	—
CQ12	271	1.34
CQ24	283	0.94
CQ30	292	0.89
CQ40	323	1.05

fc：圧縮強度
k：拘束効果を示す指標
fc、kともに3本の平均値

表一2 圧縮強度の平均値

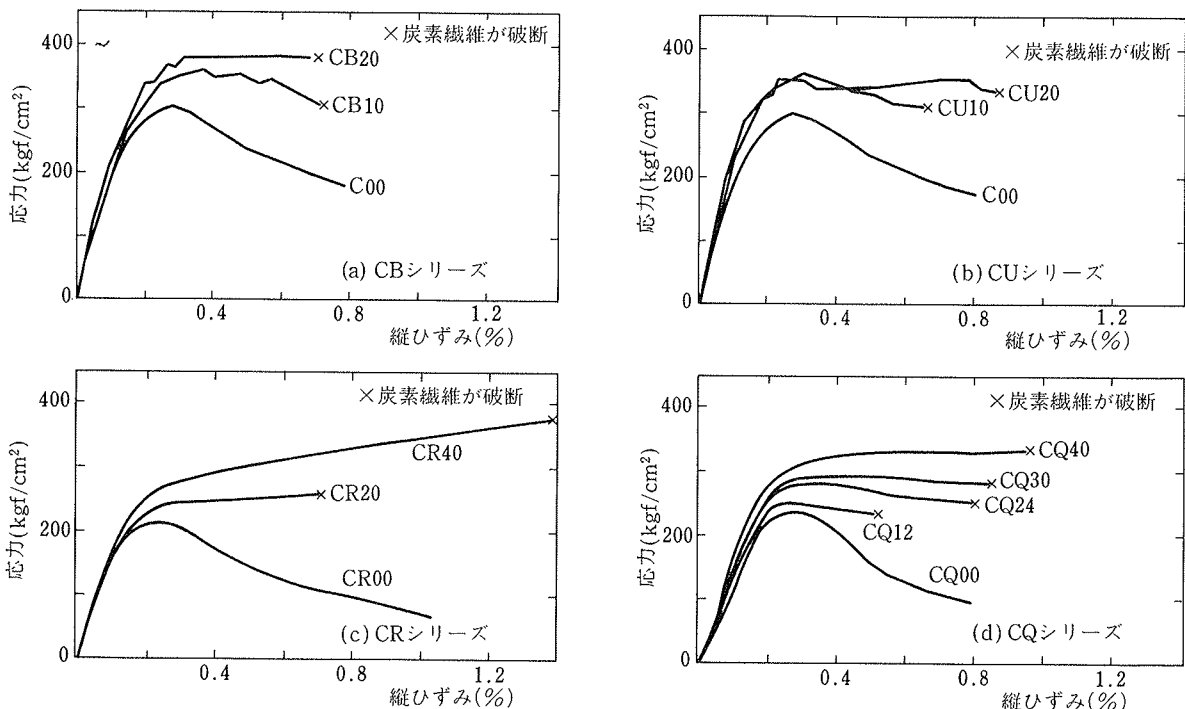


写真一1 実験終了時の状況

の体積膨脹があったことを示している。

炭素繊維の最大ひずみ(図一7(f))は、炭素繊維量によらず、0.8~1.2%であり、炭素繊維に生じた最大応力は材料試験結果から、引張強度の60~80%以上であったと思われる。コンクリートの応力が圧縮強度にほぼ到達した時点(縦ひずみ0.3%)での炭素繊維のひずみは小さく、炭素繊維による拘束はあまり大きくなかった。以上から、炭素繊維による拘束はコンクリートの横はらみが生じ始めるまでは非常に小さく、コンクリートの変形に伴って急速に大きくなると考えられる。

なお、圧縮強度時の炭素繊維のひずみ(図一7(e))は、



図一5 応力とひずみの関係

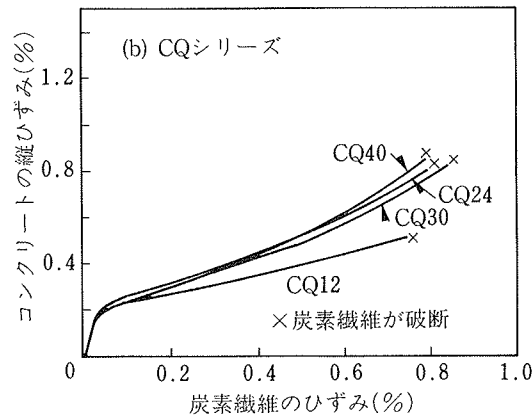
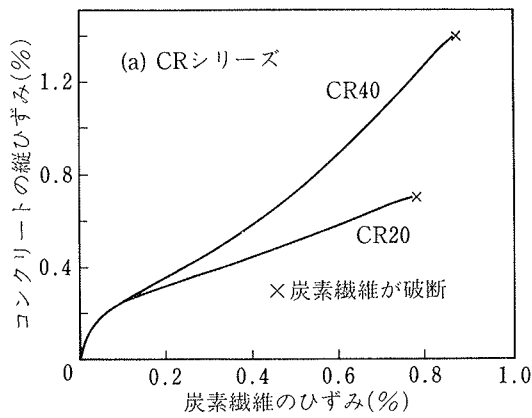


図-6 炭素繊維のひずみ

その時点でのコンクリート縦ひずみ (図-7(c)) に対応しており、圧縮強度時の炭素繊維による拘束は必ずしも大きくはなかった。

3.2. 圧縮強度

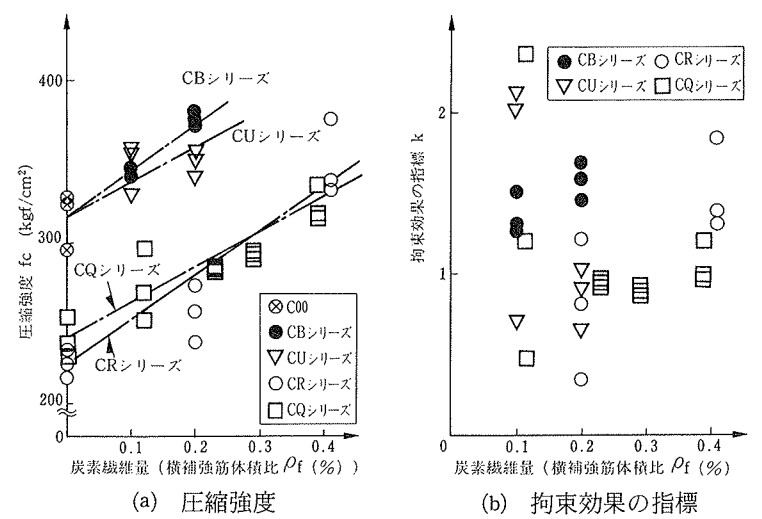
圧縮強度と炭素繊維量の関係を図-7(a)に示す。炭素繊維量が増加するほど圧縮強度が上昇し、特にCR40では無補強のCR00に対して56%の増加があった。この強度上昇の程度を次式で定義される指標 k で表わす。

$$k = \frac{\Delta f_c}{\rho_f \cdot \sigma_{CF}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

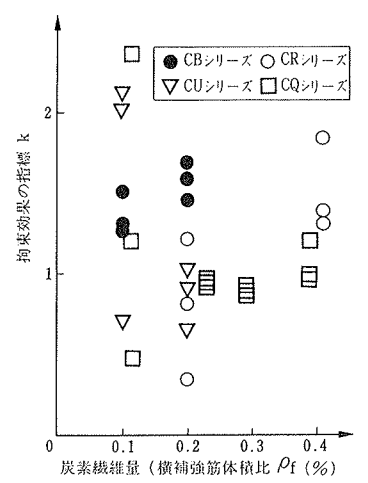
ここに、 Δf_c ；無補強試験体 (3本の平均値) からの圧縮強度の増分、 σ_{CF} ；炭素繊維の有効強度。前報²⁾および炭素繊維のひずみの測定値 (図-7(f)) を参照して、 $\sigma_{CF} = (2/3) \times (\text{引張強度})$ とした。 k が大きいほど拘束が効果的に行なわれたことを示す。

図-7(b)に k と炭素繊維量との関係を示す。バラツキは大きいだが、CBおよびCQシリーズでは k は炭素繊維量にあまり影響されなかった。

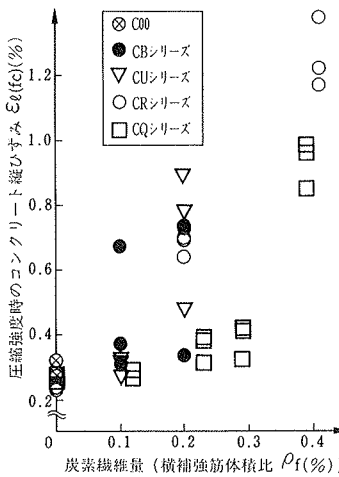
円形断面 (CRシリーズ) では矩形断面 (CQシリーズ) と比較し、炭素繊維量が増加すると k が上昇した。矩形断面では対角線沿いに拘束が集中するの



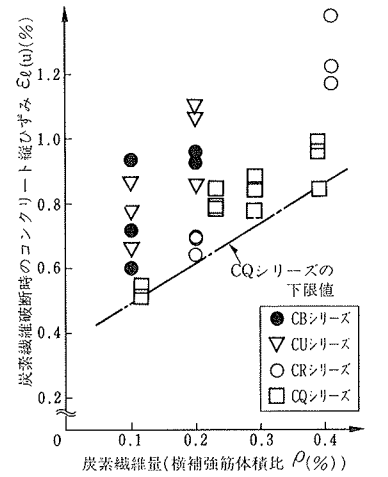
(a) 圧縮強度



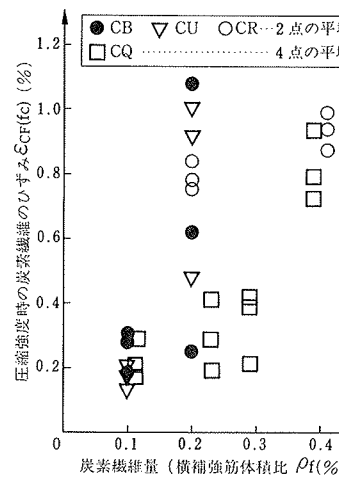
(b) 拘束効果の指標



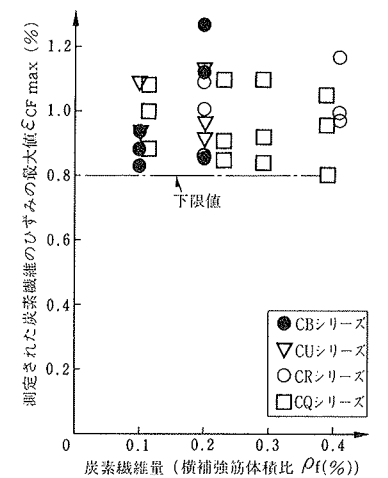
(c) 圧縮強度時のコンクリート縦ひずみ



(d) 炭素繊維破断時のコンクリート縦ひずみ



(e) 圧縮強度時の炭素繊維のひずみ



(f) 炭素繊維のひずみの最大測定値

図-7 炭素繊維量と実験結果

に対し、円形断面では全断面が拘束されることが理由として考えられる。

下地処理の違い (CB および CU シリーズ) およびスケールの違い (CB および CR シリーズ) は実験のバラツキが大きいが、アンボンド処理 (CU) よりもボンド処理 (CB) が、またスケールが大きい場合 (CR) よりも小さい (CR) 方が、 k が高い傾向を持っていた。

なお、炭素繊維の応力が σ_{cf} の大きさに常に加わると考えると、(1)式から $k=2.05$ が得られる。一般の鉄筋コンクリート柱の実験結果を整理すると、種々の要因を考慮すればバラツキは大きいが、(1)式に相応する耐力上昇を期待してよい⁶⁾と報告されている。しかし、この実験では $k=2.05$ を超える耐力上昇があるものはほとんどなかった。この理由として次のことが考えられる。

(1) 圧縮強度時の炭素繊維応力が σ_{cf} より小さい (図-7(e)参照) こと。

(2) 炭素繊維の拘束応力はコンクリートの変形に伴って増加する (図-6) のに対し、Richart の実験は常に一定の側圧が加えられており、また、一般の鉄筋コンクリート柱では帯筋の降伏がひずみ0.2%のレベルで生じ、以後は一定の拘束圧が加わること。

炭素繊維による拘束効果の評価には、損傷が進行しながら拘束圧が増加すると考える必要があるが、一般の帯筋柱との対応を重視すれば、一定の拘束圧が加わるとして(2)式の形で k を求めておけばよいと思われる。このとき、炭素繊維応力を σ_{cf} とすれば、柱に加わる最大拘束圧の下限値を用いたことになる (図-7 (e, f))。

3.3. 圧縮じん性

圧縮じん性の指標としてここでは炭素繊維が破断する時点でのコンクリートの縦ひずみ $\epsilon_1(u)$ を用いる。炭素繊維の破断とともに急速に応力低下が生じたからである。図-7(d)に炭素繊維量と $\epsilon_1(u)$ の関係を示す。

炭素繊維量が増加するほど、他のパラメータにかかわらず圧縮じん性がよかった。特に、断面形状が円 (CR シリーズ) の場合は矩形 (CQ シリーズ) よりも炭素繊維量の増加によるじん性の向上が著しかった。なお、下地処理について CB および CU シリーズを比較すると、圧縮じん性に顕著な差はなかった。スケールが大きい方 (CR20) よりも小さい方 (CB20) が圧縮じん性がよかった。

圧縮強度時のコンクリートの縦ひずみ $\epsilon_1(f_c)$ についても検討を行なう (図-7(c))。炭素繊維量が多い CR40 と CQ40 を徐くと、 $\epsilon_1(f_c)$ は0.2~0.5%前後となることが多かった。ただし、炭素繊維量が増加するほど、また矩形 (CQ24) より円形 (CR20) の方が、 $\epsilon_1(f_c)$ が高い傾向があった。なお、 $\epsilon_1(f_c)$ と $\epsilon_1(u)$ が異なることは、圧縮強度に達

してから炭素繊維が破断するまでに応力が低下することを意味しており、炭素繊維量が多い方が応力低下が少ないことがわかる。

4. まとめ

炭素繊維を巻付けた無筋コンクリートの中心軸圧縮試験の結果、次のことが明らかになった。

(1) 圧縮強度および圧縮じん性が炭素繊維の巻付けによって向上し、圧縮強度は最大50%以上の増加があった。

(2) 炭素繊維量が多いほど圧縮強度および圧縮じん性が向上した。

(3) 断面形状が正方形より円形の方が、炭素繊維量の増加に伴う圧縮強度および圧縮じん性の増加が顕著であった。

(4) 下地処理およびスケールに関しては実験のバラツキが多かったが、アンボンド処理 (縁切り) よりもボンド処理 (接着) の方が、スケールが大きいものより小さい方が拘束効果が高い傾向をもっていた。

謝 辞

この研究は三菱化成(株)との共同研究であり、炭素繊維とレジン提供を受けた。

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) 勝俣, 小島, 武田: 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), 大林組技術研究所報, No. 34, (1987), pp. 114~118
- 3) Richart, F. E., Brandtzaeg, A., Brown, R. L.: A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stress, Bull. No. 185, Univ. of Illinois Engineering Experiment Station, (1928)
- 4) 福沢, 沼尾, 野崎, 窪田: 連続繊維により横拘束されたコンクリートの圧縮性状, 第42回セメント技術大会講演要旨, (1988), pp. 172~173
- 5) Sheikh, S. A., Uzumeri, S. M.: Analytical Model for Confinement in Tied Column, Proc. of ASCE, Vol. 108 No. ST12, (1982), pp. 2703~2722
- 6) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム, (1988)