

道路政策の質の向上に資する技術研究開発  
成 果 報 告 レ ポ ー ト  
N o . 2022-6

研究テーマ

リサイクル炭素繊維のコンクリート構造物用補強材への応用

研究代表者：岐阜大学教授 國枝 稔  
共同研究者：岐阜大学名誉教授 守富 寛

令和 7 年 6 月

新道路技術会議

## 目次

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 研 究 概 要 .....                              | 3  |
| 第 1 章 はじめに.....                            | 5  |
| 1.1 コンクリート構造物の補修・補強への CFRP の適用.....        | 5  |
| 1.2 CFRP を取り巻く社会的背景 .....                  | 5  |
| 1.3 リサイクル炭素繊維の現状.....                      | 5  |
| 1.4 本研究開発の目的と内容.....                       | 6  |
| 第 2 章 スtrand 接合および樹脂含浸技術の自動化.....          | 8  |
| 2.1 概要 .....                               | 8  |
| 2.2 接合方法.....                              | 8  |
| 2.3 樹脂含浸.....                              | 10 |
| 第 3 章 接合部を有するリサイクル炭素繊維strandの引張特性の評価 ..... | 12 |
| 3.1 概要 .....                               | 12 |
| 3.2 strandの引張試験.....                       | 12 |
| 3.3 ホットプレス後のstrandの引張試験.....               | 14 |
| 3.4 疲労に関する基礎検討.....                        | 15 |
| 第 4 章 ネット状補強材の開発.....                      | 17 |
| 4.1 概要 .....                               | 17 |
| 4.2 ネット状補強材の作製方法の検討.....                   | 17 |
| 第 5 章 はり部材を用いた補強効果の確認.....                 | 19 |
| 5.1 概要 .....                               | 19 |
| 5.2 実験概要.....                              | 19 |
| 5.3 実験結果.....                              | 19 |
| 第 6 章 小規模橋梁上面増厚補修への適用.....                 | 21 |
| 6.1 概要 .....                               | 21 |
| 6.2 補修の考え方.....                            | 21 |
| 6.3 施工手順.....                              | 22 |
| 第 7 章 まとめ .....                            | 23 |
| 7.1 まとめと今後の課題.....                         | 23 |
| 7.2 謝辞 .....                               | 23 |
| 参考文献 .....                                 | 23 |

## 「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」（令和 4 年度採択）

## 研究概要

| 番号        | 研究課題名                       | 研究代表者        |
|-----------|-----------------------------|--------------|
| No.2022-6 | リサイクル炭素繊維のコンクリート構造物用補強材への応用 | 岐阜大学 教授 國枝 稔 |

CFRP の廃材から回収されたリサイクル炭素繊維の有効利用により社会に貢献するとともに、補修されたコンクリート構造物の長寿命化を実現するために、リサイクル炭素繊維を接合し、樹脂含浸したうえでネット状に加工する技術を開発し、さらには小規模橋梁の上面増厚補修の目地部などに適用することで、その施工性を確認する研究開発。

## 1. 研究の背景や動機、目的および目標等

自動車や航空機産業などにおいて、軽量かつ高強度、高耐久などの特徴を活かした炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の利活用が加速化している。一方で、耐久消費財としての寿命は短く、今後大量の CFRP 廃材が排出されることが懸念されており、そのリサイクルが社会課題でもあることから、道路分野として、この社会課題に貢献できることが望ましい。CFRP の道路分野での活用に関しては、日本では耐震補強への適用が一般的であるが、補修されたコンクリート構造物の長寿命化を図ることで、環境負荷低減ならびに耐久性向上が両立できる。

本研究開発では、他分野から排出された CFRP 廃材からリサイクル炭素繊維（ReCF）を回収し、それを接合、樹脂含浸およびネット状に加工することで、コンクリート構造物用の補強材としての活用を試みた。

## 2. 研究内容

本研究開発は、①ストランド接合技術の開発、②樹脂含浸技術の開発、③ネット状補強材の開発、の各フェーズから構成される。①については、熱処理した有限長さの CFRP 廃材を裁断し、両端を解熱した後に、スプライサーにより連続的に接合する方法を検討した。②については、コンクリートとの接着性ならびにネット状に加工する際の交点の接着性を考慮し、SBR と PE の混合液を含浸させ、強度試験によりストランドの引張試験を実施した。③については、ホットプレスを用いてネット状の補強材を作製し、作製したネット状補強材を用いて小規模橋梁の上面増厚補修の目地部等に適用し、その施工性も確認した。

## 3. 研究成果

## ①ストランド接合技術の開発

図-1 に示すようなスプライサーを開発し、連続的なストランドを作製することに成功した。さらに、補強材量ならびに強度を確保するために 3 本のストランドを用いて三つ編みの ReCF を作製することに成功した（図-2 参照）。

## ②樹脂含浸技術の開発

コンクリートとの接着性ならびにネット状に加工する際の交点の接着性向上を目的に、樹脂含浸を行った。接合し連続化したストランドをトレイに入れた樹脂に約 15 秒間浸し、その後複数個のローラーによって余分な樹脂を取り除くとともに、乾燥チューブにて熱乾燥（約 130℃）を約 1 分、その後室内にて自然乾燥を約 20 分した上でボビンに巻き取った。

図-3 に示すように引張試験によりストランドの強度を確認したところ、樹脂含浸により強度が向上すること、バージン材と混合することで強度が向上し、ばらつきを小さくすることができた。

## ③ネット状補強材の開発

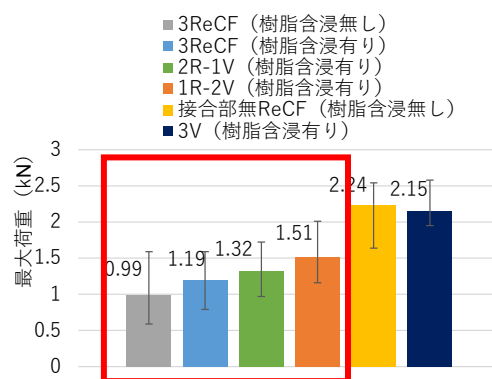
パッチ式のホットプレスを用いて図-4 に示すようなネット状補強材を作製するとともに、図-5 に示すように小規模橋梁の上面増厚補修の目地部などに適用できることを明らかにした。



図-1 スプライサー



図-2 ストランド



本研究開発の対象

図-3 引張強度試験結果



図-4 ネット状補強材 (ホットプレス後)



図-5 上面増厚補修後の橋梁

#### 4. 主な発表論文

- (1)Hewei XU, **Minoru KUNIEDA**, Hiroshi MORITOMI:Tensile Property of Recycled Carbon Fiber Strand for Concrete Reinforcement, 11th International Conference on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering, Brazil, pp.266-275, 2023(査読あり)
- (2)Hewei XU, **國枝 稔**,守富 寛 : 接合部を有するリサイクル炭素繊維ストランドの引張特性の評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, pp. 1-6, 2023(査読あり)
- (3)Hewei XU, 栗田 将暢,**國枝 稔**,守富 寛 : 接合部を有するリサイクル炭素繊維ストランドの引張耐力評価, コンクリート工学年次論文集, pp. 1567-1572, 2024(査読あり)

#### 5. 今後の展望

本研究開発による ReCF ストランドは, その太さに制約があり補強効果は D6 鉄筋程度であるが, その高い耐腐食性により, かぶりの小さな補修部や塩害等の環境条件が厳しい部位への適用が期待できる. 一方, 量産できる装置の開発やコスト試算などを引き続き検討することが必要である.

#### 6. 道路政策の質の向上への寄与

近年, 補修の再劣化という課題に対して, 補修された構造物の長寿命化が必須であることから, 耐腐食性の高い補強材の活用が必要である. また, 道路構造物の性能確保に関して, 安全性のみならず環境性の側面での検討が今後は必要となり, かつ社会貢献できる技術として期待できる.

#### 7. ホームページ等

特になし

# 第1章 はじめに

## 1.1 コンクリート構造物の補修・補強への CFRP の適用

鉄筋コンクリート中の鉄筋が腐食すると、かぶりコンクリートにひび割れが生じることが知られている。今後建設される構造物や補修・補強される構造物においてはその劣化に対する抵抗性を高め長寿命化させる対策が施される必要がある。鉄筋腐食という弱点を改善するために1980年代以降、鉄よりも高耐腐食性かつ高強度の複合材料であるグリットやシート状のCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) をコンクリートの補強材としての適用する試みも検討されてきたが、CFRPは高価であり、土木分野での普及が進んでいないのが現状である。

コンクリート構造物の補修、補強の分野において利用される炭素繊維は炭素繊維シート、またはグリッド筋などが多い。海外では図-1.1のようなネット状の補強材を用いて補強した部材である Textile Reinforced Concrete(TRC)として研究および適用事例も多い。特に、薄肉部材の補強材としての利用事例も多く、例えば補修等での利用において TRC の優位性が発揮されると考えられる。

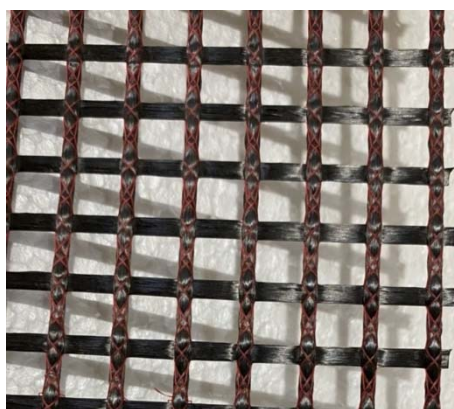


図-1.1 TRC に用いられる炭素繊維ネットの例

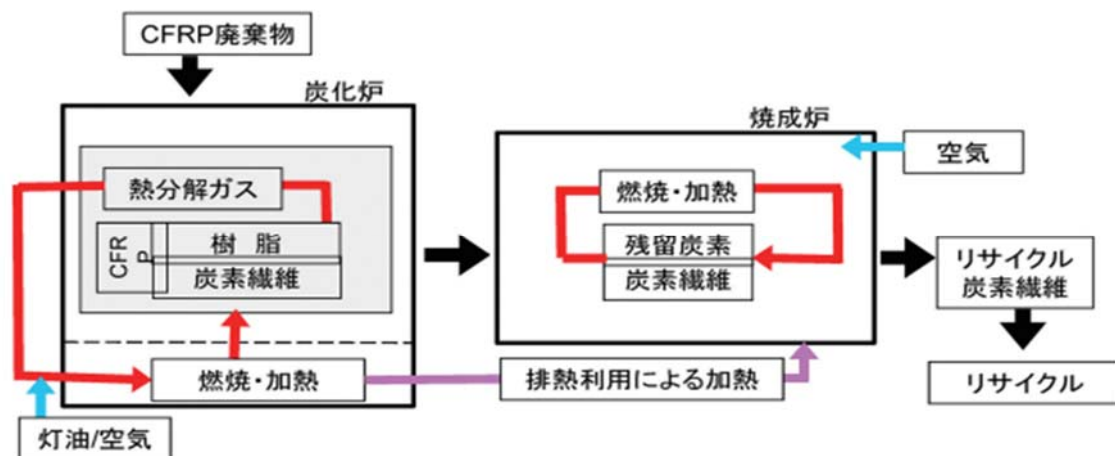
## 1.2 CFRP を取り巻く社会的背景

CFRP は鉄やアルミなどの代わりとして航空機や自動車に積極的に使用されている。近い将来 CFRP が廃棄物として大量に発生することが想定される。経済産業省によれば<sup>1)</sup>、米国では毎年約1800トンのCFRP 廃材が発生し、日本は今後大量の CFRP を使用する計画があり、年間50~100トンのCFRP 廃材が発生する可能性がある。特に日本国内では燃料電池車の水素タンクの廃棄や、洋上風力のブレードの廃棄など、近い将来大量の CFRP 廃材の排出が懸念され、それらを有効利用することが大きな課題となっている<sup>2)</sup>。

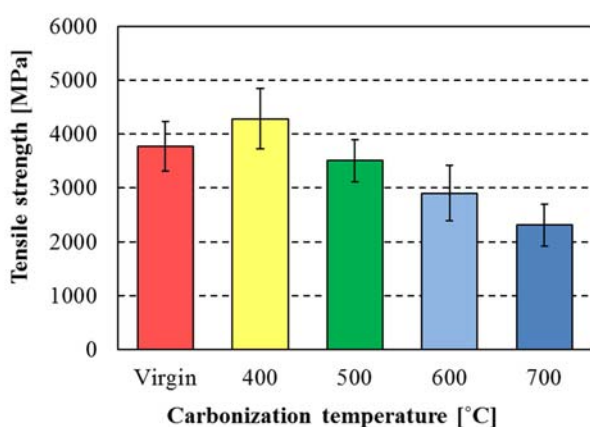
## 1.3 リサイクル炭素繊維の現状

CFRP のリサイクル技術に関しては、裁断された CFRP 端材の樹脂を焼却し、不織布として再構成して製品を作る取組みがある。さらに、CFRP の部材をそのまま焼成し、長さ数十センチの炭素繊維を取り出す技術開発も進められている<sup>3)</sup>。CFRP から ReCF を取り出す技術として熱分解、ソルボリシス（薬剤による溶解処理）、電解酸化などがあり、一例として、守富ら<sup>4)</sup>の開発した二段階熱分解法を紹介する。CFRP は炭素繊維 (CF) と樹脂から構成されるが、この樹脂を CFRP から除去する方法として炭化処理及び焼成処理という二段階熱分解法である（図-1.2 参照）。当該技術により、長繊維化のまま ReCF を回収でき、焼成温度の増加とともに ReCF の残留炭素が消失していき、550℃で完全に除去可能である（図-1.3 参照）。二段階熱処理法で回収した ReCF では引張強度はバージン材と比べて85%を維持しており、焼成温度が高くなるにつれ強度低下していることがわかる。引張弾性率には、焼成条件の違いによる変化がみられない。

ReCF の有効利用という視点で、裁断された ReCF をコンクリートの短繊維として使用する検討も行われ



図－1.2 熱処理の概念図<sup>3)</sup>



図－1.3 熱処理条件の違いによる引張強度<sup>3)</sup>

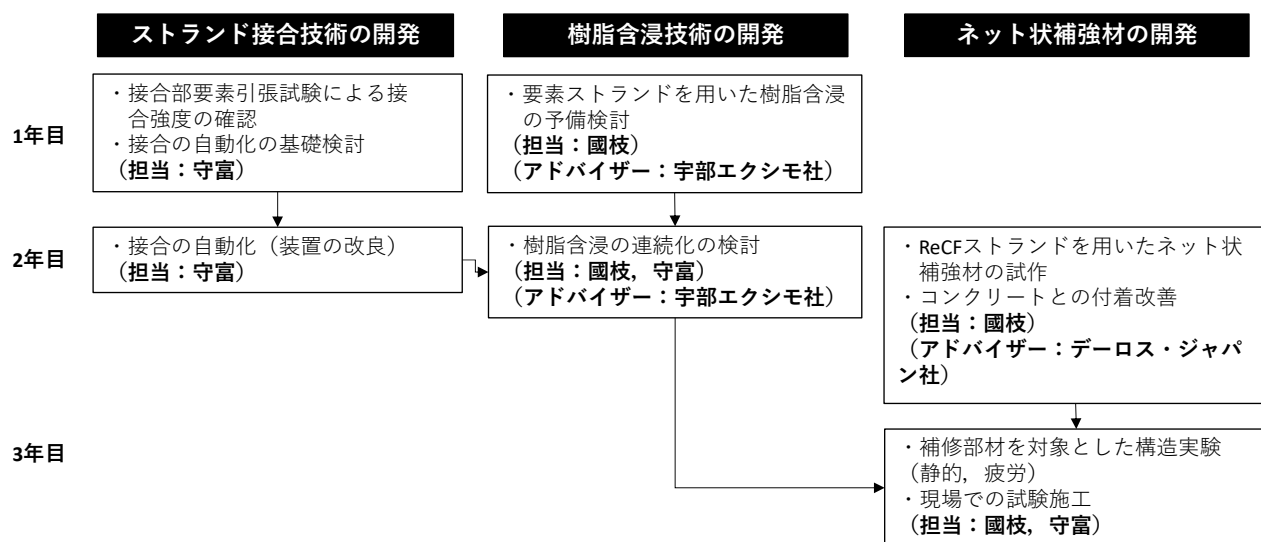
ている。北川ら<sup>5)</sup>の研究により、鉄筋コンクリート中に ReCF の短繊維を混入すると、ReCF を混入したことによりワーカビリティが低下し、コンクリートの緻密性が失われ多くの水分が含浸したことや、ReCF が連続的な回路を形成し、比抵抗が著しく低下

したため腐食電流が流れやすくなったことにより、併用した鉄筋の腐食を速めてしまう可能性がある。また、施工する際に ReCF の粉塵が空中を飛散するなどの課題も指摘されている。

このように現時点においてインフラ分野での短繊維として ReCF の適用は難しいことが明らかであり、接合して出来るだけ長い繊維状にすることが必須であるといえる。

#### 1.4 本研究開発の目的と内容

以上のような背景に鑑み、本研究開発は、図－1.4 に示すように、①ストランド接合技術の開発、②樹脂含浸技術の開発、③ネット状補強材の開発、の各フェーズから構成される。1 年目、2 年目においては、特にストランドの作製およびその製造の連続化を目標として設定し、3 年目のネット状補強材の製造および現場での適用検証に向けて検討を進めることとし、回収された ReCF からネット状補強材を橋梁の上面増厚に適用する段階まで進めることを目標とする。



図－1.4 本研究開発の全体計画と年度計画

## 第2章 スtrand接合および樹脂含浸技術の自動化

### 2.1 概要

ここでは ReCF のstrandを接合するにあたり、スプライサーと三つ編みを自動化するシステムを構築した。さらに、接合したstrandに樹脂含浸するシステムを構築した。

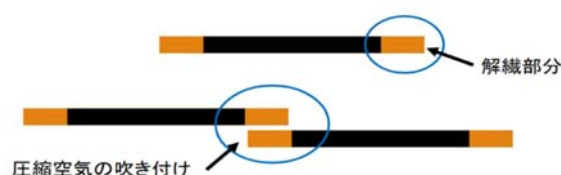
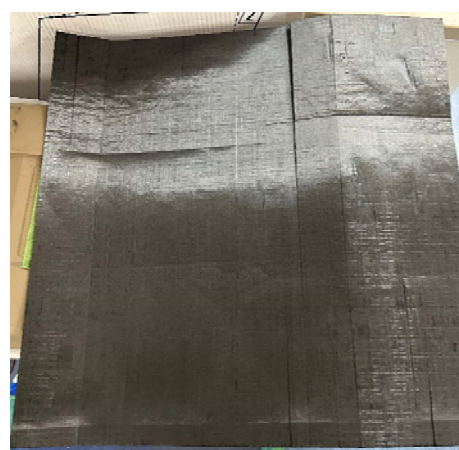


図-2.1 スプライサーによる接合の概念図

### 2.2 接合方法

本研究開発で ReCF を接合する際の概念図を図-2.1 に、実施した長繊維化の流れと開発したシステムを図-2.2～2.4 に示す。本研究開発では、50×50cm のCFRP シート廃材を対象とした(図-2.2)。このシートは5層構造であり、それぞれの層を剥離し、かつ約5mm幅に裁断したものを作製した(図-2.2)。なお、ここまでの段階は対象とする ReCF の種類によって異なることから自動化していない。幅5mm、長さ50cmのReCFを接合するために、図-2.3に示す装置を用いて両端約50mmを焼成することで解燃した。続いて、図-2.4に示すスプライサーを用いて結合した。スプライサーの構造として、2本のReCFの解燃された部分を重ね合わせるように送り、両端を電磁石を用いて固定した後、重ねた部分に向けて高圧空気を吹きかけることでReCFを絡ませながら結合し、ボビンに巻き取った。続いて結合されたReCFstrand3本を用いて図-2.4を用いて三つ編みを行うとともに、ボビンに巻き取った。図-2.5に三つ編みしたstrandの拡大写真を、図-2.6にボビンに巻き取った状態をそれぞれ示す。なお、図-2.6のリサイクル率とは、三つ編みする3本のstrandが全てReCFの場合をリサイクル率100%と定義し、3本のうち1本をバージン材に置換したものをリサイクル率66%、3本のうち2本をバージン材に置換したものをリサイクル率33%として作製したものである。

以上のように、当該システムを用いて、三つ編みReCFを連続的に製造することが可能となった。



(a)回収されたCFRP (50cm×50cm)



(b)幅約5mmに切断したReCF

図-2.2 対象とするReCF



(c) 両端を焼成する装置

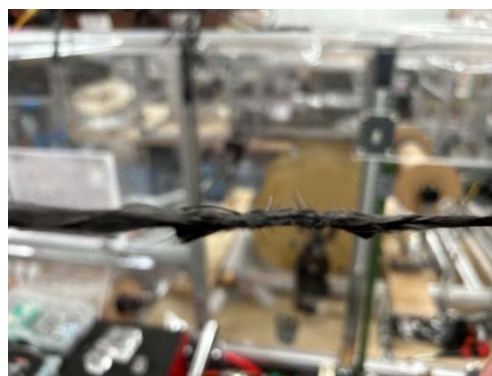


(d) 三つ編み ReCF のボビンへの巻き取り



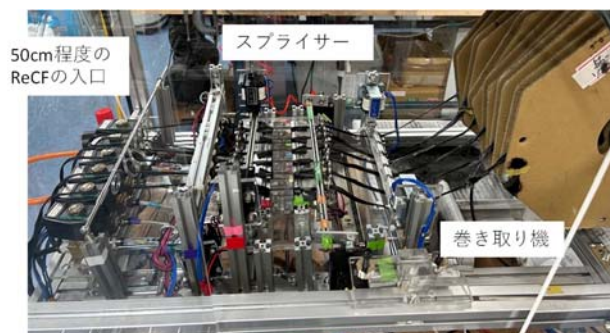
(d) 両端を解捻した ReCF (0.5g/本)

図-2.3 接合のための前準備



(e) 接合された ReCF スtrand

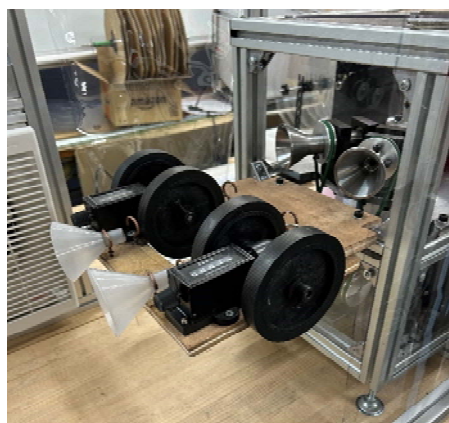
図-2.4 接合自動化のための装置



(a) スプライサー



図-2.5 三つ編み状のストランドの拡大写真



(b) 三つ編み装置へのストランドの引き込み装置

c) 三つ編み装置



図-2.6 三つ編みした ReCF のストランド (左からリサイクル率 100%, 66%, 33%)

## 2.3 樹脂含浸

ここでは、接合への影響、引張強度の視点で樹脂を選定するとともに、樹脂含浸を連続的に行う装置を試作した。

図-2.7 に示すように、接合し連続化したストランドをトレイに入れた樹脂に約 15 秒間浸し、その後複数個のローラーによって余分な樹脂を取り除いた。その後、含浸したストランドは乾燥チューブにて熱乾燥（約 130℃）を約 1 分、その後室内にて自然乾燥を約 20 分した上でポビンに巻き取った。実際の装置の写真を図-2.8 に示す。

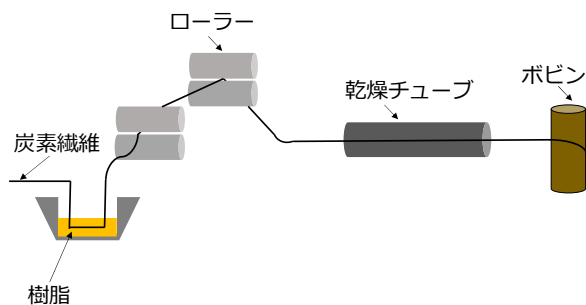


図-2.7 自動化のプロセスの概要

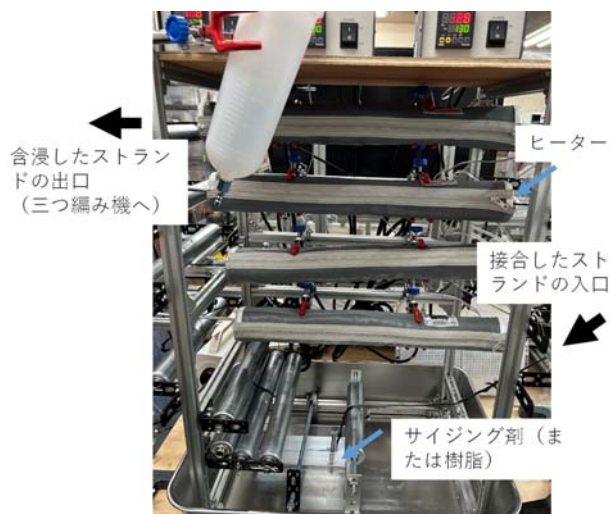


図-2.8 樹脂含浸装置

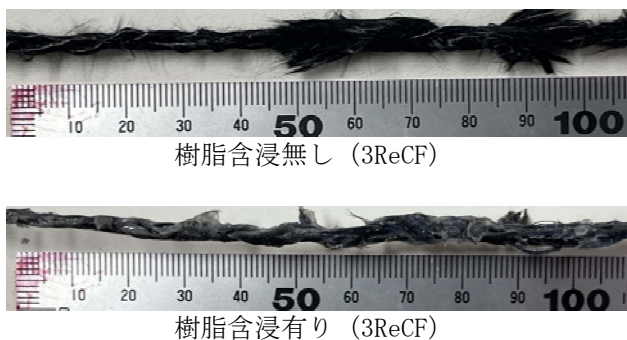
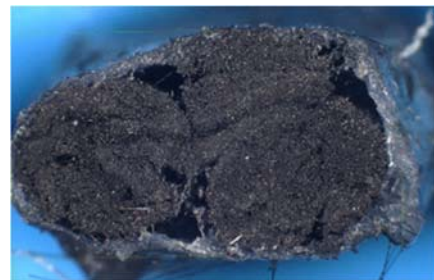
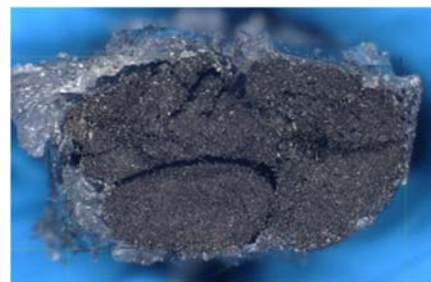


図-2.9 樹脂含浸後の拡大写真



3ReCF



2R-1V



1R-2V



3V

図-2.10 樹脂含浸後の断面

表-2.1 ストランドに付着した樹脂量

| シリーズ                  | 50cm 当たりの平均質量 |        |
|-----------------------|---------------|--------|
|                       | 樹脂 (g)        | 繊維 (g) |
| 3ReCF (樹脂含浸無し)        | 0             | 2.08   |
| 3ReCF (樹脂含浸有り)        | 1.57          | 2.12   |
| 2R-1V (樹脂含浸有り)        | 1.08          | 1.92   |
| 1R-2V (樹脂含浸有り)        | 0.53          | 1.78   |
| 接合部無 ReCF<br>(樹脂含浸無し) | 0             | 2.31   |
| 3V (樹脂含浸有り)           | 0.58          | 1.65   |

図-2.9 に含浸したストランドの拡大写真を示す。樹脂含浸工程により、含浸していないものに比べて毛羽立ちが少なくなっており、この後の加工（巻取りやメッシュ加工）における作業性が向上したものと考えられる。

図-2.10 に、含浸したストランドの断面の様子を示す。いずれも、樹脂が三つ編みの内部まで到達しておらず、ストランドの表面を覆っているのみであることが分かる。また、表-2.1 に示すように、ReCF の割合が高いものに関しては樹脂がより多く付着していることも分かった。ReCF は熱処理によって繊維がほどけており、樹脂が付着する面積が多くなっているからではないかと考える。また、接合部が太くなっており、ローラーで過剰に付いた樹脂を除去する工程において、十分に除去出来ていないことも原因として挙げられる。

図-2.11 に ReCF に関して、接合直後の状況と約 3 か月間静置した状況をそれぞれ示す。これによれば、樹脂含浸をしない場合、時間の経過とともに接合部に緩みが生じ、接合部の強度に影響を及ぼすことを示唆しており、このことから接合後速やかに樹

脂含浸を行い、このような緩みを防止することが大切であることが分かった。

図-2.12 に樹脂含浸の有無が引張試験結果に与える影響を示す。樹脂含浸により、引張強度が向上し、ばらつきも低減していることが明らかとなり、樹脂含浸の効果が伺える。



ReCF の接合直後の状態



ReCF の接合から 3 か月静置後の状態

図-2.11 接合部の状態の経時変化

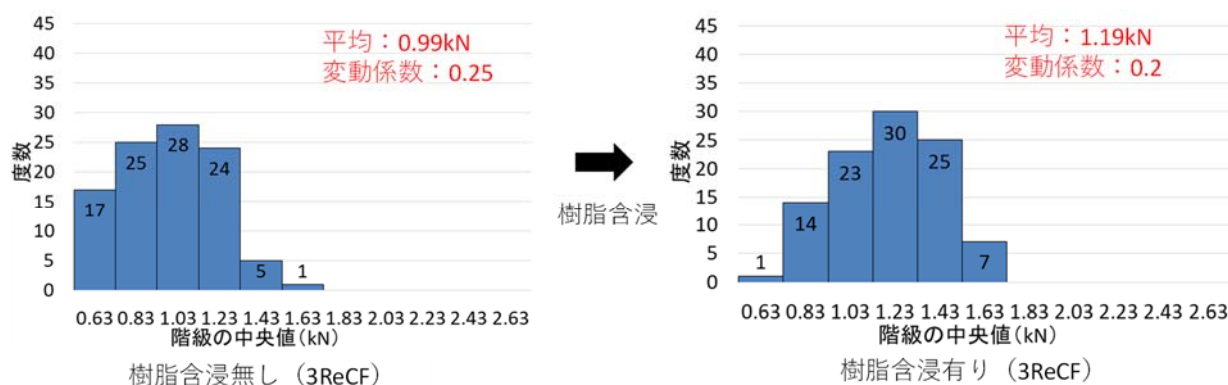


図-2.12 樹脂含浸による引張強度向上効果

## 第3章 接合部を有するリサイクル炭素繊維ストランドの引張特性の評価

### 3.1 概要

ここでは、接合したストランドの静的引張試験を実施し、引張強度を確認するとともに、ネット状に加工する際のホットプレスによる強度の確認を行った。さらには、繰返し荷重が作用する際の疲労抵抗についての基礎検討も行った。

### 3.2 ストランドの引張試験

#### (1) 概要

本実験では、接合したストランドの引張試験により、接合方法の妥当性を検討した。なお、昨年度までの検討により、ReCFのみを用いたストランドの強度が低いことが懸念されたため、本実験では三つ編みに用いる3本のストランドのうち、1本または2本をバージン材で置換することにより、リサイクル率約66%および約33%の三つ編みストランドも作製し、その強度を検討した。

三つ編みに用いる長繊維ReCFのリサイクル率による荷重の大きさとばらつきを見るために、表-3.1に示すように、三つ編みを構成する炭素繊維がすべてReCFのもの、3本の内1本をバージン材に置換したもの、2本をバージン材に置換したもの、比較の為に3本ともバージン材で作られたものの計4シリーズを各60m用意した。図-3.1にはストランドの

拡大図、図-3.2にはボビンに巻き取ったストランドを示す。その後、すべてのシリーズにおいて樹脂含浸を行った。樹脂には、SBR(ムサシノケミカル製、SB-275)とPE(ユニチカ製、アローベース SE1030N)のディスパージョンを1:1で混合したものである。



図-3.1 三つ編み状のストランドの拡大写真



図-3.2 三つ編みしたReCFのストランド（左からリサイクル率100%, 66%, 33%）

表-3.1 検討したケース一覧

| シリーズ               | 実施本数(本) | 備考                             |
|--------------------|---------|--------------------------------|
| 3ReCF (樹脂含浸無し)     | 100     | 接合部を有する ReCF を3本使用             |
| 3ReCF (樹脂含浸有り)     | 100     | 接合部を有する ReCF を3本使用             |
| 2R-1V (樹脂含浸有り)     | 100     | 接合部を有する ReCF を2本、連続のバージン材1本を使用 |
| 1R-2V (樹脂含浸有り)     | 100     | 接合部を有する ReCF を1本、連続のバージン材2本を使用 |
| 接合部無 ReCF (樹脂含浸無し) | 100     | およそ ReCF の3本分に相当               |
| 3V (樹脂含浸有り)        | 100     | 連続のバージン材を3本使用                  |



図-3.3 引張試験に用いた供試体

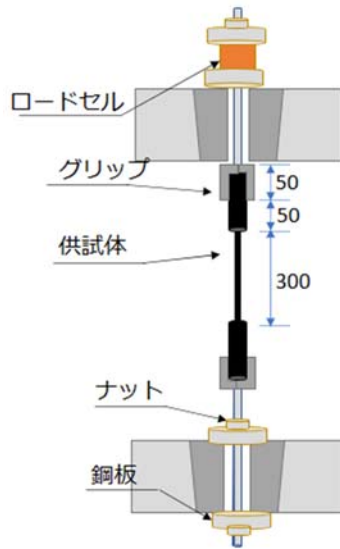


図-3.4 引張試験方法のイメージ図  
単位：mm

## (2) 引張試験

各シリーズいずれも図-3.3 に示すように、ストランドの長さを 500mm とし、両端の 100mm を直径 16mm の鉄パイプに差し込み、エポキシ樹脂で固定した。供試体本数は各シリーズ 100 本である。荷重方法は、図-3.4 に示すように作製した供試体の鉄パイプ部分をグリッパ(最大負荷荷重 5kN)で掴んで固定し、速度を約 0.05mm/s と引張荷重をコントロールし、ロードセル(容量 10kN, 精度 3N)で荷重を測定した。

## (3) 試験結果

図-3.5 に各シリーズの最大荷重の平均値(100 本)を示す。本研究開発の対象である 3ReCF, 2R-1V および 1R-2V シリーズの最大荷重の平均値はそれぞれ 1.19kN, 1.32kN, 1.51kN であった。リサイクル率が低くなるにつれて最大荷重は上昇しており、三つ編みに用いる 3 本のストランドのうち 1 本でも ReCF が入ると最大荷重が大きく低下したものの、ReCF の本数の増加に対する低下率は小さかった。

図-3.6 に各シリーズの最大荷重の変動係数を示す。これによれば、ReCF の混和に伴い最大荷重も低下し、ばらつきが大きくなっていることを示してい

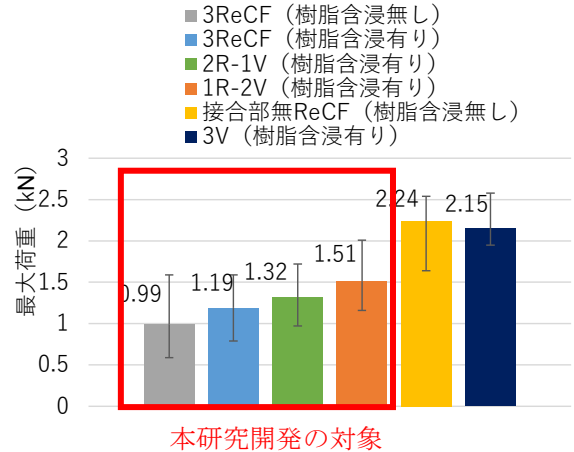


図-3.5 各シリーズの最大荷重(平均値)

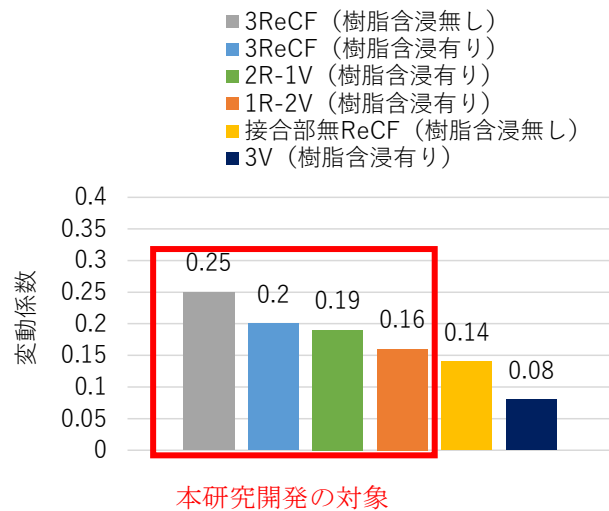


図-3.6 各シリーズの最大荷重の変動係数

る。ただし、樹脂含浸をすることで、ばらつきは接合部のないものと同程度まで小さくすることが可能となり、またドイツ製の既製品の最大荷重の平均値が 1.69kN であることから、ReCF ストランドでも十分に使用できる可能性が示された。

各シリーズについて図-3.7~3.10 に最大荷重のヒストグラムを示す。バージン材を入れることによって、荷重のばらつきが抑えられたと同時に、全体的に強度が上昇し改善することが分かった。

また、ReCF の接合部の有無により 3ReCF シリーズ, 2R-1V シリーズ, 1R-2V シリーズの結果はばらつきが大きく、強度も低下しているのではないかと考える。一方、3V シリーズは接合部がない為、ばらつきが抑えられ、強度も高い。

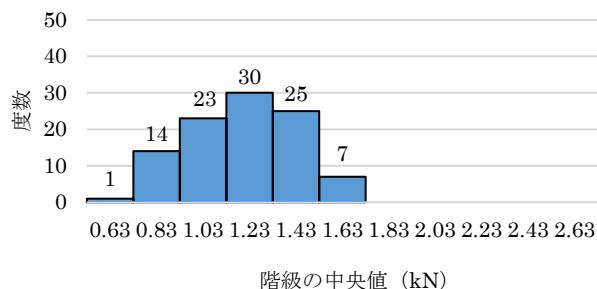


図-3.7 3ReCF（樹脂含浸有り）の最大荷重の頻度分布

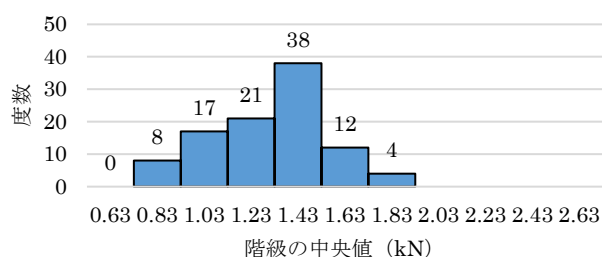


図-3.8 2R-1V の最大荷重の頻度分布

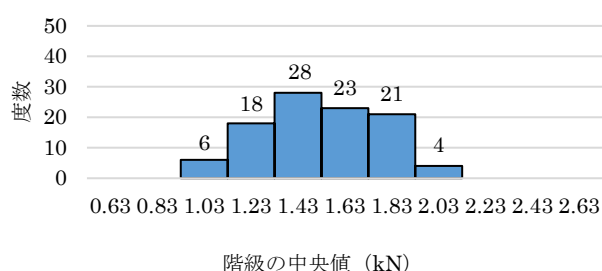


図-3.9 1R-2V の最大荷重の頻度分布

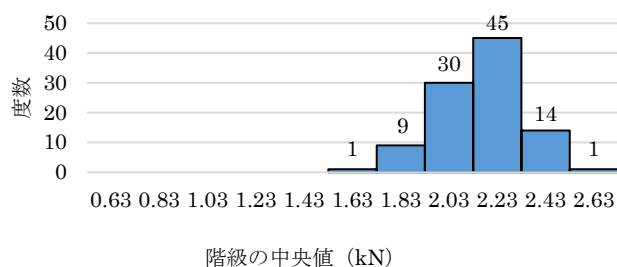


図-3.10 3V の最大荷重の頻度分布

#### (4) 破壊モード

各シリーズの破壊状況を図-3.11に示す。ReCFが含まれているものに関しては、接合部が外れることによってストランド全体が切断され、接合部が弱点であることが分かった。例えば、1R-2Vシリーズに関しては、バージン材の割合が多い為、最初にReCF部分が外れたが、残り2本のバージン材は抵抗し、最終的にはバージン材の繊維が破断することでストランドが破断した。



3ReCF



2R-1V



1R-2V



3V

図-3.11 各シリーズの破壊モード

### 3.3 ホットプレス後のストランドの引張試験

#### (1) 概要

ネット状に加工する際にホットプレスによる工程が入るため、熱および加圧がReCFストランドの強度に及ぼす影響について検討した。ホットプレスの条件としては、200℃で3分間の加熱とし、1100mm×1100mmの面積に対して、約70kNの荷重を作用させた。なお、4章で示す方法により一旦ReCFネットに成型し、それからストランド単体を取り出して試験に用いた。

表-3.2に示すように、三つ編みReCFストランドのホットプレス前後の強度ならびに、参考までにバージン材についても検討した。なお、樹脂には前節同様、SBR（ムサシノケミカル製、SB-275）とPE（ユニチカ製、アローベース SE1030N）のディスパーションを1：1で混合したものである。

表-3.2 検討したシリーズ一覧

| シリーズ                    | 実施本数<br>(本) |
|-------------------------|-------------|
| 三つ編み ReCF (ホットプレス<br>前) | 10          |
| 三つ編み ReCF (ホットプレス<br>後) | 10          |
| バージン材 (ホットプレス前)         | 10          |
| バージン材 (ホットプレス後)         | 10          |

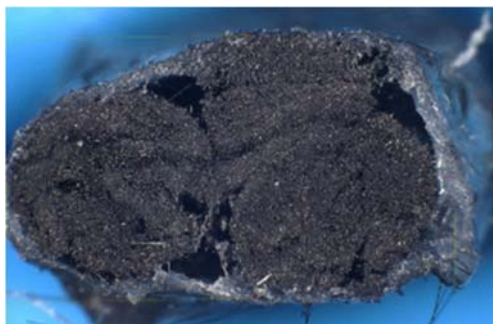


ホットプレス前



ホットプレス後

図-3.12 三つ編み状のストランドの拡大写真



ホットプレス前



ホットプレス後

図-3.13 ホットプレス前後の三つ編みストランドの断面の状況

表-3.3 ReCF ストランドの耐力

| 種別           | ホットプレス<br>前 | ホットプレス<br>後 |
|--------------|-------------|-------------|
| 試験本数<br>(本)  | 10          | 10          |
| 引張耐力<br>(kN) | 1.19        | 1.27        |
| 変動係数         | 0.20        | 0.08        |

表-3.4 バージン材ストランドの耐力

| 種別           | ホットプレス<br>前 | ホットプレス<br>後 |
|--------------|-------------|-------------|
| 試験本数<br>(本)  | 10          | 10          |
| 引張耐力<br>(kN) | 2.06        | 1.92        |
| 変動係数         | 0.08        | 0.1         |

図-3.12 にホットプレス前のストランドの状況ならびに、図-3.13 にホットプレス前後の断面の状況を示す。特に断面に関しては、加圧により押しつぶされた状況が分かる。

## (2) 引張試験

引張試験については、前節と同様の方法により実施した。

## (3) 試験結果

表-3.3～3.4 に各シリーズの最大荷重の平均値を示す。本研究開発の対象である三つ編み ReCF ストランドにおいては、ホットプレスにより若干の強度向上と強度のばらつきの低減が見られた。これは、図-3.13 に示したように、加熱により含浸された樹脂が熔融し、かつ加圧により圧縮されることで、より密な組織となったためである。一方、バージン材に関しては、同条件におけるホットプレスにより最大荷重が低下する傾向にあった。これは、メッシュの交点部において加圧により局所的に折曲げが発生し、強度低下が生じたためと推察される。言い換えれば、三つ編み ReCF ストランドでは、ストランドに柔軟性があることから局所的な曲げによる強度低下が生じにくいと推察された。

## 3.4 疲労に関する基礎検討

### (1) 実験概要

ここでは橋梁等への適用を想定し、三つ編みした ReCF ストランドの疲労抵抗性について検討するにあたり、まずはストランド単体の引張疲労試験を実施した。

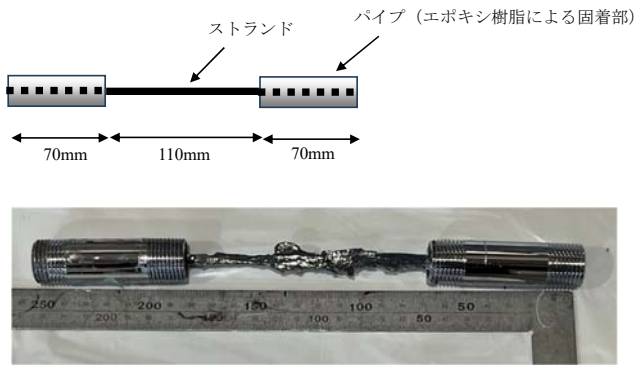


図-3.14 引張疲労試験用供試体の概要

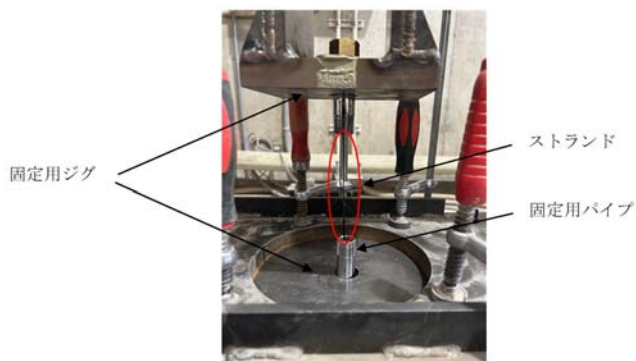


図-3.15 引張疲労試験の実施状況

## (2) 実験方法

図-3.14 に作製した供試体の概要図を示す。全長 300mm のストランドに対して、両端に 70mm の鉄パイプをエポキシ樹脂充填により固着し、試験機に取り付けることとした。図-3.15 に引張疲労試験の状況を示す。供試体は固定用ジグを介して、試験機に固定した。

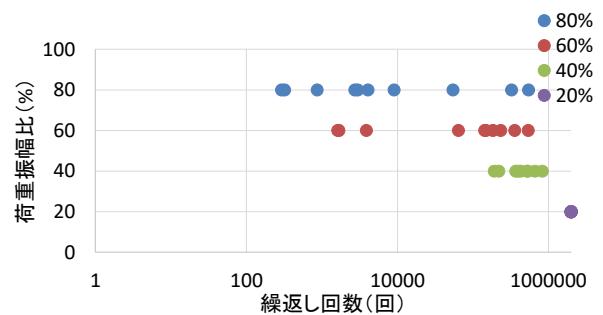
引張疲労試験の载荷レベルに関しては、表-3.5 に示すように、前節のストランドの引張試験結果から、リサイクルストランドの耐力の平均値が 1.27kN であったことから、この試験における 95%信頼区間の下限値を疲労試験の基準値とし、この基準値に対して、80%、60%、40%、20%の繰返し荷重を作用させた。引張荷重は 10Hz のサイン波で作用させた。なお、比較のためにバージン材についても表-3.5 に示す条件にて実施した。いずれも 200 万回にて破壊しない場合には試験を終了した。

## (3) 実験結果

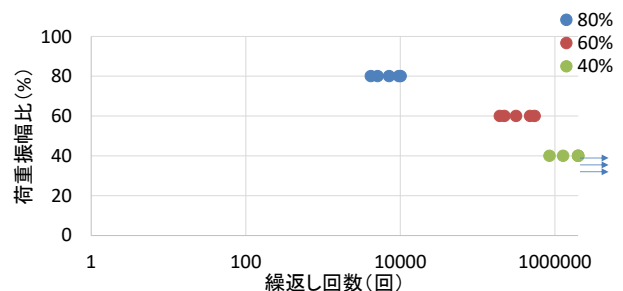
図-3.16 に疲労試験結果を示す。ReCF ストランドの各荷重レベルにおける破断までの回数のばらつきが大きく、荷重レベル 20%において、200 万回まで破壊しないという結果になった。载荷レベルの高いも

表-3.5 引張疲労試験の試験条件

|                  | ReCF ストランド | バージン材 |
|------------------|------------|-------|
| 引張試験 (平均値) (kN)  | 1.27       | 1.91  |
| 95%信頼区間の下限値 (kN) | 1.08       | 1.54  |
| 80% (kN)         | 0.86       | 1.23  |
| 60% (kN)         | 0.64       | 0.92  |
| 40% (kN)         | 0.43       | 0.62  |
| 20% (kN)         | 0.22       | —     |



(a) ReCFストランド



(b) バージン材

図-3.16 疲労試験の結果

の破壊形態として、接合部の破断が生じていることが確認された。

一方、バージン材についても、ばらつきは小さいものの、荷重レベル 40%においても 200 万回以前に破壊するものが多く、疲労抵抗性は高くないことが伺える。今後、異なる荷重レベルや、試験区間に含まれる接合部の数などに着目した実験データを蓄積する必要がある。

## 第4章 ネット状補強材の開発

### 4.1 概要

ここでは、ネット状補強材の開発ならびにはり部材の曲げ試験によるコンクリートとの付着等の確認を行った。また実橋梁における施工性試験も実施した。

### 4.2 ネット状補強材の作製方法の検討

ネット状補強材を作製するにあたり、岐阜県産業技術総合センターの 500ton ホットプレス機を用い、大型メッシュの作製を試みた。表-4.1 にプレス条件を示す。

本実験では、縦横のストランドにおいて、縦糸を ReCF、横糸をバージン材を用いて作製した。なお、大型メッシュの寸法は、縦 3000mm、横 1200mm である。

ホットプレスの目的は、縦糸と横糸を交点で固着することであり、直接剛な鋼材でプレスすると交点が損傷する可能性があることから、図-4.2 に示すようにシリコーンゴムおよび剥離用シートを介してプレスを行った。当て板（1100mm×1100mm）には電熱性の良いアルミを使用し、シリコーンゴム（1000mm×1000mm）は荷重を分散させる役割を期待した。

表-4.1 プレス条件

| メッシュ<br>ピッチ   | 温度（上/<br>下）（℃） | 設定荷重<br>（ton） | 加圧時間<br>（秒） |
|---------------|----------------|---------------|-------------|
| 50mm×<br>50mm | 200/200        | 7             | 180         |

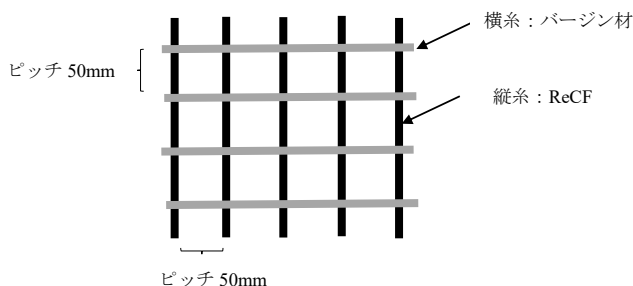


図-4.1 大型メッシュの形状

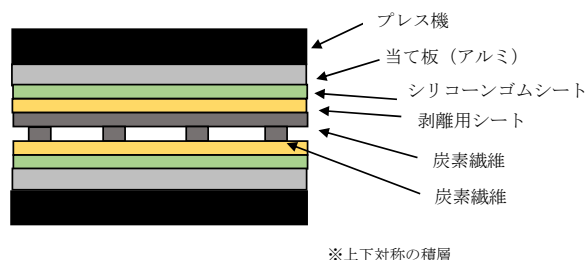


図-4.2 ホットプレス時の積層状況



(a) プレス機全景



(b) 耐熱シートおよびシリコーンゴム設置状況

図-4.3 ホットプレスの状況

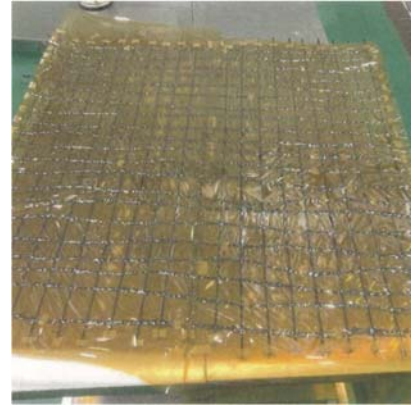


(a) プレス直後

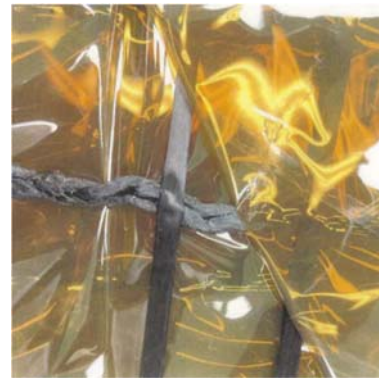


(b) 送り出し後のプレス状況

図-4.4 ホットプレス後の状況



(a) プレス後のネット (約 1000×1000mm)



(b) 接合点の状況

図-4.5 作製されたネット

なお、本ホットプレスはバッチ式のため、約 1000mm 毎に送り出しながら幅約 1000mm、長さ約 3000mm のネットを作製した。

図-4.3 に使用したホットプレス機の概要、図-4.4 にホットプレス後のネットの状況、および図-4.5 に作製されたネットの近景をそれぞれ示す。

## 第5章 はり部材を用いた補強効果の確認

### 5.1 概要

ここでは、曲げを受ける部材を用いて ReCF ストランドを用いて作製した ReCF ネットの補強効果について実験的に確認した。

### 5.2 実験概要

本実験で用いた供試体概要を図-5.1 に示す。幅 300mm、長さ 1200mm、厚さ 55mm のモルタル板内に ReCF ネットを設置したはりを作製した。モルタルの水セメント比は 50%とし、かぶりを 20mm とした。型枠内に約 20mm の厚さでモルタルを配置し、ReCF ネットにたるみが生じないように両側を固定した状態で上層 35mm のモルタルを打ち込んだ。4 章で示したとおり ReCF およびバージン材のネットのピッチは 50mm×50mm と同じであり、補強材量を変化させるために、ネットを 1 枚および 2 枚を重ねて用いた。

材齢 28 日となるまで、20℃の恒温室内で養生し、図-5.2 に示すような曲げ試験を行い、荷重と載荷点変位を測定した。

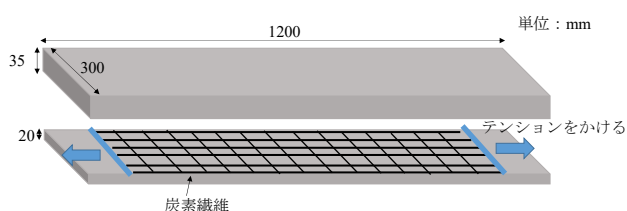


図-5.1 供試体の概要

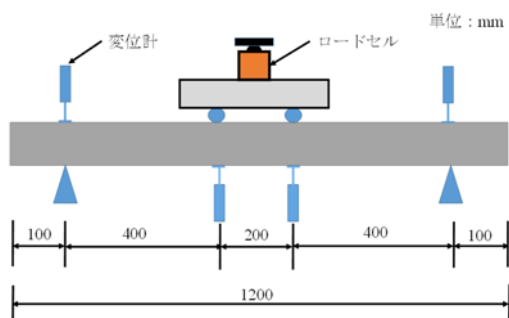


図-5.2 載荷試験の概要

表-5.1 実験シリーズ

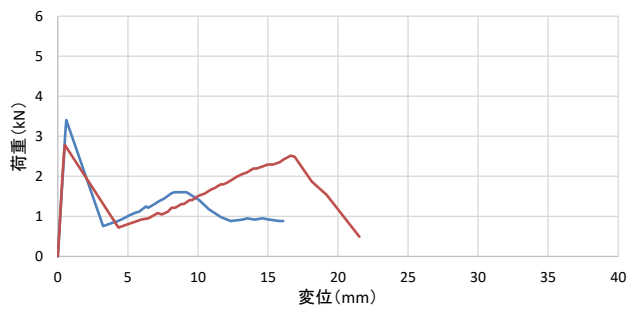
| シリーズ    | 実施本数 | 主筋の引張耐力の概算 | 備考         |
|---------|------|------------|------------|
| ReCF-1  | 2    | 6.6kN      | 1 枚        |
| ReCF-2  | 2    | 13.2kN     | 2 枚を重ねて埋込み |
| バージン材-1 | 2    | 12kN (推定)  | 1 枚        |
| バージン材-2 | 2    | 24kN (推定)  | 2 枚を重ねて埋込み |

### 5.3 実験結果

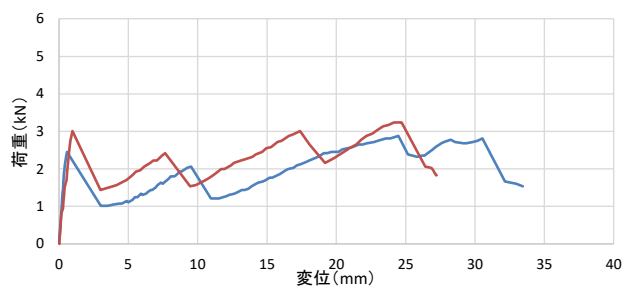
図-5.3 に曲げ試験により得られた荷重-変位曲線を示す。なお、バージン材ネットと ReCF ネットでは、主軸方向の各ストランドの断面積も異なるが、表-5.1 に示すように引張試験を行った際のみかけの耐力が参考となる。

ReCF ネットに関しては、1 枚のみの配置では、初期ひび割れが開口し最大荷重となったが、2 枚配置した場合には、最大荷重は高くはないものの、複数ひび割れが発生し、部材の靱性も確保されていた。一方、バージン材に関しては、ネットの枚数の違いによらず、初期ひび割れ発生後、荷重は大きくなっているものの、荷重の上昇、下降を呈していない。これは、先述のとおりバージン材はモルタルとの付着が弱いため、初期ひび割れが開口し、そのまま終局を迎えたと考えられる。

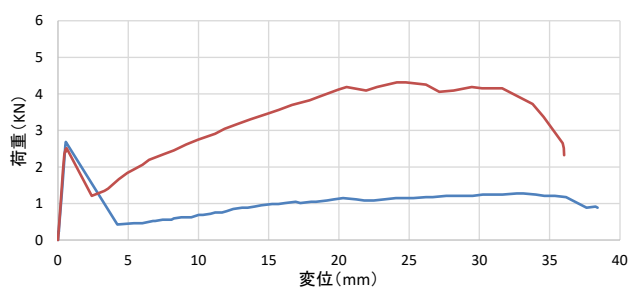
なお、ReCF-2 とバージン材-1 は、補強材としての引張耐力が同程度であり、曲げ試験の結果も同程度であることから、ReCF ネットの場合も、補強材の引張耐力を求めることで、はり部材の曲げ耐力を算定することが可能であることが分かった。



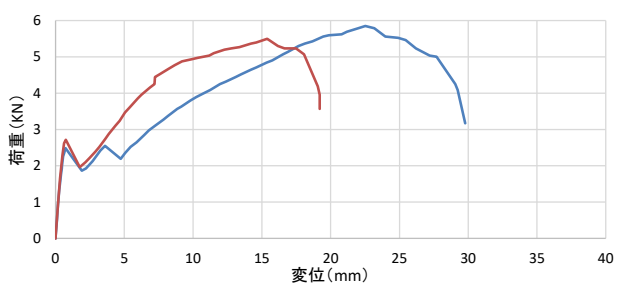
(a)ReCF-1 (ReCF ネット 1 枚)



(b)ReCF-2 (ReCF ネット 2 枚)



(c)バージン材-1 (バージン材ネット 1 枚)



(d)バージン材-2 (バージン材ネット 2 枚)

図-5.3 荷重-変位曲線



(a)ReCF-1 (ReCF ネット 1 枚)



(b)ReCF-2 (ReCF ネット 2 枚)



(c)バージン材-1 (バージン材ネット 1 枚)



(d)バージン材ネット 2 枚

図-5.4 ひび割れ性状の例

## 第6章 小規模橋梁上面増厚補修への適用

### 6.1 概要

ここでは、小規模橋梁の上面増厚補修において、施工上必要な縦目地部や橋梁端部の補強に4章で作製した ReCF ネットを用いて、その施工性を確認した。

### 6.2 補修の考え方

対象とする橋梁は、図-6.1 に示すような岐阜県山県市内にある橋長約 8m、幅員約 4m の射角のあるプレテン PC 橋である。なお、既存の橋梁においてはプレテン桁上に 6cm～8cm のコンクリート舗装があり、このコンクリート舗装にひび割れが生じていたことから、舗装を撤去し、増厚補修を行った。



図-6.1 対象橋梁の全景

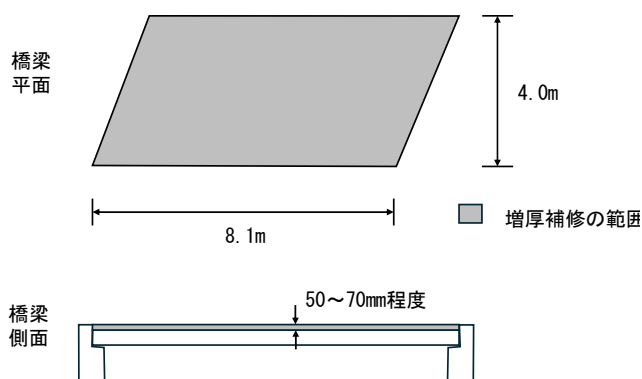


図-6.2 橋梁における補修範囲の概念図

図-6.2 に対象橋梁における施工の範囲を示す。増厚補修部には複数微細ひび割れ型繊維補強セメント系複合材料の1つである靱性モルタル（速硬化性を有し、3時間で $24\text{N/mm}^2$ 以上の圧縮強度を発現）とした。

高性能な補修材のため、本来であれば ReCF ネットによる補強は必要ないが、補修工程の都合から、片側ずつの施工となり縦目地が設けられることから、

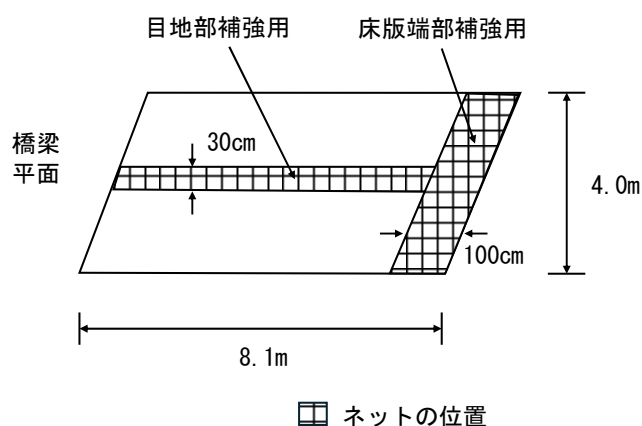


図-6.3 ネットの配置位置の概念図

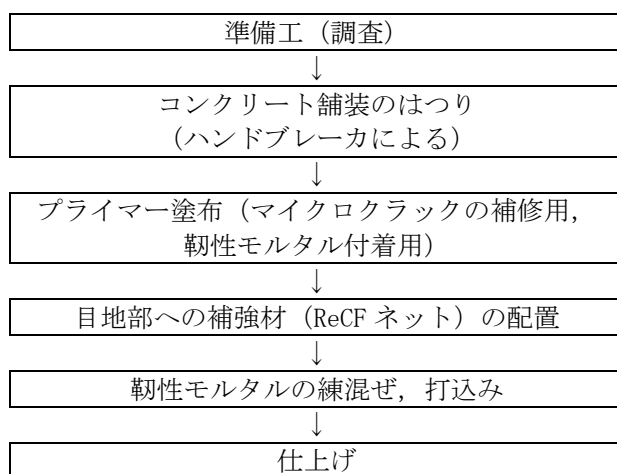


図-6.4 施工のフロー



図－6.5 施工の各段階の状況

図－6.3 に示すように、縦目地部の補強を目的として ReCF ネットを配置した。さらに、橋梁端部のみ、幅員方向全体に約 1m の範囲で ReCF ネットを配置した。伸縮周辺の段差部において走行車両による衝撃荷重が作用することも予想されたため、補強材の効果を確認する目的で橋梁端部の片側のみに配置した。ReCF ネットは増厚層厚のほぼ中央に配置したが、かぶりが小さく鉄筋による補強では腐食が懸念されたことから耐久性上の観点からも ReCF の優位性が発揮される適用事例と考えられる。

### 6.3 施工手順

図－6.4 に本施工における手順の概略を示す。既設のコンクリート舗装をブレーカーにより斫り取り、その際に生じた微細ひび割れに対する処理としてプライマーを用いた。プライマー塗布後、ReCF ネットを所定の位置に設置し、その後、所定の厚さとなるように補修用モルタルを敷設し、ReCF ネットを配置した後に、上層部の補修モルタルを速やかに打設した。図－6.5 に各工程の写真を示す。

準備工およびコンクリート舗装のはつり等の作業で 2 日間、各車線の施工に 1 日ずつの計 4 日間で施工を完了した。なお、韌性モルタルの表面仕上げまでの実質の施工時間は約 2 時間 30 分であった。図－6.6 に施工完了後の全景を示す。



図－6.6 施工後の状況

## 第7章 まとめ

### 7.1 まとめと今後の課題

本研究開発では、有限長さのCFRP 廃材から熱処理法によって回収された炭素繊維を用いて、自動で接合する手法を構築し、さらに樹脂含浸による成型ならびに強度増加の可能性を示した。さらにはホットプレスによりネット状に加工したうえで、モルタルの補強材として実験的に補強効果を確認するとともに、橋長約 8m の実際の小規模橋梁の増厚補修の目地部に適用する試験施工を行った。

なお、今後の量産に向けた課題として以下のものが挙げられる。

#### ・量産を目指した製造プロセス

接合や樹脂含浸の自動化までは確立したものの、一般的なストランド生産における製造速度（例えば数km/h）にまでは及ばず、あくまでも試験製造のレベルにとどまった。量産を目指した製造プロセスの確立が必要である。

#### ・ストランド径の種類を増やすこと

本検討はあくまでも補修用のネットを想定していたが、コンクリート構造物の構造部材の補強材（補修であっても）として使用するためには、さらに補強効果を高めるために太径のストランドの種類を増やすことが必要である。

#### ・疲労に対する抵抗性のデータを蓄積すること

中間評価時にも提案いただいたように、疲労に対する抵抗性のデータの蓄積が必要である。

#### ・コスト試算

量産を目指した装置開発ならびに原材料の調達価格により、製造コストが試算でき、製造コストについては、本研究開発の過程において既存のCFと同程度であることが推察できた。一方で、原材料コストについては、CFRPの廃材をいくらで引き取るかに依存しているため、算定することができなかった。

#### ・CFの取扱い

炭素繊維の加工時に生じる破砕片（粉塵）が健康上の影響を及ぼす可能性があることから、欧州において規制の検討が行われている。本研究開発は、CFRP廃材をできるだけ切断しない方法としての可能性がある一方で、少なからず破砕片が生じるため、量産に向けた加工業者が限られてしまうことが懸念される。

### 7.2 謝辞

本研究開発の実施にあたり、樹脂含浸ならびにネット状の加工に対して適切なアドバイスをいただいた宇部エクシモ（株）の関係諸氏に謝意を表します。また、橋梁補修の試験施工に対してご協力いただいた（株）デーロス・ジャパンの関係諸氏にここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 経済産業省：平成 21 年度中小企業支援調査炭素繊維・複合材料のリサイクル技術等に関する調査報告書，2010
- 2) 藤井 透，大窪 和也：炭素繊維のリサイクル，その背景，問題点，そしてビジネスの可能性，成形加工，Vol. 27, No. 2, pp. 497-502, 2015
- 3) 大塚航平，守富寛，隈部和弘，板津秀人：廃 CFRP の加熱処理によるリサイクル炭素繊維の回収，第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp. 303-304, 2016
- 4) 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
- 5) 北川大希：コンクリートの電気伝導性が鉄筋の防食効果に与える影響，岐阜大学 自然科学技術研究科 修士論文，2016

(2025. ????)

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

成果報告レポート

No.2022-6

リサイクル炭素繊維のコンクリート構造物用補強材への応用

2022.6