

# 論文 再生 CFRP フープ筋をインターロッキング配筋した RC 構造に関する研究

佐々木 智大\*1・萩尾 浩也\*2・平田 隆祥\*3

**要旨：**化石燃料に変わるエネルギー源として水素に注目が集まっており、水素燃料電池車が実用化されている。この水素燃料電池車には CFRP 製の高压水素タンクが搭載されるが、このタンクの再利用が課題となっている。そこで本論文では、切断加工してフープ筋として再利用することを提案した。ここで、タンクの外径は土木・建築構造物に対して小さいため、インターロッキング配筋した構造を検討した。正負交番載荷実験に基づき曲げ変形性能を、梁の 4 点曲げ載荷実験に基づきせん断耐力を評価した結果、曲げ変形性能は従来 RC 構造と同等であるが、せん断耐力は修正トラス理論による計算値の 0.7 倍程度に小さいことがわかった。

**キーワード：**CFRP, 水素タンク, リサイクル, 曲げ変形性能, せん断耐力, 載荷実験

## 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。そのため、自動車・航空機分野では、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) の利用が急速に拡大している。また、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直接電気を発電する水素燃料電池車 (FCEV) が開発され、すでに市販されている。

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、FCEV に搭載される水素タンク<sup>例え</sup>は、少ないスペースに大量の水素を貯蔵するために、70MPa もの高压に耐えられ、かつ軽量な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、高压ガス保安法の制限により、基本的には損傷・劣化がない状態であっても 15 年で使用できなくなるため、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。そこで、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。CFRP 製

タンクは高い圧力に耐えられるように円筒形状をしていることから、輪切りにしてフープ状に加工することで補強筋として再利用できることを確認している<sup>2)</sup>。しかし、FCEV 用高压水素タンクは、自動車内部の限られたスペースに組み込む必要があるため、その大きさは土木構造物に適用するには小さい。例えば、乗用車向けのタンクの直径は 299mm である<sup>1)</sup>。

小さいフープ筋で大きな構造物を構築するため、インターロッキング配筋を応用する。インターロッキング配筋とは、複数の円形帯筋あるいはスパイラル筋を部分的に重ね合わせて矩形断面もしくは小判型断面の横補強筋とする配筋構造のことを指す。Tanaka and Park<sup>3)</sup>によって提案された構造であり、従来の矩形に加工した帯鉄筋と中間帯鉄筋を組み合わせた構造に比べ、横拘束筋の量を低減でき、曲げ変形性能に優れているというメリットがある。

本研究では、廃棄予定の CFRP 製高压水素タンクを、そのまま輪切りにしてフープ状に加工した再生 CFRP フープ筋をインターロッキング配筋した RC 構造の曲げ変形性能とせん断耐力を確認することを目的として、正負交番載荷実験およびせん断実験を実施した。なお、本論文は、文献 4) の内容を再構成するとともに、新たな知見としてせん断実験の結果を追加して報告するものである。

## 2. 再生 CFRP フープ筋

### 2.1 CFRP 製高压水素タンクの加工

**写真-1** に本実験に用いたフープ筋を製造するために用いた FCEV 用高压水素タンクを示す。このタンクは、実際に FCEV に搭載されるタンクと同一仕様で使用済

\*1 株式会社大林組 技術研究所構造技術研究部 課長 博(工) (正会員)

\*2 株式会社大林組 技術研究所構造技術研究部 上席研究員 博(工) (正会員)

\*3 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 上級主席技師 博(工) (正会員)



写真-1 FCEV用高圧水素タンク

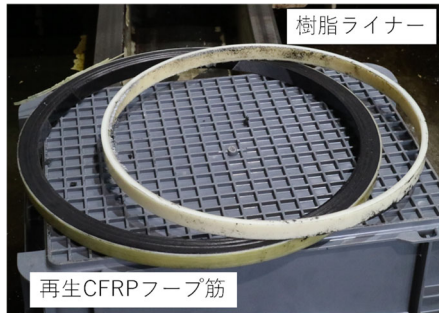


写真-2 再生CFRPフープ筋

みのタンクである。タンクはフィラメントワインディング法<sup>5)</sup>によって、樹脂製ライナーを芯として、エポキシ樹脂を含浸させた炭素繊維を巻き付けて製造している。繊維の巻き付け方向は、タンク軸に直交の方向(フープ方向)の他、タンク軸に対して斜め方向(ヘリカル方向)にも巻き付けている。

タンクの外径は 299mm、炭素繊維層の厚みは 16~17mm 程度であり、外側には、炭素繊維を保護するためのガラスエポキシ繊維の層が薄く配置されている。また、タンクの最も内側には、製造時に芯として用いた樹脂製のライナーが残置されている。

このタンクをバンドソーで所定の厚みとなるように輪切り加工することで、フープ筋(これ以降、再生CFRPフープ筋と呼ぶ)を製造した。写真-2は製造した再生CFRPフープ筋である。なお、本実験では、切断後、厚みを正確に調整することを目的として、旋盤を用いて切断面を削っている。また、最も内側の樹脂製ライナーは除去した。製造された再生CFRPフープ筋は、フープ方向に巻き付けた繊維が主に引張方向の荷重に対して抵抗する繊維であると考えられる。

## 2.2 引張試験

写真-3および図-1に再生CFRPフープ筋の引張試験とその結果の例を示す。ここでは、板状の引張試験片を用意できないため、円形状の形を保ったまま材料を直接引っ張るノルリング試験<sup>6)</sup>とした。引張試験では、試験区間で確実に破断させるため、幅10mm程度に加工した再生CFRPフープ筋の一部を幅 $5 \pm 0.1\text{mm}$ となるようにノッチと呼ばれる切り欠きを設けた(写真-3(b))。

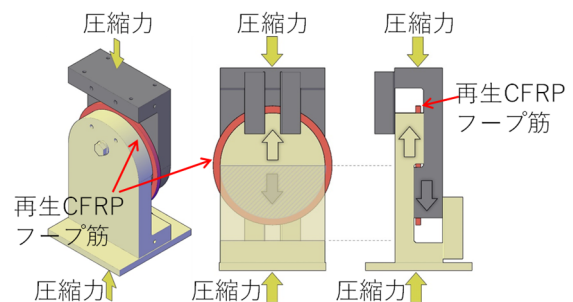


(a) 試験の状況

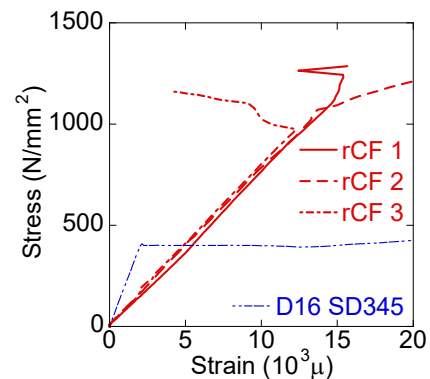


(b) 試験部のノッチ加工

写真-3 再生CFRPフープ筋の引張試験



(a) 引張試験のセットアップ



(b) 平均応力~ひずみ関係

図-1 再生CFRPフープ筋の引張試験のセットアップと試験結果

また、図-1(b)では、試験により得られた荷重を試験前に測定した試験区間の幅と厚みから求めた面積で除した平均応力度を示している。さらに、比較のため、試験対象の再生CFRPフープ筋と断面積が近い径16mmの異形鉄筋D16-SD345の引張試験結果も合わせて示す。また、切り欠き部分の側面にひずみゲージを貼り付け、試験中のひずみを計測した。なお、おおむね10,000 $\mu$ を超える

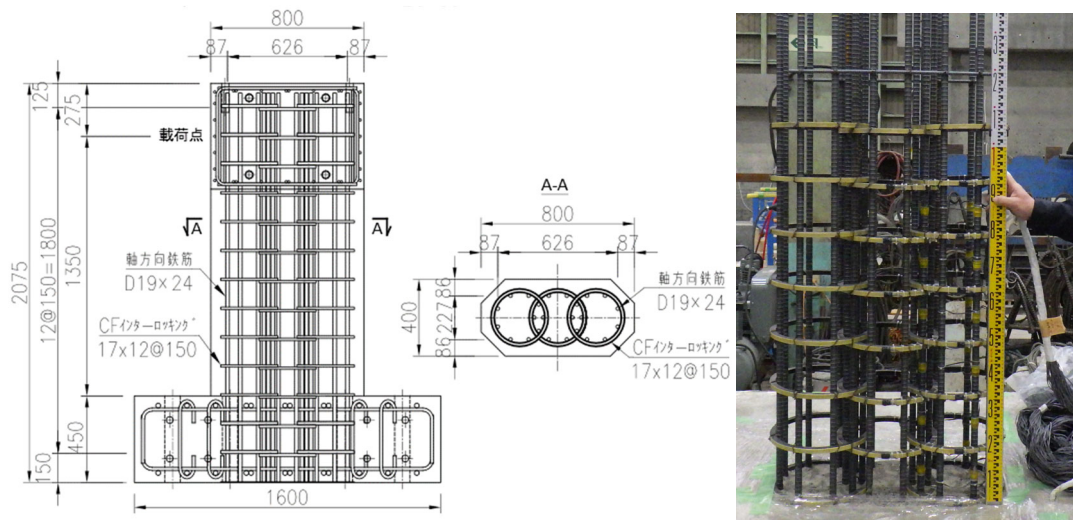


図-2 正負交番載荷実験に用いた曲げ変形性能評価試験体

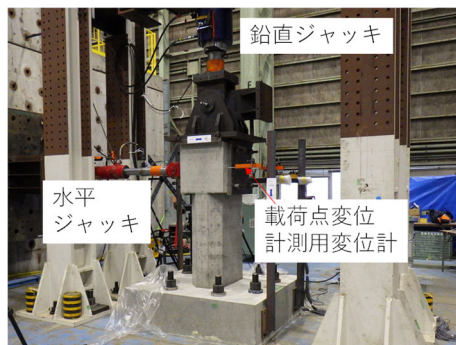


写真-4 実験セットアップ

とひずみゲージが剥がれてしまい、正常に計測できなかったため、ひずみがおおむね  $10,000 \mu$  に達したところまでしか信用できない点に留意されたい。

4 個のタンクから合計 18 本のフープ筋を製造し、引張試験を実施した。図-1(b)にはこの 18 本の結果のうちランダムに 3 本選び結果を示している(図中凡例 rCF1~3)が、他の再生 CFRP フープ筋も同様の結果が得られている。18 本の結果を統計処理すると、平均破断強度は  $1352\text{N/mm}^2$ 、破断強度の標準偏差は  $107\text{N/mm}^2$  であった。5%有意水準で考えると、少なくとも  $1166\text{N/mm}^2$  以上の破断強度であり、おおむね C 種の PC 鋼棒と同等の強度を有する。なお、引張試験を実施した 18 本のフープ筋は全数がノッチ部で破断したことを確認している。

図-1 より明らかなように、再生 CFRP フープ筋の剛性(平均弾性係数)は、鉄筋の弾性係数に比較して小さい。引張応力が破断強度の  $1/3$  に達したときの割線剛性で平均弾性係数を求めると、平均  $78.82\text{kN/mm}^2$ 、標準偏差  $4.98\text{kN/mm}^2$  であった。従来の異形鉄筋のおおむね  $1/3$  程度である。炭素繊維そのものは鋼材とほぼ同等の弾性係数を有するものの、樹脂との複合材料のため、全断面積に対する炭素繊維の断面積が小さくなること、かつ引張方向に抵抗するのはフープ方向のみであるため、引張力に

対して抵抗する有効な繊維量は少ないことから、平均弾性係数は小さくなっている。平均弾性係数を破断強度で除して破断時のひずみを推定すると、約  $17,000 \mu$  である。

### 3. 再生 CFRP フープ筋柱の曲げ変形性能

#### 3.1 試験体

図-2 に正負交番載荷実験に用いた試験体を示す。試験体は 1 体であり、道路橋の橋脚を模擬する試験体として設計・製作した。断面形状は、 $800\text{mm} \times 400\text{mm}$  の矩形で、角から  $125\text{mm}$  を切り落とした八角形である。また、載荷点高さは  $1350\text{mm}$  であり、有効高さに対する比は 4.3 である。コンクリートには、呼び強度 30 の普通コンクリートを用いた。圧縮強度は  $40.0\text{N/mm}^2$ 、弾性係数は  $26.4\text{kN/mm}^2$  であった。軸方向鉄筋には径  $19\text{mm}$  の異形鉄筋を配置した。材料試験に基づく軸方向鉄筋の降伏強度は  $395\text{N/mm}^2$  であった。

試験体の横拘束筋には、幅  $12\text{mm}$  に加工した再生 CFRP フープ筋を使用した。このフープ筋の断面積はおおむね径  $16\text{mm}$  の異形鉄筋の断面積に一致する。このフープ筋を 1 断面あたり 3 本配置した。それぞれのフープ筋の中心間距離は  $200\text{mm}$  とした。また、カリフォルニア州交通局の耐震基準 (Caltrans) に基づき、フープ筋の重ねしる部分には 1 カ所あたり 4 本の軸方向鉄筋 (インターロッキング鉄筋) が配置されるよう、配筋を追加している。このインターロッキング配筋はひび割れ発生後にも適切にフープ間にせん断力を伝達できるようにするために必要とされる鉄筋である。横拘束筋の配置間隔は、有効高さ ( $=314\text{mm}$ ) のおおむね  $1/2$  にあたる  $150\text{mm}$  とした。

#### 3.2 載荷方法

写真-4 に実験のセットアップを示す。載荷点高さ  $1350\text{mm}$  の 0.5% に相当する水平変位  $6.75\text{mm}$  を基準とし

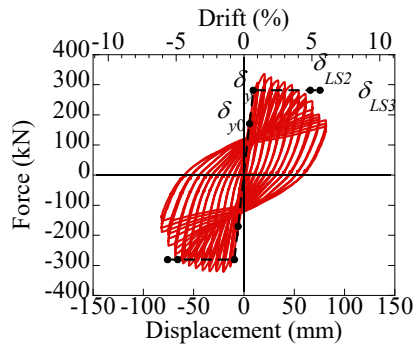


図-3 水平力～水平変位関係

て、これの整数倍の変位振幅を漸増させながら繰り返し与えた。これ以降、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返し回数は 3 回とした。

また、実験に先立ち、試験体天端に一般の道路橋脚の平均的な軸圧縮応力  $1\text{N}/\text{mm}^2$  に相当する  $290\text{kN}$  の鉛直力を作用させた。

### 3.3 曲げ変形性能

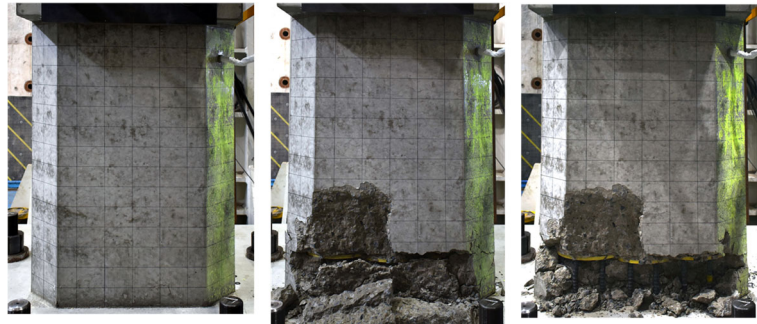
図-3 に CF インターロッキング試験体の実験により得られた荷重点高さの荷重と変位の関係を、写真-5 に損傷の進展状況を示す。なお、図-3 中には、道路橋示方書<sup>8)</sup>に基づいて計算した骨格曲線も合わせて示している。また、図中の  $\delta_{LS2}$ 、 $\delta_{LS3}$  は道路橋示方書で規定されている限界状態 2、限界状態 3 に相当する変位を示している。CF インターロッキング試験体は、荷重変形角 1.0% で軸方向鉄筋が降伏した後、荷重変形角 1.5% で、水平力は最大値  $336\text{kN}$  に達した。その後、荷重変形角 2.0% でかぶりコンクリートの表面が剥落し始めた。さらに荷重変形角を大きくしていくと、荷重変形角が 5.0% の 2 サイクル目でかぶりコンクリートが大きく剥落して、内部の再生 CFRP フープ筋および軸方向鉄筋が露出した。軸方向鉄筋は、鉄筋が局部座屈している。これに合わせ水平力も最大水平力の 60% 程度に大きく低下した。最終的に荷重変形角 6.0% で軸方向鉄筋が破断したため、実験を終了した。かぶりコンクリートが大きく剥落した時を終局と考えると、変位じん性率は 5 であり、再生 CFRP フープ筋のインターロッキング配筋は有効であるといえる。

道路橋示方書の骨格曲線と比較すると、曲げ耐力はおおむね予測できている。また、限界状態 2 に相当する変位でかぶりコンクリートが剥落して水平力が大きく低下した。

## 4. 再生 CFRP フープ筋梁のせん断耐力

### 4.1 試験体

図-4、表-1 にせん断実験に用いた試験体を示す。



(a) 荷重変形角 2.0% (b) 荷重変形角 5.0% (c) 実験終了後  
写真-5 試験体の損傷状況

表-1 には、後述する土木学会コンクリート標準示方書に基づき評価したせん断耐力の計算値  $V_{cal}$ <sup>9)</sup> も合わせて示している。ここで、表中の  $V_c$  はコンクリートが負担するせん断耐力、 $V_s$  は異形鉄筋が負担するせん断耐力、 $V_{CF}$  は再生 CFRP フープ筋が負担するせん断耐力であり、せん断耐力の計算値  $V_{cal}$  はこれらの和で求めた。また、せん断補強筋をインターロッキング配筋した場合のせん断補強筋が負担するせん断耐力の評価については、十分な知見がないことから、 $V_s$ 、 $V_{CF}$  はコンクリート標準示方書に示されている次式を用いて評価することとした。

$$V_s = \frac{A_s f_{sy} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)}{s_s} z \quad (1)$$

$$V_{CF} = \frac{A_{CF} f_{CFy} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)}{s_s} z \quad (2)$$

ここで、 $A_s$  は区間  $s_s$  におけるせん断補強筋として配置した異形鉄筋の総断面積、 $A_{CF}$  は区間  $s_s$  における再生 CFRP フープ筋の総断面積とし、ここではそれぞれ D16 異形鉄筋、再生 CFRP フープ筋の 1 本あたりの断面積の 2 倍とした。また、 $f_{sy}$  は D16 異形鉄筋の降伏強度、 $f_{CFy}$  は再生 CFRP フープ筋の破断強度、 $\alpha_s$ 、 $s_s$  はそれぞれせん断補強筋の配置角度、配置間隔、 $z$  は引張側主鉄筋から圧縮応力の合力の作用位置までの距離であり、 $d$  を有効高さとして  $z = d/1.15$  とした。

試験体は 3 体製作した。1 体は通常の異形鉄筋をフープ状に加工してせん断補強筋とした梁 (No.1) であり、残る 2 体は再生 CFRP フープ筋をせん断補強筋とした梁 (No.2 および No.3) である。断面形状はいずれも幅  $1100\text{mm}$ 、断面高さ  $800\text{mm}$  の矩形である。また、せん断実験は 4 点荷重とし、荷重点間距離は  $500\text{mm}$ 、荷重点-支点間距離は  $2000\text{mm}$  である。引張側軸方向鉄筋には径  $36\text{mm}$  の異形 PC 鋼棒を 20 本、圧縮側軸方向鉄筋には径  $29\text{mm}$  の異形鉄筋を 10 本配置した。せん断補強筋は断面中央にインターロッキング配筋した。1 つの断面あたり 3 本のフープ筋で構成し、各フープ筋の中心間距離は  $200\text{mm}$  である。せん断補強筋の配置間隔は、試験体 No.1 は  $105\text{mm}$ 、試験体 No.2 は  $200\text{mm}$ 、試験体

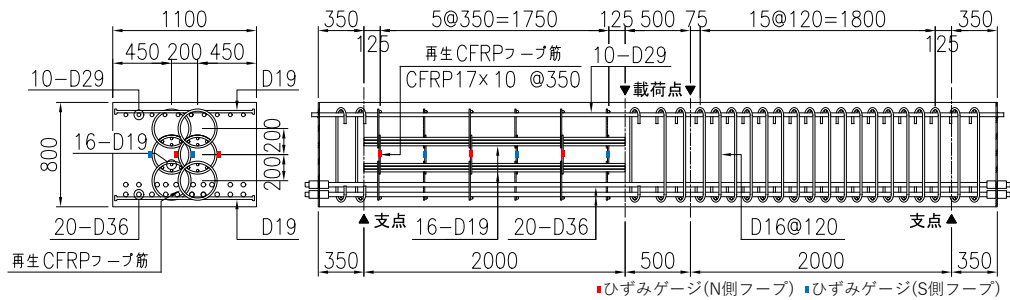


図-4 せん断実験に用いたせん断耐力評価試験体 (No. 3)

表-1 せん断実験試験体一覧

	断面	軸方向鉄筋		せん断補強筋			せん断耐力の計算値		
		引張側	圧縮側	種別	間隔	鉄筋比 $p_w$	$V_c$	$V_s, V_{CF}$	$V_{cal}$
No.1	1.1m × 1.8m	20-D36 $f_y=1185\text{MPa}$	10-D19 $f_y=345\text{MPa}$	2-D19 異形鉄筋 $f_y=395\text{MPa}$	105mm	0.344%	910kN	916kN	1826kN
No.2				2-再生 CFRP フープ筋 $f_t=1352\text{MPa}$	200mm	0.148%	918kN	1353kN	2271kN
No.3				350mm	0.085%	919kN	773kN	1692kN	

No.3 は 350mm とした。なお、2 章に示した再生 CFRP フープ筋の破断強度は異形鉄筋 SD345 の 3.4 倍であり、試験体 No.1 のせん断補強筋の配置間隔は、No.1 と No.3 のせん断耐力の計算値がほぼ同等となるよう決めた。

#### 4.2 せん断耐力

図-5 にせん断実験で得られた荷重～変位履歴を、写真-6 に実験後の試験体の損傷状況を示す。また、図-6 にせん断力が最大となったときの、1 断面 3 本あるフープ筋のうち中段に配置したせん断補強筋のひずみを示す。いずれの試験体もまずは作用せん断力がコンクリートが負担できるせん断耐力  $V_c$  に相当する約 900kN に達すると支点から載荷点に向けて斜めひび割れが生じる。ここで、再生 CFRP フープ筋を用いた試験体 No.2, No.3 では、斜めひび割れ発生と同時に斜めひび割れが大きく開いたため、せん断力がわずかに低下した。これに対して異形鉄筋を用いた試験体 No.1 は、他の試験体に比較して配筋量が多いことから、ひび割れの開きが抑えられている。斜めひび割れの開きについて若干の違いはあるが、その後は、いずれの試験体も斜めひび割れが大きく進展し、載荷点に達するとせん断力は最大となり、その後せん断力が大きく低下して破壊した。

各試験体のせん断耐力の実験値を、図-5 に示したせん断力の最大値として求めると、試験体 No.1 は 2150kN、試験体 No.2 は 1594kN、試験体 No.3 は 1320kN であった。これに対し、修正トラス理論に基づき、コンクリート標準示方書の方法で求めたせん断耐力の計算値は、試験体 No.1 は 1826kN、試験体 No.2 は 2271kN、試験体 No.3 は 1692kN である。従来の異形鉄筋を用いた試験体 No.1 のせん断耐力は、実験値の方が計算値よりも 1.18 倍大きくなっており、せん断耐力評価式のばらつきを考えればおおむね妥当な結果が得られている。図-6(a)に示した

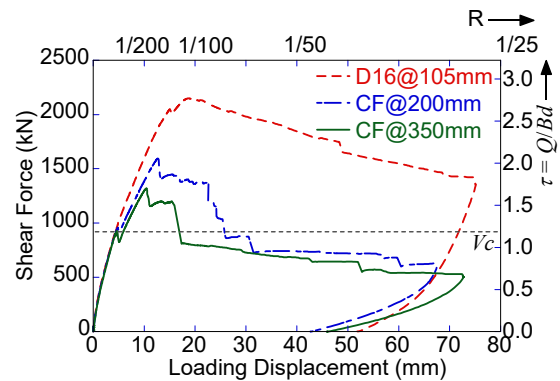
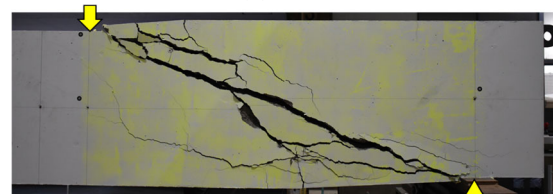


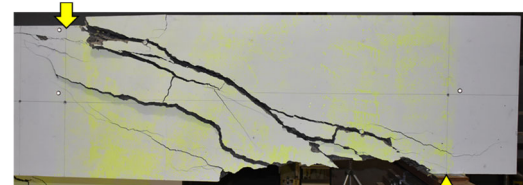
図-5 せん断力～載荷点変位関係



(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No. 3

写真-6 せん断実験の損傷状況

試験体 No.1 のせん断補強筋ひずみにおいても、複数のせん断補強筋の降伏が確認でき、せん断耐力計算式で想

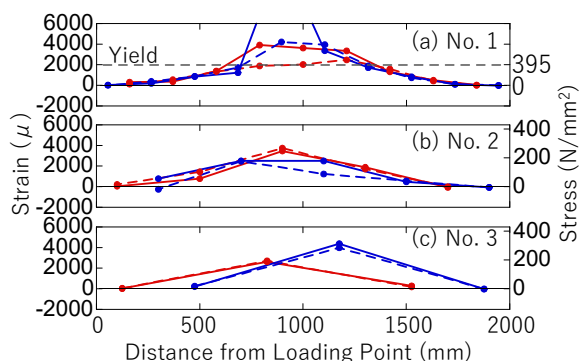


図-6 最大せん断力時のせん断補強筋ひずみ分布

定されている状態にあると言える。

一方、再生 CFRP フープ筋を用いた試験体 No.2, No.3 では、実験値は計算値の 0.70~0.78 倍と計算値に比較して有意に小さくなっている。ここで、せん断耐力の計算値は、再生 CFRP フープ筋の破断強度まで抵抗としたトラス機構の成立を仮定して求めた。しかし、図-6(b)および(c)に示した試験体 No.2 および 3 のせん断補強筋ひずみによると、せん断補強筋のひずみは最大 4000  $\mu$  程度と 2 章に示した破断時のひずみ 14000  $\mu$  の 30%程度しかない結果となった。このひずみに 2 章に示した平均弾性係数を乗ずると 315N/mm<sup>2</sup> の応力に相当する。つまり、従来の異形鉄筋の降伏強度と同等以下の作用応力で破壊に至っていることとなる。再生 CFRP フープ筋の弾性係数は異形鉄筋に比較して 1/4 程度と小さく変形しやすいことから、斜めひび割れが過大に開き、骨材のかみ合わせ抵抗、引張鉄筋のほぞ作用によって伝達されるせん断力が低下したことが要因と考えられる。

## 5. まとめ

水素燃料電池車(FCEV)に用いられる CFRP 製高圧水素タンクを切断することで再生 CFRP フープ筋を製造する方法を提案し、RC 構造の横拘束筋、せん断補強筋としてインターロッキング配筋した場合の曲げ変形性能とせん断耐力を載荷実験に基づき評価した。その結果得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 再生 CFRP フープ筋をインターロッキング配筋した RC 柱に対して、正負交番載荷を行った結果得られた終局変位は、変位じん性率で 5 であり、道路橋示方書で規定される限界状態 2 における変位の制限値とおおむね一致した。再生 CFRP フープ筋は有効に機能し、従来の異形鉄筋を用いた RC 柱と同等の性能を有していると考えられる。
- (2) 再生 CFRP フープ筋をインターロッキング配筋してせん断補強筋とした RC 梁に対して行った 4 点曲げ載荷実験の結果、再生 CFRP フープ筋が破断前にせん断破壊し、せん断力が低下した。せん断力の最大

値はコンクリート標準示方書の方法で求めたせん断耐力の 0.70~0.78 倍となった。再生 CFRP フープ筋に作用するひずみから作用応力を推定すると 315N/mm<sup>2</sup> 程度であり、従来の異形鉄筋の降伏強度と同等以下の応力レベルまでしか負担していなかった。再生 CFRP フープ筋の弾性係数が小さく斜めひび割れが過大に開き、せん断耐力が低下したと考えられる。

以上の結果から、今回提案の再生 CFRP フープ筋は、従来の異形鉄筋と置き換えは可能であることが示唆された。ただし、再生 CFRP フープ筋中の炭素繊維の高い強度を有効に活用するためには、今後さらなる研究が必要である。

## 謝辞

実験に使用した FCEV 用高圧水素タンクはトヨタ自動車株式会社より提供いただいた。ここに記してお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) トヨタ自動車株式会社：TOYOTA fuelcells Technology, <https://www.toyota.co.jp/fuelcells/jp/technology.html> (2024年6月3日アクセス)
- 2) 佐々木智大, 萩尾浩也, 平田隆祥, 野村敏雄：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, 第 26 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.193-198, 2023
- 3) Tanaka, H. and Park, R.: Use of Interlocking Spirals for Transverse Reinforcement in Bridge Columns, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand, 1990
- 4) 佐々木智大, 萩尾浩也, 平田隆祥：再生 CFRP フープ筋をインターロッキング配筋した RC 構造の正負交番載荷実験, 第 27 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.333-338, 2024
- 5) 田部井清, 田尻邦夫：フィラメントワインディング成型とその応用, 繊維と工業, Vol. 1, No. 6, pp.337-342, 1968
- 6) 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
- 7) Caltrans: Caltrans Seismic Design Criteria Ver. 2.0, Department of Transportation, State of California, 2019.
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2017
- 9) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, 2022