

(39) CFRTP緊張材の付着，引張および耐アルカリ試験

櫻庭 浩樹¹・川島 陽子²・西崎 到³

¹正会員（国研）土木研究所 先端材料資源研究センター 研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6）

E-mail: hiro-sakura@pwri.go.jp

²正会員（国研）土木研究所 先端材料資源研究センター 研究員（同上）

E-mail: y-kawashima@pwri.go.jp

³正会員（国研）土木研究所 先端材料資源研究センター グループ長（同上）

E-mail: nisizaki@pwri.go.jp

CFRPの製造性を飛躍的に向上させる可能性がある，熱可塑性樹脂を用いたCFRP（CFRTP）のPC構造物への適用が着目されている．PC構造物に適用するためには，コンクリートに埋設して使用することを想定した，CFRTP緊張材の基礎的な特性を確認する必要がある．そこで，本研究では，付着，引張および耐アルカリ試験を実施した．付着試験では，PC鋼より線と比較して付着性が低く，改善の余地があることを確認した．引張試験では，引張耐力110kN程度，弾性係数110GPa程度であることを確認した．耐アルカリ試験の結果，最大荷重保持率は，既往の熱硬化性CFRP緊張材と同程度であった．また，電子顕微鏡によりCFRTP緊張材の素線を観察した結果，アルカリ作用によって炭素繊維と樹脂界面に微細な割れは生じているが，顕著な劣化は生じていないことを確認した．

Key Words: CFRTP, tendon, bond, tenstion, alkaline resistance

1. はじめに

近年，熱可塑性樹脂を用いたCFRP（以下，CFRTP）の製造が着目されている．熱可塑性樹脂を用いた場合，生産サイクルの短縮や加工性の向上が期待できるため，従来の熱硬化性樹脂を用いたCFRPと比較して，製造の効率を大幅に向上できる可能性がある．

このようなCFRTPに関する研究開発プログラム（革新材料による次世代インフラシステムの構築）が，金沢工業大学を中心に進められている¹⁾．著者らもこのプログラムに参加し，PC構造物の緊張材としてCFRTPを適用するため，コンクリートに埋設して使用することを想定した各種試験を行っている．

著者らの過去の検討では，表面をガラス繊維で被覆したCFRTPを用いていた²⁾．しかし，コンクリート中のアルカリによりガラス繊維が劣化することが確認されたため，現在はガラス繊維による被覆を取り除いたCFRTPを開発し，特性を検討している．

ガラス繊維による被覆は，表面に適度な凹凸を形成し，付着性を向上させる機能を有していたため，これを取り除くことで付着性が低下することが予想された．一方，

ガラス繊維による被覆の厚さ分を炭素繊維に置き換えたため，引張特性と耐アルカリ性は向上することも予想された．

本研究では，ガラス被覆を取り除いたCFRTPの付着，引張，耐アルカリ性を明らかにすることを目的として実施した試験結果について述べる．

2. 付着，引張および耐アルカリ試験方法

(1) CFRTP

CFRTPの概要を図-1に示す．このCFRTPは，熱可塑性のエポキシ樹脂を母材とし，強化材を炭素繊維とした

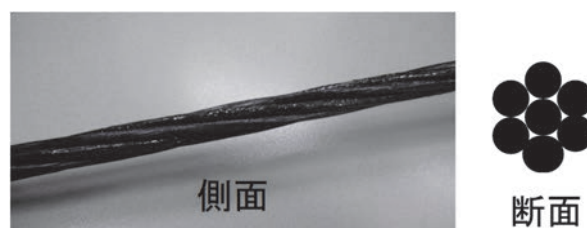


図-1 CFRTPの概要

素線を7本よりにしたものである。樹脂と炭素繊維の物性を表-1に示す。CFRTPの直径は9mmであり、有効断面積は49.0mm²である。なお、過去の検討では、表面をガラス繊維で被覆したCFRTPを用いていたが、本論文では、特に断りがなければ、ガラス繊維による被覆がないものを“CFRTP”と称す。

(2) 付着試験

付着試験は、JSCE-E 539-2007に準じて実施し、試験数量は5体とした。CFRTPを全長700mmに切り出し、片端に長さ250mmの定着具を取り付けたものを試験体とした。定着具には、炭素鋼鋼管（外径27.2mm、内径21.4mm、板厚2.9mm）に静的破砕剤を注入したものを用いた³⁾。付着長さは、CFRTPの直径の4倍とした。付着試験は、コンクリートが材齢28日時点で実施した。

比較のため、ガラス被覆を有するCFRTP（7本より線、直径9mm）とPC鋼より線（7本より線、直径9.3mm）の試験も実施した。付着試験に用いたコンクリートの配合と材齢28日での圧縮強度を表-2、付着試験の概要を図-2に示す。

(3) 引張試験

引張試験は、JSCE-E 531-2010に準じて実施し、試験数量は5体とした。CFRTPを全長1000mmに切り出し、両端に長さ250mmの定着具を取り付けて試験区間500mmとしたものを試験体とした。試験体の伸びおよびひずみを得るため、試験区間中央部において、標点距離250mmとして標点間の変位を測定した。引張試験の実施状況を図-3に示す。

(4) 耐アルカリ試験

耐アルカリ試験は、JSCE E538-2013に準じて実施し、試験数量は5体とした。浸漬に用いたアルカリ水溶液は、文献4)を参考に、1LあたりCa(OH)₂を2g、NaOHを10g、KOHを14g含有するものとした。調整したアルカリ水溶液をガラス電極法によってpHを測定した結果、14.6℃でpH13.7であった。浸漬は、60℃の恒温槽で30日間とした。CFRTPは、全長1300mmに切り出して浸漬した。

アルカリ水溶液への浸漬後、両端に長さ400mmの定着具を取り付けて試験区間500mmとしたものを試験体とし、JSCE-E 531-2010に準じた引張試験を行った。なお、定着具の長さを250mmとした場合、定着部での抜けが生じたため、(1)引張試験の場合よりも定着部を長くした。試験体の伸びおよびひずみを得るため、試験区間中央部において、標点距離300mmとして標点間の変位を測定した。

また、浸漬しなかったCFRTPおよび浸漬後のCFRTPの7本の素線1本の断面を対象に、電子顕微鏡による観

表-1 樹脂と炭素繊維の物性

項目	数値
樹脂の引張強度	59 MPa
樹脂の曲げ弾性係数	2.8 GPa
炭素繊維の引張強度	4900 MPa（公称値）
炭素繊維の引張弾性係数	230 GPa（公称値）

表-2 付着試験に用いたコンクリートの配合と圧縮強度

試験体種類	W/C(%)	圧縮強度(MPa) (材齢 28 日)
ガラス被覆なし CFRTP	63	33.3
ガラス外層有あり CFRTP	68.1	28.7
PC 鋼より線		

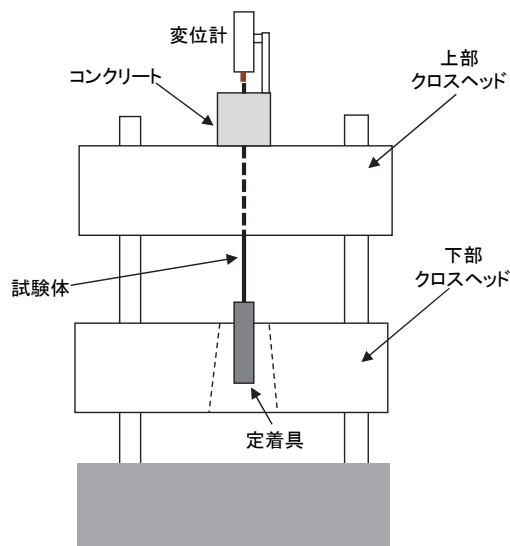


図-2 付着試験の概要

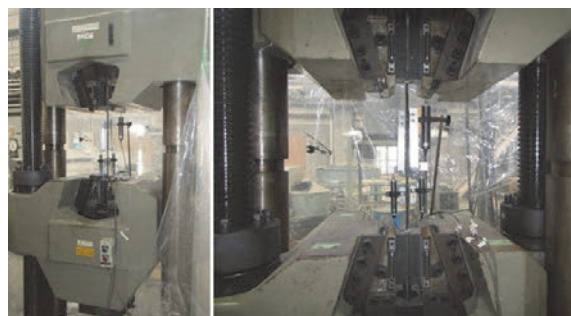
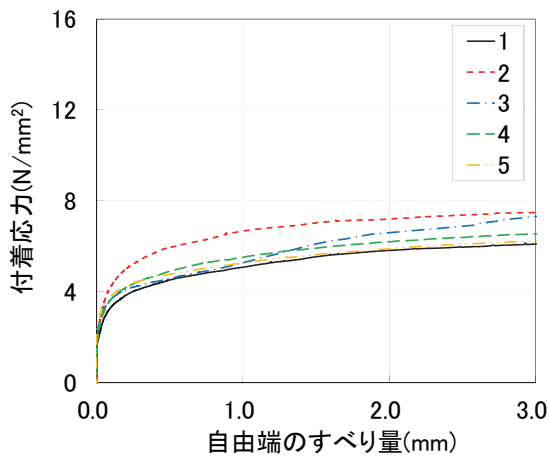


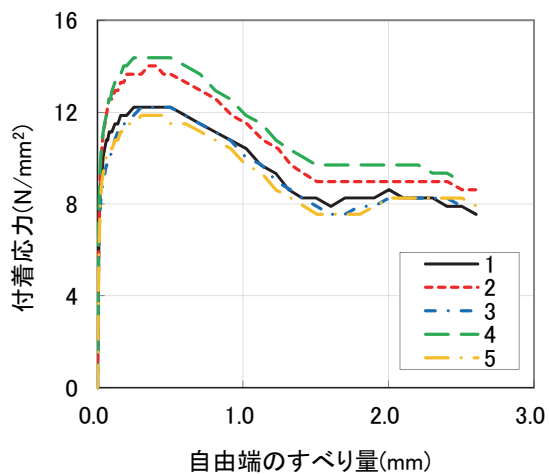
図-3 引張試験の実施状況

察およびEPMAによる面分析を行った。なお、これらのCFRTPの素線は別々の試験体から採取した。

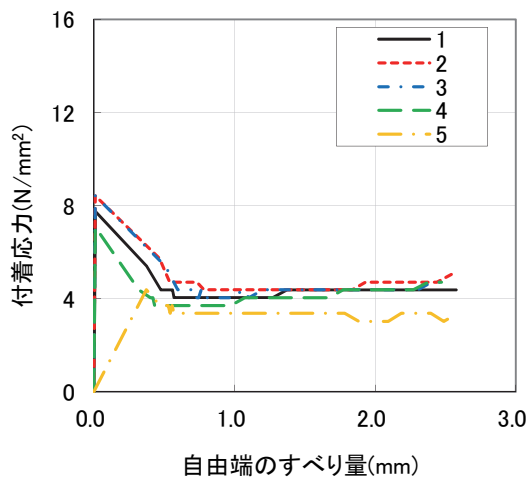
既往の研究では、繊維強化複合材料の劣化を、1) 繊維の劣化、2) 樹脂の劣化、3) 繊維と樹脂の界面の劣化の3つに分類していた⁵⁾。これを踏まえ、1)～3)のうち、どの劣化が支配的であるかに着目した。



a) CFRTP



b) ガラス被覆を有する CFRTP



c) PC 鋼より線

図4 付着応力-自由端のすべり量の関係

3. 付着, 引張および耐アルカリ試験結果と考察

(1) 付着試験

図4に付着応力-自由端のすべり量の関係を示す。

表-3 引張試験の結果

	平均値	標準偏差	変動係数
引張耐力	109 kN*	2.22 kN*	2.0%*
引張弾性係数	112 GPa	4.74 GPa	4.2%

*5体のうち、2体は100kN程度で定着部での抜けが生じたため、破断に至った3体の結果を用いて算定



図-5 引張試験後の試験体の破壊形態

表-4 アルカリ浸漬後の引張試験の結果

	平均値	標準偏差	変動係数
引張耐力	98.5 kN	2.24 kN	2.3%*
引張弾性係数	111 GPa	12.1 GPa	10.9%

図4 a) CFRTPの場合、付着応力 2N/mm^2 程度に達した後、すべり量が増加する挙動を示した。

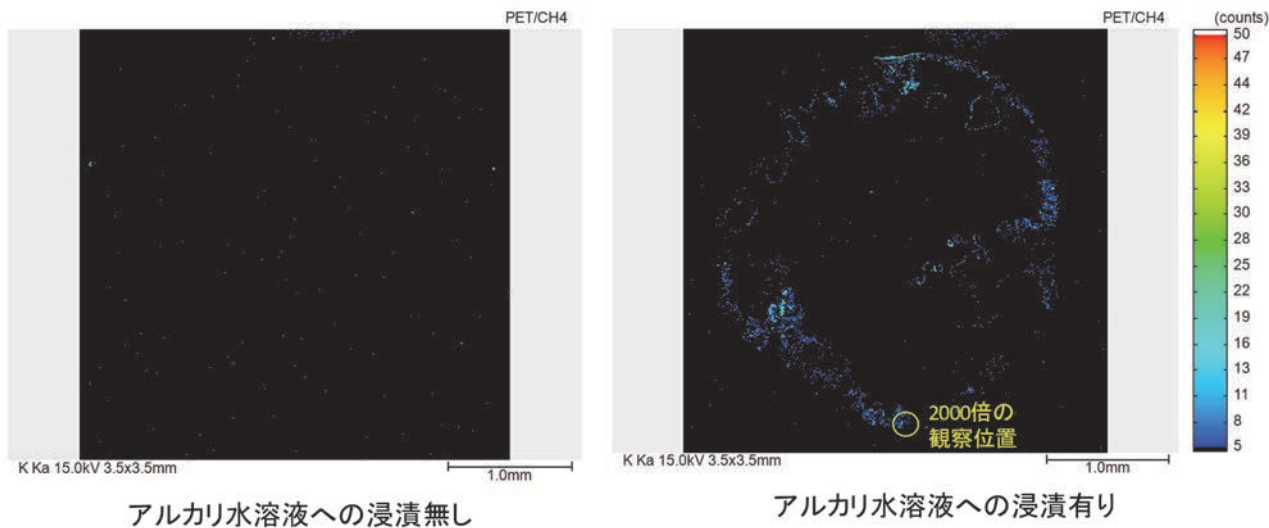
図4 b) ガラス被覆を有する CFRTP の場合、付着応力 10N/mm^2 程度からすべり量が増加する挙動を示した。

図4 c) PC鋼材の場合、No.1~4では、付着応力 8N/mm^2 程度に達した後、すべり量が増加する挙動を示した。なお、No.5は载荷直後にすべりが発生したが、この原因は明確でない。

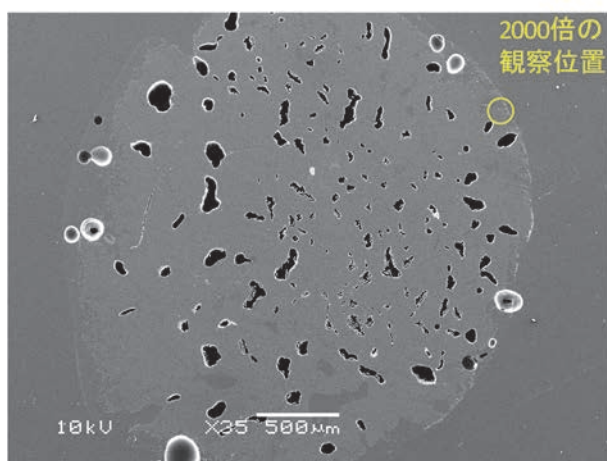
以上から、図4a) CFRTPでは、ガラス繊維による被覆を取り除いたため、表面が円滑となり、PC 鋼より線よりも付着性が低下したと考えられる。今後、コンクリート中に埋設して载荷試験を行う際の定着長の検討や、耐アルカリ性を有し、かつ、付着性を向上させることのできる被覆材を用いるなどの改良が必要と考えられる。

(2) 引張試験

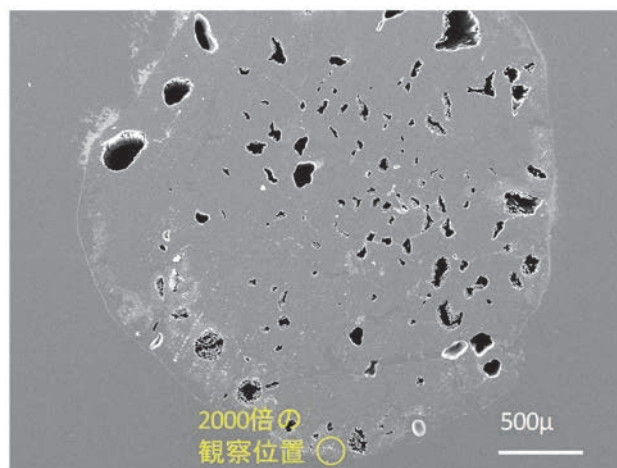
引張試験の結果を表-3に示す。なお、5体のうち2体は、試験体が破断に至る前に定着部で抜けが生じたため、引張耐力は3体のデータである。引張弾性係数については、抜けが生じたものも含め5体のデータを示している。引張耐力の平均値は109kN（変動係数2.0%）、引張弾性係数の平均値は112GP（変動係数4.2%）であった。



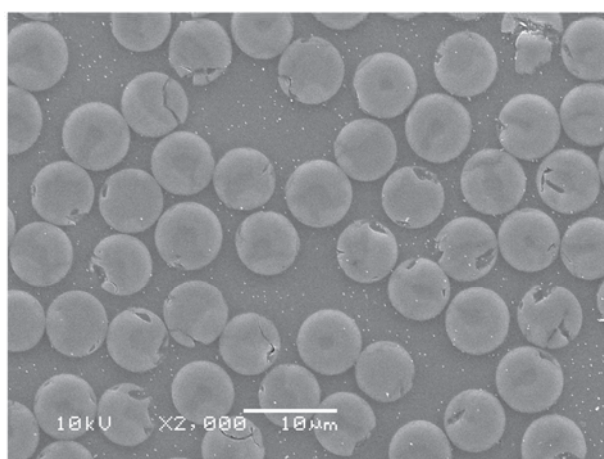
a) EPMAによる面分析 (K元素の分布)



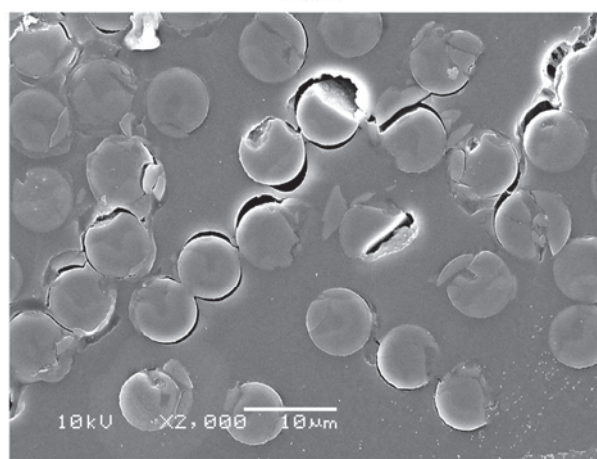
35倍



35倍



2000倍



2000倍

アルカリ水溶液への浸漬無し

アルカリ水溶液への浸漬有り

b) 電子顕微鏡による観察の結果

図-6 EPMAによる面分析と電子顕微鏡による観察の結果

過去に実施したガラス繊維による被覆を有する CFRTP の引張特性と比較すると、引張強度 (85.4kN) は 28%、弾性係数 (90.1 GPa) は 23%向上した²⁾。

引張試験後の試験体の破壊形態を図-5 に示す。定着部での抜けが生じた 2 体を除き、試験区間内で破断した。

(3) 耐アルカリ試験

アルカリ浸漬後の引張試験の結果を表-4 に示す。引張耐力および引張弾性係数は 5 体のデータである。引張耐力の平均値は 98.5kN (変動係数 2.0%)、引張弾性係数の平均値は 111GPa (変動係数 10.9%) であった。

最大荷重保持率 (浸漬後の引張耐力の平均値をアルカリ浸漬前の引張耐力の平均値で除した値) は、0.90 となった。文献 4) に示される熱硬化性の CFRP 緊張材の最大荷重保持率は 0.93 であることから、これと同程度の最大荷重保持率であった。

EPMA による面分析と電気顕微鏡による観察の結果を図-6 に示す。アルカリ水溶液への浸漬なしの場合、EPMA による面分析で、K 元素はほとんど検出されなかった。また、電子顕微鏡により 35 倍および 2000 倍で観察しても、製造時に生じるボイドを除いて、目立った変状は確認されなかった。

アルカリ水溶液への浸漬有りの場合、CFRTP 素線の表層部で K 元素が検出された。K 元素が検出された部分を電子顕微鏡により 2000 倍に拡大して観察した結果、炭素繊維と樹脂の界面の微細な割れが確認された。アルカリ水溶液への浸漬なしの場合ではこのような変状が確認されなかったことから、K 元素などのアルカリ作用によって、劣化したものと考えられる。ただし、35 倍の観察結果からは顕著な変状は確認されなかったことから、アルカリによる劣化は炭素繊維と樹脂の界面の微細な割れに留まったと考えられる。

なお、熱硬化性の CFRP を対象として耐アルカリ試験を実施した既往研究では、製造時に生じた微細なボイドなどの欠陥を起点として、樹脂の微細な割れが生じることを報告している³⁾。本研究での観察の範囲では、このような劣化が生じていたかは明確でなかった。

4. まとめ

本研究では、CFRTP を PC 構造物の緊張材として用いることを想定し、付着、引張および耐アルカリ試験を実施した。以下に、得られた知見を示す。

- 1) 付着試験では、PC 鋼より線と比較して付着性が低く、改善の余地があることを確認した。
- 2) 引張試験では、引張耐力 110kN 程度、弾性係数 110GPa 程度であることを確認した。
- 3) 耐アルカリ試験の結果、最大荷重保持率は、既往の熱硬化性 CFRP と同程度であった。
- 4) 電子顕微鏡により CFRTP の素線の断面を観察した結果、炭素繊維と樹脂の界面に微細な割れが生じていることがわかった。しかし、顕著な劣化は生じていないことも確認できた。

謝辞：本研究は、文部科学省・科学技術振興機構による COI プログラム「革新材料による次世代インフラシステムの構築～安全・安心で地球と共存できる数世紀社会の実現～」により進められたものである。

参考文献

- 1) 鶴澤潔，斎藤義弘，保倉篤：土木・建築分野への複合材料利用—先進材料と革新製造技術による新たな取り組み—，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.73, No.5, II_1-II-9, 2017.
- 2) 櫻庭浩樹，川島陽子，西崎到：PC 部材の曲げ上げ部を模擬した CFRTP 緊張材の引張試験，第 7 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，2018.
- 3) 原田哲夫，出光隆，渡辺明，高山俊一：静的破砕剤を用いた FRP 緊張材の定着方法，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.251-256, 1990.
- 4) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針，コンクリートライブラリー 88, pp.141-142, p.200, 1996.
- 5) Brahim Benmokrane, Ahmed H. Ali, Hamdy M Mohamed, Mathieu Robert and Adel ElSafty.: Durability Performance and Service Life of CFCC Tendons Exposed to Elevated Temperature and Alkaline Environment, *J. Compos. Constr.*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.00000606., 04015043-1-04015043-13

(Received August 30, 2019)

TESTS FOR BOND, TENSION AND ALKALINE RESISTANCE OF CFRTP TENDON

Hiroki SAKURABA, Yoko KAWASHIMA and Itaru NISHIZAKI

This paper presents tests for bond, tension, and alkaline resistance of CFRTP tendons which was developed by COI program. Bond test showed that CFRTP has a lower bond strength than that of PC tendons, and an improvement is needed to enhance the bond strength. Tensile test showed that CFRTP has tensile load capacity, 109kN and elastic modulus, 112GPa. Alkaline resistance test explained that load retention rate after immersion to alkaline solution is almost the same as that of a conventional CFRP. SEM and EPMA for CFRTP before/after the immersion revealed that significant deterioration did not occur and micro cracking between carbon fibers and resin was observed.