

# 論文 テープ状炭素繊維を用いた RC 構造物補強工法に関する実験的検討

武井 昭\*<sup>1</sup>・松本良雄\*<sup>2</sup>・江上仁士\*<sup>3</sup>・秋山 暉\*<sup>4</sup>

要旨：本研究は、近年新材料として活用され始めた炭素繊維による RC 構造物補強工法に関する実験・検討であり、RC 梁部材にテープ状に成型された炭素繊維シートを設置した補強試験体について曲げ載荷試験を行ないその補強効果と曲げ性状を確認した。また、通常炭素繊維シートは接着剤により既設コンクリートに貼り付けられ、構造上ボンダ構造として取り扱われているが、実際にはコンクリートおよび接着剤の耐久性や強度の点からボンダ構造とアンボンダ構造の間を推移すると考えるべきであり、そこで、両構造系での比較試験を行なって相違点を把握し、設計上の留意点について考察した。

キーワード：RC 構造物補強，炭素繊維シート，アンボンダ構造

## 1. はじめに

近年、引張強さや耐久性に優れかつ軽量でハンドリングの良い高強度連続繊維を使用して既存鉄筋コンクリート構造物に対する補強を行なおうという工法が開発され、その研究成果や実施例が紹介されつつある。本文は、高強度連続繊維を用いた構造物補強工法のうちの一つとして、炭素繊維シートを用いた補強工法について研究したものである。

一般的に炭素繊維シートによる既存鉄筋コンクリート構造物の補強工法では、炭素繊維シートはエポキシ樹脂等の接着剤により既設コンクリート面に貼付され、設計上もコンクリートとの付着の利いたボンダ構造として取り扱われている。しかしながら、長年月におけるコンクリート表面部分の劣化を考えれば、たとえ接着剤の強度や耐久性を改善したところでコンクリートと炭素繊維シートとのボンダが十分に維持できない可能性がある。したがって、ボンダ構造としての設計が長期的に保証されると考えるよりも、むしろ実際にはボンダ構造とアンボンダ構造との間を推移するものとするのが妥当であろう。

そこで本研究は、鉄筋コンクリート梁部材に対する炭素繊維シートの付着の程度についてボンダ構造とアンボンダ構造の 2 通りを設定して、これらに対する曲げ載荷試験を実施して両構造系における曲げ性状や耐力について比較・検討を行ない、さらに補強設計に関して考察することを目的としたものである。なお、今回の実験・検討における補強試験体はテープ状に成型された炭素繊維シートを用いて補強した鉄筋コンクリート梁部材を取り上げた。以下では、テープ状に成型された炭素繊維シートを炭素繊維テープあるいは CF テープと呼ぶものとし、今回実験に使用した炭素繊維テープを写真-1 に示す。

## 2. 実験概要

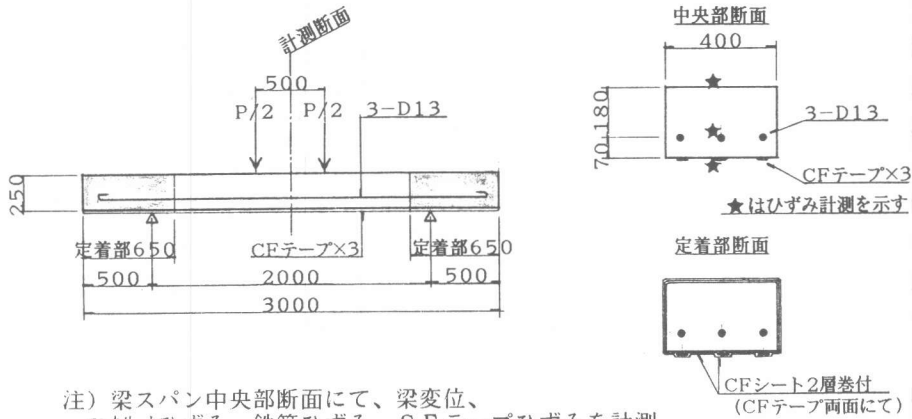
### 2.1 試験体の製作

試験体は鉄筋コンクリート梁部材の引張側縁面に炭素繊維テープを設置して製作した。炭素繊維テープの貼り付けにはエポキシ樹脂系接着剤を使用した。炭素繊維テープの両端部には、炭素

---

\* 1 鹿島建設(株)横浜支店土木部設計課 (正会員)  
 \* 2 日本石油(株)中央技術研究所副主管研究員  
 \* 3 鹿島建設(株)横浜支店土木部設計課課長  
 \* 4 鹿島建設(株)技術研究所第一研究部主管研究員 (正会員)

繊維シートを鉄筋コンクリート梁の表面に巻き付けてその上からテープを貼り、さらにその上から炭素繊維シートを巻き付ける方法により定着を図った。この方法における定着強度は事前に実験を行ない確認した。また、炭素繊維テープに対するプレストレスの導入は行なわなかった。試験体の製作図を図-1に示す。



注) 梁スパン中央部断面にて、梁変位、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、CFテープひずみを計測

図-1 試験体製作図

## 2.2 使用材料

本実験において用いた材料の仕様を表-1に、予備実験に基づく炭素繊維テープの機械的性質を表-2に示す。ここで炭素繊維テープとは、炭素繊維シートを数層(本実験では5層)重ね合わせて互いを接着し、テープ状に裁断して製作したものである。

表-1 使用材料

使用材料	材料試験値
コンクリート	圧縮強度 248 kgf/cm <sup>2</sup>
鉄筋	降伏点強度 3270 kgf/cm <sup>2</sup>

表-2 CFテープの機械的性質

降伏点強度	無し
破断強度	2,700 kgf/本
破断ひずみ	1.01 %
断面寸法	幅2.0cm×厚0.2cm
弾性係数	670,000 kgf/cm <sup>2</sup>

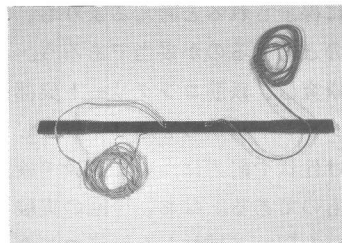


写真-1 炭素繊維テープ

## 2.3 試験体の種類

本実験では、炭素繊維テープのコンクリート面への設置方法を変化させて5体の試験体を用意した。表-3にその内容を示す。

試験体No. 2, 3は炭素繊維テープのコンクリートへの付着の利いたボンド構造を、試験体No. 4, 5

表-3 試験体の種類

No.	炭素繊維テープのコンクリート面への設置方法	試験体モデル
1	CFテープ設置無	無補強試験体
2, 3	CFテープ全面を接着	ボンド構造補強
4, 5	両端定着部を除き接着無	アンボンド構造補強

はコンクリートに対する付着の完全に無いアンボンド構造を、それぞれ想定したものである。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 载荷過程

##### (1) 荷重～変位関係

図-2に荷重と変位（試験体の中央部）の関係を示す。载荷による試験体の変状は、いずれも「コンクリートのひびわれ→鉄筋降伏→（ボンド構造試験体では炭素繊維テープとコンクリートとの付着切れ）→炭素繊維テープの破断→コンクリートの曲げ圧壊」という順序をたどった。

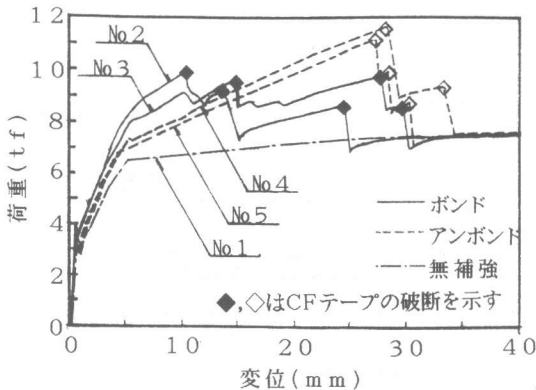


図-2 荷重～変位（試験体中央部）曲線

表-4 降伏時荷重と最大荷重  
(実験値)

No.	荷重 (tf)	
	降伏時	最大荷重
1	6.51	7.70
2	8.83	9.95
3	8.02	9.79
4	7.45	11.68
5	6.88	11.17

##### (2) ボンド構造からアンボンド構造への推移

図-2の荷重～変位曲線のうち、ボンド構造にて製作した試験体No. 3の軌跡に注目すると、変位量＝約5mm以前では同一モデルの試験体No. 2とほぼ一致した軌跡をたどったものの、それ以降大幅にズレはじめた。そして、1本目の炭素繊維テープが破断した後はアンボンド構造の試験体No. 4, 5における炭素繊維テープの2本残置された状態（変位量＝約28mm）に漸近した。これは、載荷重の進行に伴い付着部分に生じる応力が炭素繊維テープとコンクリートとの間の付着強度を上回ったために付着が切れ、アンボンド構造へ推移したことによるものと考えられる。

##### (3) 炭素繊維テープの応力負担状態

荷重～変位曲線（図-2）において炭素繊維テープの破断時期を見ると、試験体No. 2, 3（ボンド構造）はそれが比較的早い（変形量が小さい）時期に生じたが、アンボンド構造の試験体No. 4, 5では部材の変形がかなり進行した時期に発生した。これは、炭素繊維テープの応力はアンボンド構造では平均化されるのに対して、ボンド構造では応力がひびわれ部へ集中することにより炭素繊維テープの破断時期が早くなったものと考えられる。また、図-3に炭素繊維テープのひずみ量と変位の関係を示す。これによると、試験体No. 2, 3（ボンド構造）の方が試験体No. 4, 5（アンボンド構造）に比べて変位に対する抵抗性がある反面、小変形時における炭素繊維テープの応力負担が大きいことを示している。

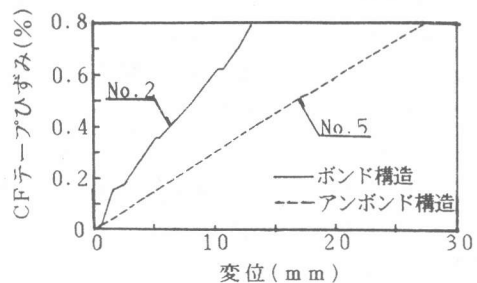


図-3 CFテープひずみ量  
～変位（試験体中央部）曲線

### 3. 2 補強試験体の曲げ耐力

表-4に降伏時の荷重と最大荷重をまとめる。荷重はいずれも無補強試験体より大きく、補強の有意性が確認された。図-2や表-4によれば、弾性範囲での耐力は試験体No. 2, 3（ボンド構造）の方が試験体No. 4, 5（アンボンド構造）よりも優れていた。しかし最大耐力を比較すると試験体No. 4, 5の方が優位であった。なお、本実験により得られた各耐力値は同一条件の場合でばらつきを示しているが、これは炭素繊維テープとコンクリートとの間の付着強度のばらつきがその原因の一つと考えられる。

## 4. 実験値と計算値との比較

### 4. 1 簡易式による計算値との比較

本実験における梁部材の最大耐力について、実験値と簡易式による計算値との比較を行ない、表-5に示した。

#### (1) ボンド構造の耐力

ボンド構造（試験体No. 2, 3）の最大耐力は、最大荷重となる1本目の炭素繊維テープ破断時まではコンクリートに対する付着が利いているものと推定されるので通常のRC理論に準じて算定した。その際、本実験では最大荷重時期と鉄筋降伏時期に大きなズレがなかったことから、鉄筋の強度として

降伏点強度（表-1に示す材料試験値）を、炭素繊維テープの強度として破断強度（表-2に示す試験値）をそれぞれ入力した。

#### (2) アンボンド構造の耐力

アンボンド構造（試験体No. 4, 5）の最大耐力は、秋山らによる提案式[1]により算定した。表-5のとおり、実験値は計算値よりも10%以上大きい値となった。これは、試験体No. 4, 5の計算上の最大荷重は鉄筋の降伏点強度（表-1）と炭素繊維テープの破断強度（表-2）を入力して得たのに対して、実験では鉄筋降伏以降かなり変形の進行した時期に最大荷重が得られており、鉄筋応力が2次勾配領域にあったことによるものと考えられる。

なお、無補強試験体No. 1の実験値と計算値との差は計算値が降伏耐力（鉄筋の強度は降伏強度を入力）を示していることによるものであって、表-4から実験上の降伏耐力=6.51 (tf)であるので、表-5では降伏点で実験値/計算値=1.13と考えるべきである。また、ボンド構造とアンボンド構造の計算値が一致しているのは両者とも炭素繊維テープの破断で最大耐力が決定されたからである。

### 4. 2 フレーム解析による解析値との比較

アンボンド構造の曲げ性状を解析する場合には、平面保持の仮定が成立しないことからRC梁部材とアンボンドケーブル部材（本実験では炭素繊維テープ）とを別の部材として取り扱う必要があり、同時に、コンクリートと鉄筋および炭素繊維テープの材料特性をできるだけ正確に考慮する必要がある[2]。そこで、幾何学的非線形性と材料非線形性とを考慮できる、鹿島開発の複合非線形フレーム解析システム（SLAP）[3]を用いて本実験に対する解析を行なった。材料の応力・ひずみ特性は、コンクリートと鉄筋については[4]に記述される非線形性に準じ、さらにコンクリートの引張強度をも加味した。炭素繊維テープについては線形的性質の材料として、

表-5 最大耐力の比較（実験値と計算値）

No.	最大耐力 (tf)		実験値 /計算値	モデル
	実験値	計算値		
1	7.70	5.75	1.34	無補強
2	9.95	9.87	1.01	ボンド構造
3	9.79	9.87	0.99	〃
4	11.68	9.87	1.18	アンボンド構造
5	11.17	9.87	1.13	〃

初期勾配のまま破断に至るとい  
う特性を入力し  
た。解析の結果  
として、図-4  
および図-5に  
荷重と試験体中  
央部変位との関  
係を示す。ボン  
ド構造、アンボ  
ンド構造ともに  
解析結果は実験

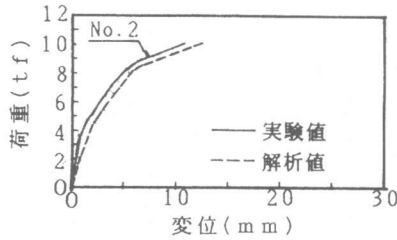


図-4 実験値と解析値の比較  
(ボンド構造)

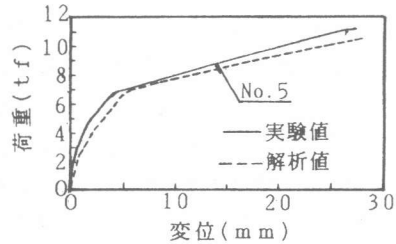


図-5 実験値と解析値の比較  
(アンボンド構造)

注) 図-4、図-5ともCFテープ破断時まで示す

結果に近似しており、補強試験体の曲げ特性の解析について当解析手法が有用性の高いものであることが分かった。

### 5. 設計に関する考察

図-2や表-4に示されるようにボンド構造での耐力とアンボンド構造での耐力に明らかな相違が認められ、降伏時変位の2~3倍の変位領域では前者の耐力の方が優れていることが分かった。しかし、ボンド構造として設計・施工された補強部材であっても、載荷重の進行や地震力のような交番載荷あるいはコンクリートや接着剤の経年劣化などの現象に伴いコンクリートと炭素繊維テープとの間でボンドが切れるとボンド構造がアンボンド構造へと推移することになり、長期的に見て設計時の耐力が保持されなくなることが考えられる。

ここで、耐震設計のように部材の塑性領域での変形性能やじん性を考慮して限界状態における安全性を評価する場合について本実験の結果を考察する。たとえば高圧ガス施設の耐震性に関する設計基準書[5]では、高圧ガスを製造あるいは貯蔵する施設に対して「倒壊や崩壊による大規模な災害が発生しない状態」を限界状態と考え、部材の塑性変形領域におけるエネルギー吸収能力を考慮し、式(1)により規定される最大変形量の範囲で耐荷能力を評価することとしている。

$$\delta_{\max} = \eta' \times \delta_y, \quad D_s = 1 / (2 \eta' - 1)^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 $\delta_{\max}$ :設計上の最大変形量,  $\delta_y$ :降伏変形量,  $\eta'$ :塑性率

$D_s$ :構造特性係数でRC梁部材の場合0.4

これを今回の補強試験体に適用し、 $\delta_{\max} = 3.63 \times \delta_y$  ( $D_s = 0.4$ )の範囲で最大耐力を算定したものが表-6である。この場合でもボンド構造とアンボンド構造の耐力値を比較するとボンド構造の方が優位である。

実験の結果とそれに対する解析値から、ボンド構造およびアンボンド構造の曲げ性状について一般的な特性を模式化すると図-6のようになる。これによると、

式(1)における $\delta_{\max}$ 程度の範囲まではアンボンド構造の耐力が図-6に示す $\alpha$ 分だけボンド構造より劣っている。一方で、アンボンド構造の耐力はこれをはるかに超える領域に至るまで向上し続け、ボンド構造に比べ図-6に示す $\beta$ 分だけ大きな耐力を保有することになる。したがって、

表-6 基準書[5]に基づく最大耐力  
(図-4, 5の解析値より)

補強体 モデル	$\delta_{\max}$ (mm)	最大耐力 (tf)
ボンド構造	20.8	10.2
アンボンド構造	17.4	8.9

長期間におけるコンクリート表面部分の劣化や想定以上の荷重状態による付着切れの現象が避けられないことを考えれば、製作上はボンド構造であっても耐力算定上はアンボンド構造として取り扱うことが妥当な設計方法であると言える。このようにすれば、予想を上回る荷重によりボンド構造がアンボンド構造に推移し  $\delta_{max}$  を超えた場合にも、変位を許しながら耐力が増加するので、構造物の安全性が確保されることになる。

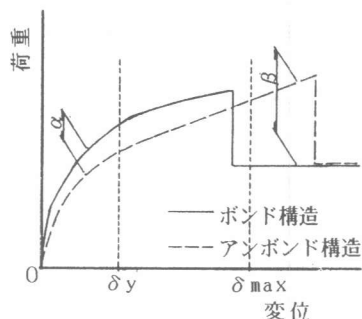


図-6 CFシート補強の曲げ性状(概念図)

## 6. まとめ

本研究は、鉄筋コンクリート梁部材の表面にテープ状に成型された炭素繊維シートを設置することによって曲げ補強を行なった補強試験体に対して載荷試験を実施し、その曲げ性状と耐力について検討したものである。実験はテープ状の炭素繊維シートの設置方法(ボンド構造・アンボンド構造)を変化させた補強試験体を製作して行なった。補強試験体の耐力は無補強の場合に比べ向上しており、補強効果のあることが確認された。また、ボンド構造とアンボンド構造との耐力を比較すると、炭素繊維テープとコンクリートとの付着が利いた範囲内では、ボンド構造の方がアンボンド構造に比べ優位であった。

実際の補強構造物では施工上ボンド構造であっても、コンクリートと炭素繊維シートの付着部分の劣化や予想以上の荷重状態が原因でボンド構造がアンボンド構造へと推移することがあり、設計時には以下の点に配慮することが必要であると考えられる。

- ①：コンクリートと炭素繊維シートとの付着の維持が長期間では保証されないため、アンボンド構造として耐力評価を行なって安全側の設計とするべきである。
- ②：炭素繊維シートあるいは炭素繊維テープによる補強体において、想定以上の荷重条件によりボンド構造がアンボンド構造に推移した場合には、大変形に至るまで耐力が向上し続けるので構造物のエネルギー吸収能力やじん性の面から好ましい傾向となる。
- ③：アンボンド構造は部材の幾何学的非線形性と材料非線形性とを同時に考慮することにより精度良く解析することができる。

最後に、本研究において日石エンジニアリング(株)根岸事業所堀内大義氏をはじめ関係各位より多大なご協力をいただきましたので、ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 秋山 暉・齊藤 宗・奥村一正：新素材を外ケーブルに用いたPC梁の曲げ特性、鹿島技術研究所年報、Vol.42、pp.89-92、1994.10
- [2] 齊藤 宗・森井惇雄・林田道弥・奥村一正：CFRPを用いた外ケーブル部材の曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.1215-1220、1994
- [3] 沖見芳秀・右近八郎：複合非線形フレーム解析システムの開発、土木学会誌、Vol.80、pp.14-17、1995.1
- [4] (社)土木学会：コンクリート標準示方書、平成3年版、設計編
- [5] 神奈川県環境部工業保安課：神奈川県高圧ガス施設等耐震設計基準、付属書、平成5年1月