

論文

[2120] 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

正会員○宇治公隆 (大成建設技術研究所)

正会員 横田和直 (大成建設技術研究所)

正会員 池田尚治 (横浜国立大学)

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、供用期間中に想定される作用荷重に対して十分安全を有するように設計される。しかしながら、建設当時には予測されなかった過大な荷重が作用したり、設計法の変更により、構造物としての耐荷力が必ずしも十分であるとは言いがたいものもあると推測される。これまでの研究より [1]~[3]、シート状炭素繊維を既設コンクリート構造物のスターラップと同一方向に配列するよう貼付けることにより、せん断耐力が大幅に向上することを明らかにした。本研究は、シート状炭素繊維を軸方向鉄筋と同一方向に配列するよう貼付けることによる曲げ耐力あるいはせん断耐力向上効果を明らかにするとともに、それらの耐荷機構について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料は表-1に示す通りである。シート状炭素繊維 (以下、CFS (Carbon Fibre Sheet)) と略記する) には、175 g/m<sup>2</sup>の炭素繊維を一方向に配列したものの (見掛けの換算厚さ0.0097cm、引張強さ  $f_u = 27,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、弾性係数  $E = 2.35 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ) を使用した。

コンクリート打設後21日でCFSを貼付けることとし、エポキシ系プライマーを150 g/m<sup>2</sup>塗布含浸し、その後350 g/m<sup>2</sup>のエポキシ樹脂でCFSを貼付けた。試験は、CFS貼付け後1週で実施した。コンクリートはGmax. = 20 mm、水セメント比 58%、単位水量 161kg/m<sup>3</sup> であり、打設したコンクリートのスランブは 9.2cm、空気量は 4.9%、試験時の圧縮強度は  $f'_c = 312 \text{ kgf/cm}^2$ であった。鉄筋にはSD295のD10 (降伏応力度  $f_y = 3,600 \text{ kgf/cm}^2$ 、引張強さ  $f_u = 5,100 \text{ kgf/cm}^2$ 、伸び 30.4%) を使用した。

2.2 付着特性試験

CFSを補強材として既設コンクリート構造物に貼付ける場合、その付着性能が補強効果を左右することになる。そこで、はり供試体による曲げ、せん断試験に先立ち、コンクリートとCFSとの付着特性について検討した。

表-1 使用材料

材 料		性 質
シート状炭素繊維 (CFS)		引張強度 $f_u = 27,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、 弾性係数 $E = 2.35 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
コンクリート	セメント	普通ポルトランドセメント 比重 = 3.16
	細骨材	相模川水系川砂と市原産山砂の混合砂 F. M. = 2.77、表乾比重 = 2.59
	粗骨材	津久井産碎石 Gmax = 20mm F. M. = 6.60、表乾比重 = 2.64
	混和剤	AE減水剤 (リグニンスルホン酸塩)
鉄筋	軸方向鉄筋	SD295, D10 降伏応力度 $f_y = 3,600 \text{ kgf/cm}^2$ 、 引張強度 $f_u = 5,100 \text{ kgf/cm}^2$ 、伸び = 30.4%
	スターラップ	SD345, D6 降伏応力度 $f_y = 3,900 \text{ kgf/cm}^2$ 、 引張強度 $f_u = 5,400 \text{ kgf/cm}^2$ 、伸び = 15.6%

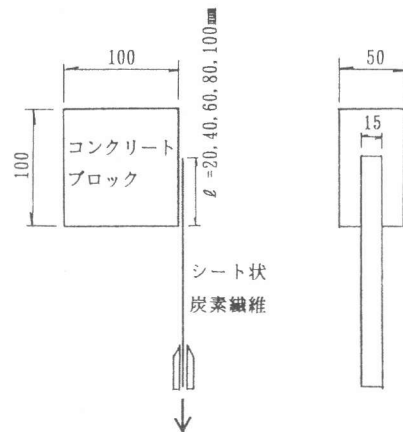


図-1 付着特性試験方法

試験では、コンクリートブロックにCFSを貼付け、コンクリートブロックを固定してCFSを軸方向に引張り、最大荷重を求めた。コンクリートブロックは曲げ供試体用型枠で製作した□10×10×40cm角柱供試体を5cmにスライスしたものをを用い、サンドペーパー（＃100）で型枠側面部であった表面のセメント分を取り除き、CFSを貼付けた。CFSの幅は15mm、付着長さは2, 4, 6, 8, 10cmとした。試験概念図を図-1に示す。

### 2.3 はり供試体試験

曲げ、せん断耐荷機構に於けるCFSの効果を検討するため、表-2に示す4体で試験を実施した。供試体は、曲げで破壊する供試体、せん断で破壊する供試体、およびそれぞれの供試体下縁にCFSを軸方向に配列するよう貼付けた供試体である。

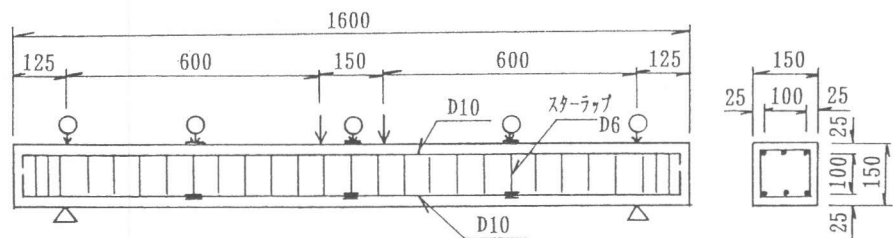
供試体の形状・寸法、配筋状況を図-2に示す。

CFSの効果、付着特性を把握するため、曲げ供試体については供試体のスパン中央部に、またせん断供試体についてはせん断スパン中央部に人工ひびわれ（厚さ0.5mm、高さ5cmのプラスチックを配置）を設け

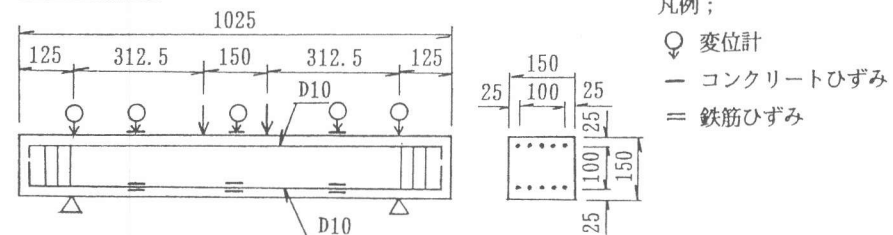
表-2 はり供試体諸元

No.	供試体要因	補強の有無
1	曲げ基準 供試体	補強なし
2	CFS補強 曲げ供試体	軸方向貼付け (175 g/m <sup>2</sup> 、 見掛け厚さ0.0097cm)
3	せん断基準 供試体	補強なし
4	CFS補強 せん断供試体	軸方向貼付け (175 g/m <sup>2</sup> 、 見掛け厚さ0.0097cm)

NO. 1, 2



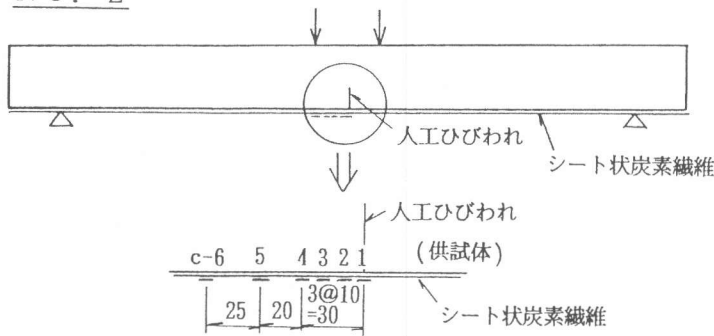
NO. 3, 4



凡例；  
 ○ 変位計  
 — コンクリートひずみ  
 = 鉄筋ひずみ

図-2 供試体形状寸法および配筋状況

No. 2



No. 4

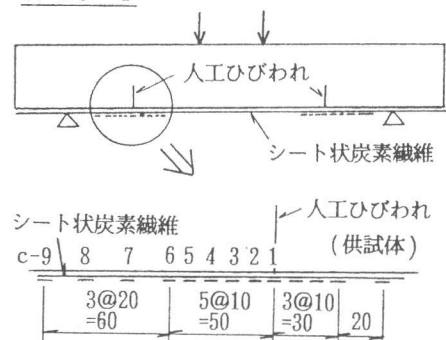


図-3 シート状炭素繊維のひずみゲージ貼付位置

表-3 付着特性試験結果

付着長さ	最大荷重 (15mm幅当り)	平均付着応力度
2 cm	1 3 7 kgf	4 5 . 7 kgf/cm <sup>2</sup>
4 cm	1 7 5	2 9 . 2
6 cm	1 9 3	2 1 . 4
8 cm	2 2 5	1 8 . 8
10 cm	2 5 8	1 7 . 2

てひびわれがその位置に発生するようにし、図-3に示すごとくひびわれ付近にひずみゲージを貼付けひずみの分布を測定した。試験は2点集中荷重とし、2点の加力の和(2P)を荷重とした。加力は基本的に0.2tfピッチの単調増加とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 付着特性試験

付着長さを変化させた供試体の最大荷重を表-3に示す。すべての供試体がCFSとコンクリートとの境界面下のコンクリート表面部で剝離を生じ破壊した。最大荷重を付着面積で除して求めた平均付着応力度は図-4に示す通りであり、これまでに指摘されているように[4]、付着長さにより変化することが明らかとなった。

#### 3.2 はり供試体試験

試験結果を表-4に、ひびわれ状況を図-5に示す。また、曲げ供試体について荷重とスパン中央部での鉄筋ひずみならびに同一断面のCFSのひずみの関係を、せん断供試体について荷重とせん断スパン中央部での鉄筋ひずみならびに同一断面のCFSのひずみの関係を図-6に示す。

曲げ供試体試験のひずみにおいて、2P=1.4tfまではCFSのひずみが大きく、それ以降は逆に鉄筋のひずみが大きくなってい

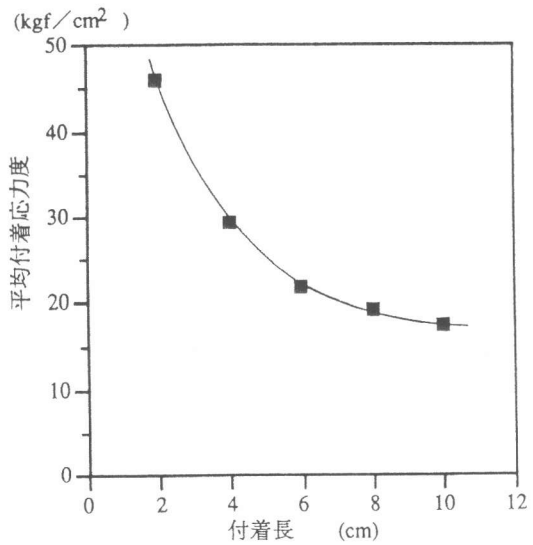


図-4 平均付着応力度

表-4 はり供試体荷重試験結果

供試体 No.	曲げひびわれ発生荷重	斜めひびわれ発生荷重	最大荷重
1	1.0 t	-	3.2 t
2	1.6 t	-	4.9 t
3	4.6 t	5.3 t	7.0 t
4	5.4 t	5.8 t	7.7 t

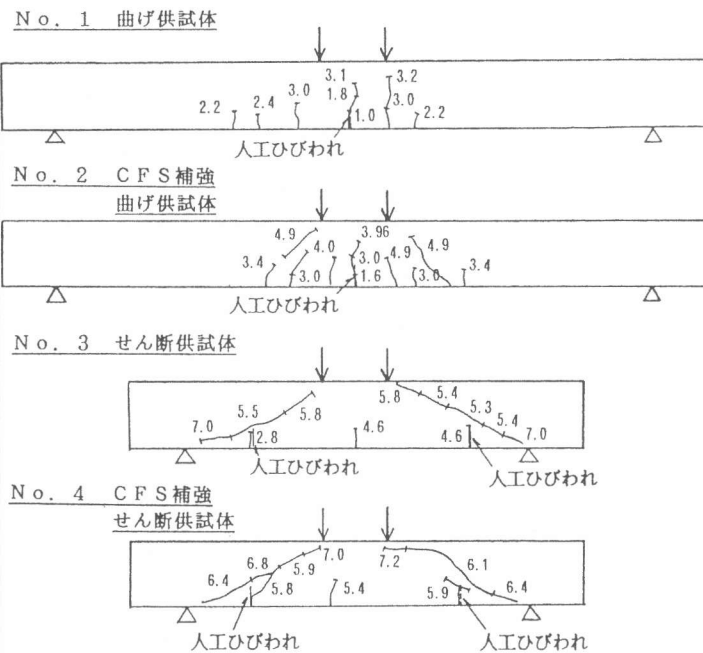


図-5 ひびわれ状況図

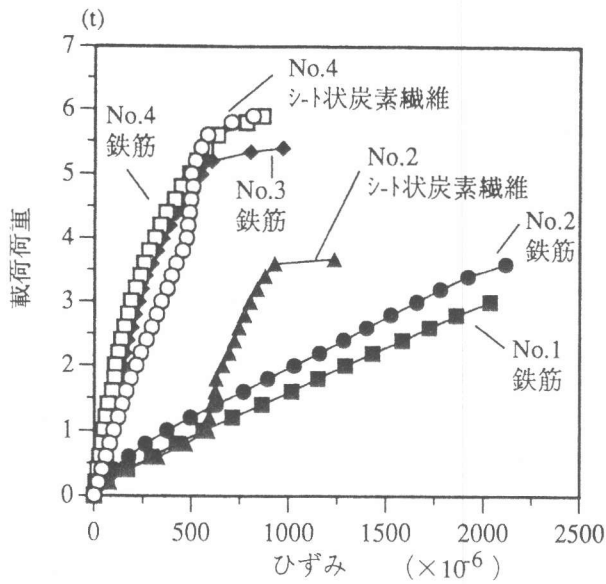


図-6 荷重・ひずみ曲線

る。CFSに貼付けたひずみゲージの値を図-7に示す。ひずみはひびわれ部（ゲージ記号：C-1）近傍が大きく、ひびわれ位置から離れるにしたがって減少している。2P = 1.6 tf時にひびわれ位置から1 cm離れたC-2のひずみはひびわれ部とほぼ同じ値である。これは、ひびわれ部から1 cm程度まではコンクリートとCFSは付着が切れていることを意味する。

C-2よりさらに1 cm離れたC-3のひずみは  $300 \times 10^{-6}$  である。このC-3とC-2の差が付着によるものであり、計算上  $8.0 \text{ kgf/cm}^2$  の付着応力度となる。また、2P = 3.8 tf時のC-3とC-4の相対ひずみ差 ( $800 \times 10^{-6}$ ) が最も大きく、計算上  $18 \text{ kgf/cm}^2$  の付着応力度となる。

コンクリートブロックを用いた付着特性試験と比較すると、はり供試体の測定から計算によ

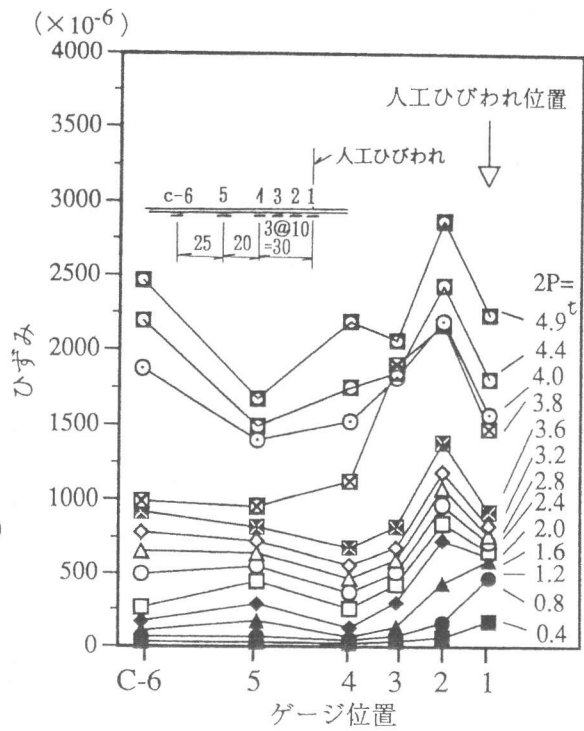


図-7 シート状炭素繊維のひずみ分布 (曲げ供試体)

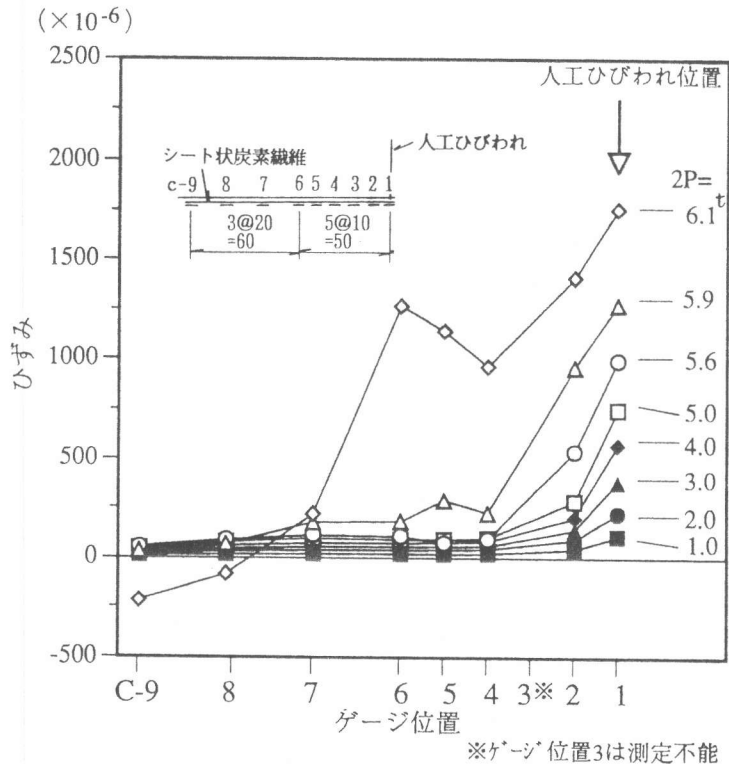


図-8 シート状炭素繊維のひずみ分布 (せん断供試体)

り求まる付着応力度は小さい値となっている。これは、曲げ供試体試験においては、はりの曲げを受けることになり、CFSの軸方向のずれを摩擦により拘束しているものと考えられる。

CFSのひずみは鉄筋降伏後 ( $2P = 3.6 \text{ tf}$ ) も増加する傾向を示すが、ひずみ量はすべてのゲージで大きな値となり、全体的に付着切れが進行していることがわかる。

せん断供試体におけるせん断スパン中央のひびわれ近傍のひずみは図-8の通りである。 $2P = 4.0 \text{ tf}$  時にひびわれ位置 (C-1) と、1 cm離れたC-2のひずみとの差は  $400 \times 10^{-6}$  程度であり、曲げ供試体試験と同様にして計算すると付着応力度は  $9 \text{ kgf/cm}^2$  である。なお、斜めひびわれの発生に対応する  $2P = 6.1 \text{ tf}$  時にひびわれから 5cm程度の位置までひずみが急激に増加し一様な値を示している。

本試験の結果、供試体下面の軸方向にCFSを配置して補強することにより、斜めひびわれ発生荷重および最大荷重が1割程度増加するものの、せん断耐荷機構に関して補強の有無による大きな相違は見られない。したがって、せん断耐力を向上させるには既往の研究 [1]~[3] で示したように、スターラップと同一方向に配置しせん断ひびわれの進展を抑制する必要がある。

#### 4. 考察

CFSを貼付けた曲げ供試体のひずみ分布の一例を図-9に示す。鉄筋ひずみに比較してCFSのひずみは小さく、ひずみ分布は直線関係を示さない。したがって、CFSを引張材として鉄筋に置換えて部材耐力を算定することは必ずしも適当ではないと言える。そこで、以下ではCFSの付着特性を考慮した耐力算定法について検討する。

CFSは初期の段階ではひびわれ部付近のみ大きなひずみを示し、荷重の増加とともに付着切れが進み、ひずみの大きな区域が広がっていく。図-7に示したCFS補強曲げ供試体のC-6は、図-5に示したひびわれ状況図の載荷点下のひびわれ ( $2P = 4.0 \text{ tf}$  で発生) に対応しており、ひびわれ間隔の半分が付着切れに抵抗できる付着長さとなる。図-4に示したごとく、付着長さの相違により平均付着応力度は求まり、その合力がCFSの受持つ引張力と考えることができる。したがって、ひびわれ間隔 ( $l$ ) を設定することによりCFSが抵抗する長さ ( $l/2$ )、引張力 ( $T_{cf} = l/2 \times \text{構造物の幅} \times \text{平均付着応力度}$ ) が求まる。そして、これよりも大きな力が作用した場合ひびわれ間は完全に付着切れを生じる。本試験の結果から、終局前にはひずみがほぼ一様になり付着切れを生じていることが推測される。

これらを用い、供試体の最大耐力の算定法について検討する。作用する荷重の釣り合いおよびひずみ分布は図-10のようになる。CFSに作用する力 ( $T_{cf}$ ) を次のように考える。はり供試体に発生したひびわれ間のコンクリートとCFSは付着切れが進展し、最終的にはCFSの応力は一様となるものとする。そして、ひびわれ幅、ひびわれ間隔をもとにCFSのひずみを簡易

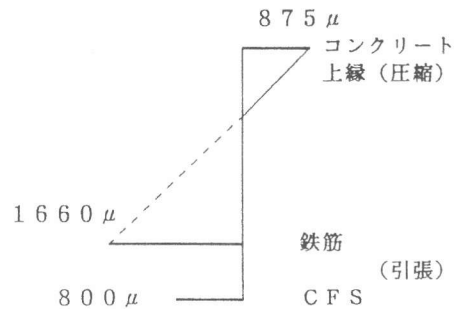


図-9 曲げ供試体ひずみ分布 ( $2P = 3 \text{ t}$  時)

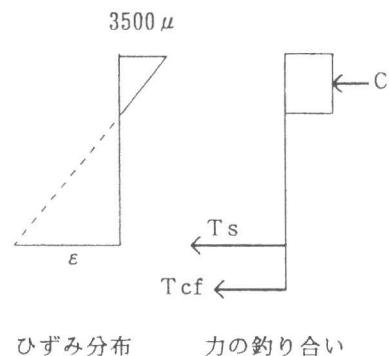


図-10 最大荷重時のひずみおよび力の釣り合い

的に算出し、それより  $T_{cf}$  を計算する。

ACI のひびわれ間隔 (Save) 計算式 [5] では  $Save = 2t$  ( $t$ : かぶり) としている。また、ひびわれ幅 ( $w$ ) は土木学会標準示方書 [6] にしたがって  $k \{ 4c + 0.7(C_s - \phi) \}$  で計算するが、この場合ひびわれ幅は鉄筋のひずみ ( $\epsilon$ ) の関数として表現できる。ここで、 $k$  を 1.0、かぶり ( $c$ ) を 2.5cm、鋼材の中心間隔 ( $c_s$ ) を 5cm、鉄筋径 ( $\phi$ ) を 1cm とすれば、ひびわれ幅は  $w = 12.8 \epsilon$  となる。一方、ひびわれ間隔は  $Save = 5cm$  で、ひびわれ間が一様に伸びたと仮定すれば CFS のひずみは  $2.56 \epsilon$  となる。

これより、 $T_{cf} = 2.56 \epsilon \times 2.35 \times 10^6 \times 0.0097 \times 15 \text{ kgf}$  となる。鉄筋の受持つ力 ( $T$ ) は  $T = 3,600 \times 2.14 = 7,704 \text{ kgf}$  である。またコンクリートの受持つ力 ( $C$ ) は  $C = 0.85 \times f'_c \times 15 \times 0.8 \times X \text{ kgf}$  ( $X$ : 中立軸) となる。なお、コンクリートの上縁のひずみを  $3,500 \times 10^{-6}$  とする。

以上の釣り合い条件から、鉄筋ひずみ ( $\epsilon$ ) が  $6,740 \times 10^{-6}$ 、中立軸  $X = 4.27 \text{ cm}$  であり、 $T_{cf} = 5,895 \text{ kgf}$ 、 $C = 13,587 \text{ kgf}$  となる。これより、モーメントを計算し、供試体に作用する荷重を求めると、 $2P = 5.17 \text{ tf}$  となる。CFS 補強曲げ供試体の最大荷重は  $2P = 4.9 \text{ tf}$  であり、ほぼ計算値と一致していることがわかる。したがって、耐力の算定に当たっては CFS の付着切れを考慮して簡易的に計算することが可能であることが明らかとなった。

## 5. まとめ

本試験より明らかとなった事柄をまとめると以下の通りである。

- ① CFS を軸方向に配列するように貼付けることにより、曲げ耐力の向上が見られた。一方、せん断に対しては、斜めひびわれ発生荷重、最大荷重を 1 割増加させる程度である。せん断補強の場合は、既往の研究 [1]~[3] で明らかとなっているように CFS をスターラップと同一方向に配置する必要がある。
- ② CFS のひずみは鉄筋コンクリートの断面保持理論の値とは相違している。これは、CFS がコンクリートとの付着切れによりひずみがある範囲内で一樣になるためである。
- ③ 曲げ耐荷力の算定においてはこの付着切れを考慮する必要があるが、ひびわれ幅、ひびわれ間隔から CFS のひずみ量を設定し、力の釣り合い条件および供試体としてのひずみ分布をもとに計算する簡易的な算出法を用いることができる。

## [参考文献]

- 1) 宇治公隆ほか：せん断耐荷機構におけるカーボンファイバーの効果、土木学会第 45 回年次学術講演会概要集、第 5 部、pp. 580 - 581、1990.9
- 2) 宇治公隆・横田和直：カーボンファイバーによる既設構造物の補強効果に関する研究、土木学会第 46 回年次学術講演会概要集、第 5 部、pp. 716 - 717、1991.9
- 3) 宇治公隆：シート状連続炭素繊維補強材を用いた既設鉄筋コンクリート部材のせん断耐力向上効果に関する研究、コンクリート工学論文集、第 3 巻 2 号掲載予定、1992.7
- 4) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、pp. 30 - 33
- 5) 森田司郎 訳：鉄筋コンクリート部材のひびわれに関する一連の研究、コンクリートジャーナル、Vol. 4、No. 2、pp. 64 - 76、1966.2
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 平成 3 年版 設計編、pp. 85 - 86