

## 再生CFRPフープ筋を帯鉄筋とするRC柱の開発

佐々木 智 大 萩 尾 浩 也  
平 田 隆 祥

## Development of RC Column with Recycled CFRP Hoop Ties

Tomohiro Sasaki Hiroyo Hagio  
Takayoshi Hirata

## Abstract

Hydrogen has gained popularity worldwide as an alternative energy source to fossil fuels and hydrogen fuel cell vehicles (FCVs), which runs electricity generated from hydrogen and oxygen, are released. FCVs are equipped with high-pressure hydrogen tanks fabricated from carbon fiber reinforced polymers (CFRP). However, these tanks have limited lifespans owing to regulatory restrictions and require proper disposal after 15 years even without degradation. This study developed an RC column utilizing recycled CFRP hoops from discarded tanks as hoop ties (CFRP column), and its performance was evaluated based on a cyclic loading experiment. The experimental results showed that the flexural and ductility capacities of the CFRP column were equivalent to those of the conventional RC column.

## 概 要

燃焼時に温室効果ガスが発生しない水素に注目が集まっており、水素と酸素を化学反応させて発電した電気で走行する水素燃料電池車(FCV)がすでに市販されている。FCVには使用する水素を貯蔵するためのCFRP製高圧水素タンクが搭載されるが、高圧ガス保安法の制限により、損傷・劣化がなくとも15年で使用できなくなるため、使用後のタンクの適切な処理が必要となる。そこで、本研究では、廃棄予定のCFRP製タンクをそのまま輪切りにしてフープ状に加工した再生CFRPフープ筋が鉄筋の代替として循環利用できないかについて検討するため、再生CFRPフープ筋を帯鉄筋とするRC柱の正負交番載荷実験を行い、その曲げ耐力と変形性能について確認した。その結果、再生CFRPフープ筋を帯鉄筋とするRC柱の曲げ耐力と変形性能は、従来の異形鉄筋を帯鉄筋とするRC柱と同等であり、曲げ耐力と変形性能は、道路橋示方書の手法で適切に評価できることがわかった。今後も炭素繊維の循環社会の確立に向け、継続して検討していきたい。

## 1. はじめに

化石燃料は燃焼時に温室効果ガスを排出することから、カーボンニュートラルの実現に向け、化石燃料の使用量を大幅に削減することが求められている。化石燃料に変わるエネルギー源として、温室効果ガスを排出しない水素に注目が集まっており、水素と酸素を化学反応させて発電した電気で走行する水素燃料電池車(FCV)が開発され、すでに市販されている。また、輸送時のエネルギー削減を目的として、軽量・高強度な炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の自動車・航空機分野での利用が急速に拡大している。

炭素繊維は、密度が鋼材の1/4程度と非常に軽い材料でありながら、一般的な鋼材(SS400材)の10倍以上の強度を持ち、錆びず、化学的・熱的にも安定している優れた材料である。そのため、FCVに搭載される水素タンクは、少ないスペースに大量の水素を貯蔵するために、高耐圧かつ軽量のタンクとなるようにCFRPが用いられる。しかし、このタンクは、高圧ガス保安法の制限により、基本的には損傷・劣化がなくとも15年で使用できなくなるた

め、使用後のタンクの適正な処理が求められる。

炭素繊維は製造時に多大なエネルギーが必要であり、非常に高価にもかかわらず、そのリサイクル技術は確立していないことから、現状は廃CFRP製品を埋め立て処分することが一般的である。資源循環型社会の形成の観点から、炭素繊維のリサイクル技術が求められており、活発に研究開発が進められている。CFRP製品のリサイクルでは、何らかの形で炭素繊維と樹脂に分離して炭素繊維を回収する方法がとられる。樹脂と炭素繊維を分離する方法としては、加熱して樹脂部分を炭化・焼成し繊維を取り出す方法(熱分解法)と、薬品により樹脂部分を溶解させて繊維を取り出す方法(溶解法)などがある。いずれの方法も、処理の過程で繊維が分断されることが多く連続繊維の状態を取り出すことが難しいこと、取り出した炭素繊維(再生炭素繊維)の強度が新品の50~85%程度に低下することから、新品の炭素繊維を再生炭素繊維に置き換えることはできず、普及には至っていない。

そこで、炭素繊維に戻してから再度製品に加工するのではなく、廃棄予定のCFRP製タンクを、その形状や特性を生かしたまま部品に加工して構造物を構築できないか

を考えた。炭素繊維を建設材料に応用する事例は1980年代頃から研究されてきている。例えば、短繊維に加工した炭素繊維をコンクリートに練り混ぜ繊維補強コンクリートとする方法<sup>(例えば2)</sup>、ストランドのままあるいはシート状に加工した炭素繊維を柱や梁に巻き付けて補強する方法<sup>(例えば3)</sup>や、CFRPロッドを補強筋として利用する方法<sup>(例えば4)</sup>、CFRP成形版を部材表面に貼り付けて補強する方法<sup>5)</sup>などがこれまでに実用化されてきた。

本研究では、廃棄予定のCFRP製タンクを、そのまま輪切りにしてフープ状に加工した再生CFRPフープ筋が鉄筋の代替として循環利用できないかについて検討するため、再生CFRPフープ筋を帯鉄筋とするRC柱を製作して正負交番載荷実験を行い、その曲げ耐力と変形性能について確認した。

## 2. 試験体と載荷方法

### 2.1 試験体

Fig. 1に本実験に用いた試験体を、Photo 1に各試験体の配筋状況を、Table 1に試験体の諸元を示す。試験体は2体製作した。いずれもφ400mmの円形断面を有し、載荷点高さ1350mmのRC柱である。また、軸方向鉄筋には通常の異形鉄筋のD19を8本配置した。試験体2体のうち1体は、後述する再生CFRPフープ筋を帯鉄筋としたCF試験体であり、残りの1体は比較用としてSD345の異形鉄筋D16を帯鉄筋とするRC試験体である。いずれの試験体も帯鉄筋は道路橋示方書<sup>8)</sup>の上限値である150mm間隔で配置した。

### 2.2 再生CFRPフープ筋

Photo 2に今回実験に用いた再生CFRPフープ筋を示す。再生CFRPフープ筋は、FCV用CFRP製タンクの円筒部の構造を模倣する内径270mm、厚み21mmのCFRP製円筒パイプをフィラメントワインディング法で製作してから、これを切断加工することで製作した。フィラメントワインディング法とは、あらかじめ樹脂を含浸させた繊維束を、ライナーもしくはマンドレルと呼ばれる型に張力を



(a) CF試験体 (b) RC試験体  
Photo 1 試験体の配筋状況  
Arrangement of Reinforcement

Table 1 試験体諸元  
Specification of Specimens

試験体		CF試験体	RC試験体
載荷点高さ		1350mm	
断面形状		φ 400mm円形	
コンクリート強度		46.6N/mm <sup>2</sup>	41.0N/mm <sup>2</sup>
軸方向鉄筋	径-規格	D19-SD345	
	本数	8	
	引張鉄筋比 $p_t$	0.684%	
	降伏強度 $f_y$	392N/mm <sup>2</sup>	
帯鉄筋	断面-規格	21mm×10mm 再生CFRP	D16-SD345
	配置間隔	150mm	
	体積比 $\rho_s$	2.07%	1.96%
	降伏強度 $f_{sy}$	-	388N/mm <sup>2</sup>
	引張強度 $f_{st}$	470N/mm <sup>2</sup>	568N/mm <sup>2</sup>
	弾性係数 $E_s$	52.3kN/mm <sup>2</sup>	196.1kN/mm <sup>2</sup>
	面積比 $p_w$	0.790%	0.747%
道路橋示方書 <sup>7)</sup> に基づく骨格曲線	拘束応力 $p_w f_{sy}^*$	3.71N/mm <sup>2</sup>	2.90N/mm <sup>2</sup>
	初降伏水平耐力	49.1kN	47.3kN
	終局水平耐力	73.3kN	72.8kN
	初降伏変位	3.7mm	3.7mm
	降伏変位	5.5mm	5.7mm
	限界状態2の水平変位	76.6mm	77.0mm
限界状態3の水平変位	105.7mm	106.2mm	

※CF試験体では破断強度 $f_{st}$ を用いて算出している

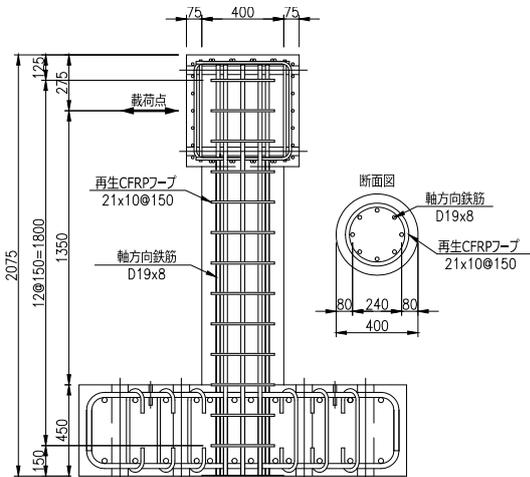


Fig. 1 CF試験体  
CF Specimen



Photo 2 再生CFRPフープ筋  
Recycled CFRP Hoop Tie

かけながら巻き付けて成形した後、熱を加えて樹脂を硬化させて製品を製造する方法<sup>6)</sup>であり、FCV用CFRP製タンクの製造に用いられる方法である。

使用材料には、引張強度4900N/mm<sup>2</sup>、弾性係数230kN/mm<sup>2</sup>の炭素繊維と、熱硬化性のエポキシ樹脂を使用し、繊維量は全体の体積の60%程度となるように調整した。炭素繊維の巻き付け方向は、円筒軸に対して18度、33度、50度、90度とした。炭素繊維の円筒軸に対する巻き付け角度とそれぞれの層厚をTable 2に示す。この巻き付け角度と層厚は、事前に実施した繊維方向の直交異方性を考慮したFEM解析に基づいて設定した。

再生CFRPフープ筋の強度に直接寄与する90度方向に巻き付けた有効炭素繊維量は、全体の断面積の24%である。再生CFRPフープ筋の切断幅は、D16と同等の断面積となるように10mmとした。

Fig. 2に帯鉄筋に用いた再生CFRPフープ筋とD16異形鉄筋の引張試験により得られた応力～ひずみ関係を示す。ここで、CFRPフープ筋はリング形状のまま引張試験を実施するNOLリング試験法<sup>7)</sup>とした。CFRPフープ筋の破断時荷重を断面積で割って求めた引張強度は470N/mm<sup>2</sup>であり、RC試験体に用いたD16帯鉄筋の降伏強度は388N/mm<sup>2</sup>である。Fig. 2より明らかなように、CFRPフープ筋の初期剛性は52.3kN/mm<sup>2</sup>と小さく、異形鉄筋の1/4程度であった。

### 2.3 荷重方法

Photo 3に実験のセットアップを示す。荷重点高さの0.5%に相当する水平変位6.75mmを基準として、これの整数倍の変位振幅を漸増させながら繰り返して与えた。これ以降、実験中に計測した試験体の荷重点高さの変位を水平変位と、水平変位を荷重点高さ1350mmで除した値を変形角と定義する。また、各荷重ステップにおける変位振幅を荷重変位とし、荷重変位を荷重点高さ1350mmで除した値を荷重変形角とする。

ある荷重変位における繰り返し回数は3回とした。なお、本実験は再生CFRPフープ筋の適用可能性を検討するための基礎データの取得を目的としたため、軸力は導入していない。

## 3. 正負交番荷重実験

### 3.1 損傷状況と荷重～変位関係

Photo 4にCF試験体の損傷状況を、Photo 5にRC試験体の損傷状況を示す。ここでは荷重の最初に圧縮側となる面を示している。また、Fig. 3に実験で計測された荷重～変位関係とその包絡線を示す。Fig. 3中には、比較のため、道路橋示方書<sup>8)</sup>に基づき評価した骨格曲線も示している。

CF試験体では、変位10.9mm (変形角0.8%)で軸方向鉄筋が降伏した後、変位19.9mm (変形角1.5%)で正側最大水平力98kNに、変位-34.1mm (変形角-2.5%)で負側最大水平力97kNに達した。その後、荷重変位40.5mm(荷重変形

Table 2 CFRP製タンクの層厚  
Layer Thickness of CFRP Tank

巻き付け角度	層厚
90度	8.4mm
50度	3.8mm
33度	3.8mm
18度	4.6mm
合計	20.6mm

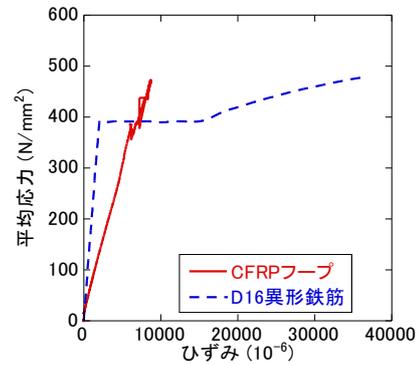


Fig. 2 帯鉄筋の引張試験結果  
Tensile Test of Ties



Photo 3 実験セットアップ  
Experimental Setup

角3.0%)でかぶりコンクリートが剥落しはじめ、安定した履歴ループを描きながら荷重変位67.5mm(荷重変形角5.0%)、図中a点)で基部の軸方向鉄筋が座屈した。最後に、荷重変位94.5mm(荷重変形角7.0%)で軸方向鉄筋が破断し実験を終了した。

RC試験体の場合には、変位9.2mm (変形角0.7%)で軸方向鉄筋が降伏し、変位20.1mm (変形角1.5%)で正側最大水平力96kNに、変位-27.2mm (変形角-2.0%)で負側最大水平力98kNに達した。その後、水平力が最大になった後も、軸方向鉄筋が座屈し始める荷重変位67.5mm (荷重変形角5.0%)、図中b点)までは水平力の急激な低下はない。軸方向鉄筋の座屈後は急激に水平力が低下し、CF試験体よりも早めの荷重変位87.8mm(荷重変形角6.5%)で軸方向鉄筋が破断し実験を終了した。

道路橋示方書の手法で終局耐力を評価すると、73.3～72.8kNである。前述の通り2つの試験体の最大水平力は96



(a) 変形角3.0%



(b) 変形角5.0%



(c) 変形角7.0%

Photo 4 CF試験体の損傷進展状況  
Damage Progress of CF Specimen



(a) 変形角3.0%



(b) 変形角5.0%



(c) 変形角6.5%

Photo 5 RC試験体の損傷進展状況  
Damage Progress of RC Specimen

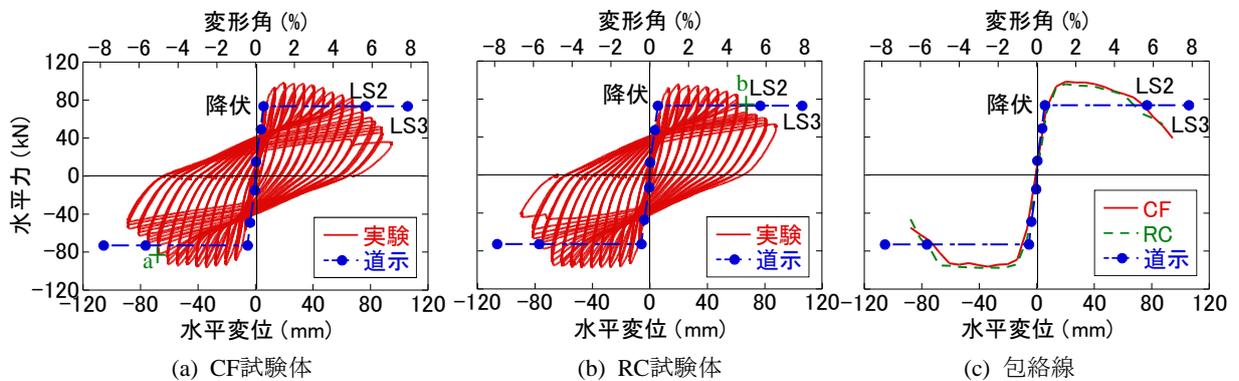


Fig. 3 荷重～変位関係  
Force vs. Displacement Hysteresis

～98kNであり、計算上の終局耐力の1.3倍の曲げ耐力を発揮した。道路橋示方書の手法での終局耐力の計算では、かぶりコンクリートを無視することで安全側に評価しようとするのに対して、実験において最大水平力を発揮したタイミングではかぶりコンクリートが健全であったため、このような差が生じている。

実験ではいずれの試験体も軸方向鉄筋の座屈に伴う水平力の低下が変形角5.0%より始まっており、荷重変形角5.0%の時の3サイクル目の水平力に対する1サイクル目の水平力の比はCF試験体で83.8%、RC試験体で86.4%であった。これらのことから、この変位がおおむね限界状態2に相当すると考えることができ、2つの試験体の変形性能はほぼ同等であるといえる。

なお、道路橋示方書の手法で限界状態2の変位を求めると76.6～77.0mmであり、変形角5.7%に相当する。実験値よりも計算値の方が大きく、危険側の評価となるが、Fig. 3 (c)に示したように、水平力が終局耐力の計算値を下回る変位と限界状態2の変位(LS2の点)は近接しており、道路橋示方書の手法で適切に評価できるといえる。

Fig. 4に等価減衰定数を示す。等価減衰定数 $h_e$ は履歴吸収エネルギー $\Delta W$ と弾性エネルギー $W_E$ の比から次のようにして求められる。

$$h_e = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W_E} \quad (1)$$

ここで、履歴吸収エネルギー $\Delta W$ は各荷重変位の2サイクル目の履歴ループの吸収エネルギーを積分して求めた。また、弾性エネルギー $W_E$ は2サイクル目の履歴ループの最大水平変位と、水平変位が最大となったときの水平力 $F$ から求められる弾性エネルギーとした。

Fig. 4に示すとおり、2つの試験体に大きな差はなく、CF試験体の等価減衰定数は、RC試験体と同等かそれ以上の性能であった。

### 3.2 軸方向鉄筋ひずみ

Fig. 5に最初に引張となる側の最外縁軸方向鉄筋ひずみを示す。少なくとも軸方向鉄筋の座屈が確認された荷重変位67.5mm(変形角5.0%)までは、CF試験体とRC試験体で軸方向鉄筋ひずみの応答に有意な差がないことがわかる。いずれの試験体も荷重変位27.0mm(変形角2.0%)において、柱基部から75mm高さで軸方向鉄筋が塑性化し、続けて荷重変位33.8mm(変形角2.5%)で柱基部から225mmの高さにまで塑性化の範囲が広がっている。荷重変位67.5mm(変形角5.0%)以降は、軸方向鉄筋の座屈により基部から375mmの高さでも塑性化した。

### 3.3 再生CFRPフープ筋および帯鉄筋のひずみ

Fig. 6にCF試験体の再生CFRPフープ筋のひずみとRC試験体の帯鉄筋ひずみを示す。いずれもフープ筋の上面にひずみゲージを1枚貼り付け計測した。Fig. 6(a)に示し

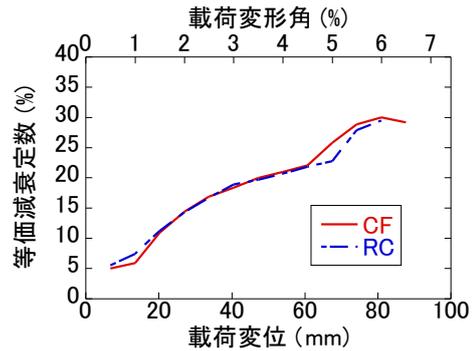
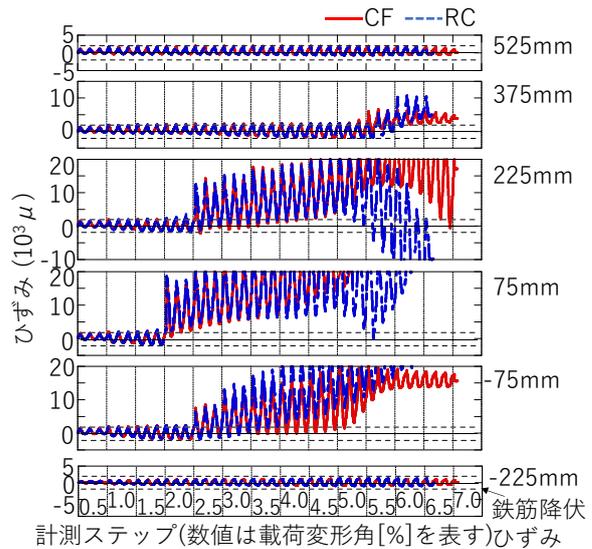


Fig. 4 等価減衰定数  
Equivalent Damping Ratio



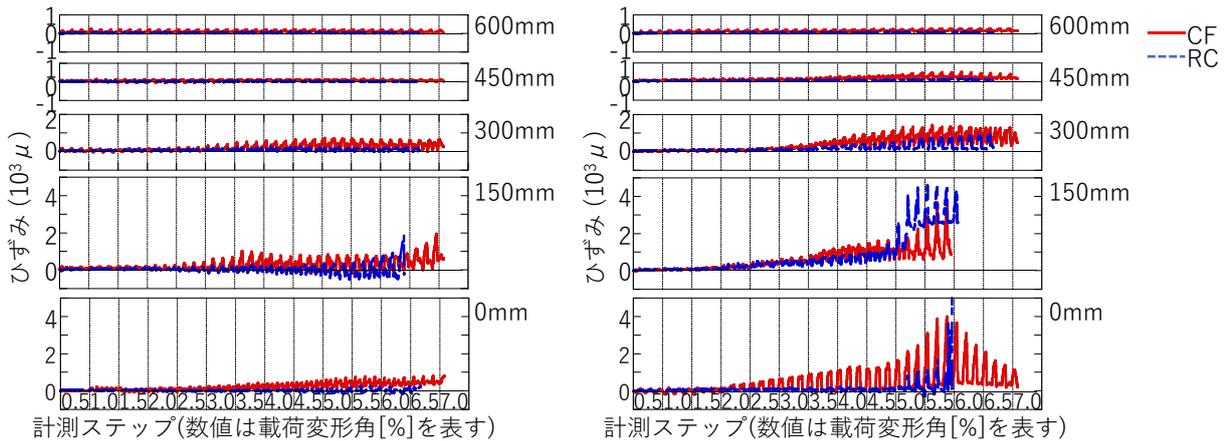
※グラフ右上の数値は柱基部からの高さを示す  
Fig. 5 軸方向鉄筋ひずみ  
Strain of Longitudinal Bars

た荷重方向に平行な方向は、CF試験体の再生CFRPフープ筋のひずみの方が、RC試験体の帯鉄筋ひずみよりも大きめのひずみが計測された。Fig. 2に示したように再生CFRPフープ筋の剛性は小さいため、ひずみが大きくなりやすい傾向にあるといえる。なお、再生CFRPフープ筋は9000 $\mu$ ほどまではほぼ線形弾性の挙動を示していることから、破断まではまだまだ余裕がある。

Fig. 6(b)に示した荷重方向に直交方向は、RC試験体では、軸方向鉄筋が座屈するまでは帯鉄筋にひずみが生じないのに対して、CF試験体では、柱基部の再生CFRPフープ筋のひずみが荷重変位の増加とともに漸増した。

軸方向鉄筋の座屈後はRC試験体の帯鉄筋のひずみは急激に増加して降伏したのに対し、CF試験体の再生CFRPフープ筋は増加が緩やかで最大でも4000 $\mu$ 程度と、破断までは余裕がある結果となった。

CF試験体の再生CFRPフープ筋は、RC試験体の帯鉄筋よりも剛性が小さいため、軸方向鉄筋の座屈によるはらみ出しを拘束する力が弱くなる。そのため、CF試験体の軸方向鉄筋の座屈長は大きめに、RC試験体の軸方向鉄筋



(a) 荷重方向に平行な方向

(b) 荷重方向に直交する方向

Fig. 6 再生CFRPフープ筋(CF試験体)および帯鉄筋(RC試験体)のひずみ  
Strain of Recycled CFRP Hoop Ties in CF Specimen and Ties in RC Specimen

の座屈長は小さめになったと考えられる。座屈長が大きくなると軸方向鉄筋が破断しにくくなるため、軸方向鉄筋が破断した変位が、CF試験体の方が、RC試験体に比較して大きめの値を示したものと考えられる。

#### 4. まとめ

FCV用高圧水素タンクを切断加工して製造した再生CFRPフープ筋を鉄筋の代替として循環利用できないかを検討するため、再生CFRPフープ筋を帯鉄筋とするRC柱の正負交番荷重実験を行った。実験より得られた知見は以下の通りである。

- 1) 再生CFRPフープ筋を帯鉄筋としたCF試験体は、変形角3.0%でかぶりコンクリートが圧壊し始め、変形角5.0%で軸方向鉄筋が座屈し、変形角7.0%で軸方向鉄筋が破断して破壊に至った。この損傷過程は従来の異形鉄筋を帯鉄筋とするRC試験体とほぼ同じであり、再生CFRPフープ筋は従来の鉄筋の代替として利用可能である。
- 2) 軸方向鉄筋破断時の変位は、CF試験体の方がRC試験体に比較して大きくなった。これは、再生CFRPフープ筋の剛性が小さいために、軸方向鉄筋の座屈変形を拘束する力が小さくなった結果、座屈長が大きくなり、軸方向鉄筋が破断しにくくなったためと考えられる。

今回の実験により、これまで埋め立て等で処理するしかなかった使用済みCFRP製タンクを、鉄筋の代替として循環利用できる可能性が見いだされた。今回の実験では再生CFRPフープ筋が十分な性能を発揮する前に実験を終えており、今後再生CFRPフープ筋を用いた構造のせん断耐力を適切に評価する必要がある。

また、FCV用の使用済みCFRP製タンクから製造した場

合、比較的小型の決められた寸法のフープ筋しか製造できない制約がある。実構造に展開するためには、決められた寸法の小型フープ筋を、構築したい任意の断面に合わせて適切に配筋する必要がある。炭素繊維の資源循環型社会の確立に向け、さらなる検討を進めていきたい。

#### 参考文献

- 1) 守富寛：炭素繊維強化複合材料のリサイクル/CFRP廃棄物の再資源化，成形加工，Vol. 30, No. 2, pp. 59-63, 2018
- 2) S. Sarker and M. B. Bailey: Structural properties of carbon fibre reinforced cement, RILEM Symposium 1975, Fibre Reinforced Cement and Concrete, pp. 361-371, 1975
- 3) 勝俣英雄，小島克朗，武田寿一：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－，大林組技術研究所報，No. 33, pp. 67-71, 1986
- 4) 木村耕三，小島克朗，武田寿一：繊維系新素材の構造部材への適用に関する研究（その1）－炭素繊維を補強筋とした曲げ部材実験－，大林組技術研究所報，No. 34, pp. 119-123, 1987
- 5) 木村耕三：炭素繊維強化プラスチック成型板による曲げ補強工法の開発，大林組技術研究所報，No. 59, pp. 37-44, 1999
- 6) 瀬川浄一郎：フィラメントワインディング，高分子，Vol. 19, No. 4, pp. 285-290, 1970
- 7) 北野剛司，更田豊志，笹島栄夫，上塚寛：改良リング引張試験における引張方法と試験片形状の最適化，日本原子力研究所，2001
- 8) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善出版，2017