

PC部材の曲げ上げ部を模擬した CFRTP緊張材の引張試験

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 (〒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 (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 (同上)

E-mail: nisizaki@pwri.go.jp

生産サイクルの短縮や加工性の向上が期待できる熱可塑性樹脂を用いたCFRP (CFRTP) 緊張材を対象として、PC構造物の曲げ上げ部を模擬した引張試験を実施した。CFRTP緊張材には、直径9mmの7本より線を用いた。実験パラメータは、曲げ上げ部の角度(2,4,8,16°)および偏向具の曲げ半径(90,180,360,540mm)とした。曲げ半径を180mmとし、角度を変化させて引張載荷した結果、直線での載荷と比較して、平均で約10%程度、最大で約14%引張耐力が低下すること、角度を大きくしてもその傾向は同様であることがわかった。次に、偏向具の曲げ半径を大きくした場合、引張耐力の低下度合いが小さくなる傾向があること、曲げ半径を90mmとした場合には引張耐力が大きく低下する恐れがあることが確認された。

Key Words : CFRTP, tendon, tensile load capacity, deviator, bending angle, bending radius

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRP)緊張材は、塩害環境下においても腐食しないなどの優れた耐食性を有することから、プレストレストコンクリート(以下、PC)構造物の緊張材として利用されてきた。例えば、約30年前に、CFRPを緊張材として用いたプレテンション方式単純床版橋が石川県の海岸線沿いに建設されている¹⁾。この橋梁の両側面に設置されていた試験体を、施工から6年後および29年後に1体ずつ回収して曲げ載荷試験を実施し、いずれも設計値を上回る耐荷力を有することが確認されている²⁾。

一方、これまでは、主に熱硬化性樹脂を用いてCFRPが製造されてきたが、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。

このような熱可塑性樹脂を用いたFRP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³⁾。

著者らもこのプログラムに参加し、CFRTPを用いたPC構造物の設計に向けて、図-1に示すようなPC構造物の曲げ上げ部での引張特性やクリープ特性等を明らかにすることを目的として検討している。

本論文では、曲げ上げ部におけるCFRTP緊張材の引張特性を明らかにすることを目的として実施した引張試験の結果について述べる。

2. 引張試験方法

(1) 試験体

CFRTPの概要を図-2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。また、素線の表面には、GFRPによる被

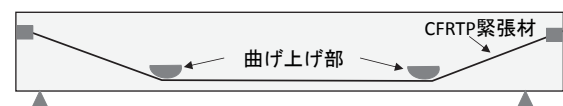


図-1 曲げ上げ部の概要

覆が施されている。CFRTPの直径は9mmであり、有効断面面積は49.7mm²である。



図-2 CFRTPの概要

(2) 試験条件

引張試験の条件を表-2に示す。

No.1は、偏向具を設けず、直線のCFRTPを載荷した条件である。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。定着具は、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⁹⁾。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。

曲げ引張載荷方法の概要を図-3に示す。No.2～8の曲げ引張試験は、JSCE-E 532-1999に準じて実施した。試験数量は、No.2を4体、その他を3体とした。なお、No.2を4体としたのは、1体で顕著な引張耐力の低下が確認されたためである。

CFRTPを全長3740mm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3240mmとしたものを試験体とした。定着具の固定方法はNo.1の場合と同様である。試験体の伸びおよびひずみを得るため、図-3に示すフレーム中央部に設置した偏向具（図-4）と固定側の中央部において、標点距離250mmとして標点間の変位を測定した。荷重は、載荷側の定着具近傍にセンターホール型の荷重計を設置して測定した。

曲げ引張試験の実施状況を図-5に示す。偏向具の曲げ半径は、参考文献5）（道路橋用橋げた設計・製造便覧 JIS A 5373-2004）に示されるPC鋼材折曲げ装置の曲げ半径（180mm以上）を参考に、90, 180, 360, 540mmとした。曲げ角度については、同文献に示されるPC部材の推奨仕様における曲げ上げ角度（約4°）を参考に、2, 4, 8, 16°とした。

(3) 算定項目

図-3に示す固定側の荷重については、緊張材を角変化 α (rad) で曲げた場合、偏向具との摩擦によって引張力が減少することを考慮し、式(1)により求めた⁹⁾。角変化1rad当たりの摩擦係数は、連続繊維補強材で一般的な値とされる0.3を仮定した⁷⁾。曲げ引張載荷における引張耐力は固定側の荷重から求めた。

$$P_x = P_l e^{-\mu\alpha} \quad (1)$$

ここに、 P_x ：固定側荷重、 P_l ：載荷側荷重、 μ ：角変化1rad当たりの摩擦係数、 α ：曲げ角度 (rad)

引張弾性係数は、式(2)より求めた。

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 引張試験の条件

No.	曲げ半径 R(mm)	曲げ角度 θ (deg.)	試験数量
1	偏向具なし	0	5
2	90	4	4
3	180	2	3
4		4	3
5		8	3
6		16	3
7	360	4	3
8	540	4	3

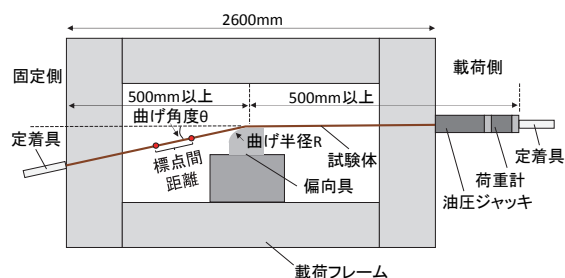


図-3 曲げ引張試験の概要

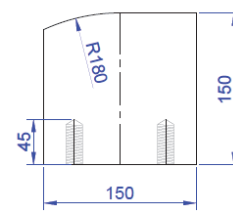


図-4 曲げ半径180mmの偏向具の例



図-5 曲げ引張試験の実施状況

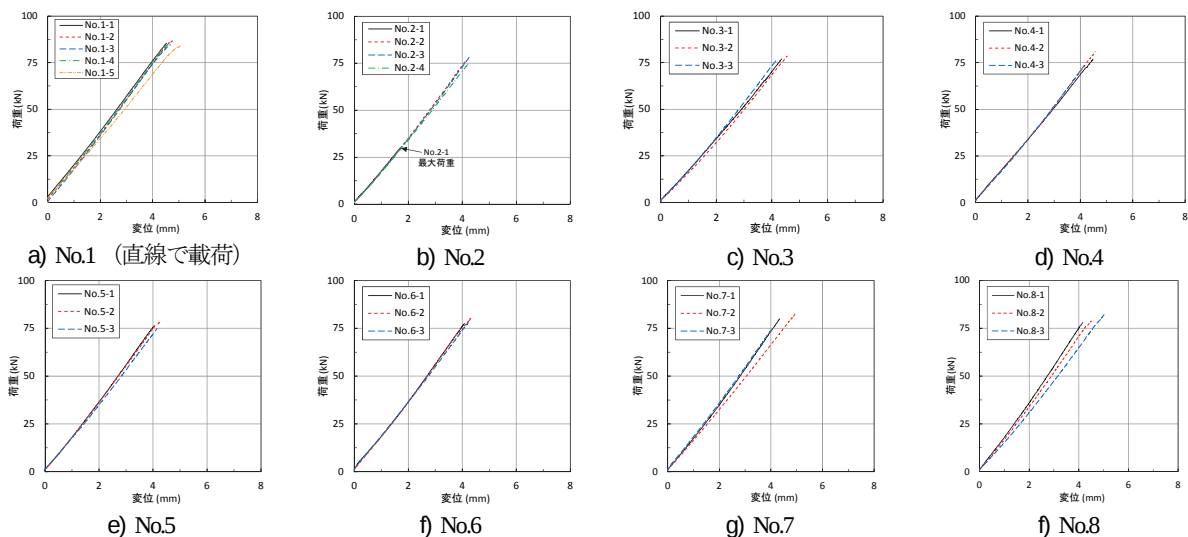


図-6 荷重－変位関係

表-3 引張耐力の測定結果

項目	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
平均 (kN)	85.4 (1719)	64.8 (1304)	77.1 (1552)	77.1 (1551)	76.7 (1543)	79.1 (1591)	79.4 (1598)	80.2 (1614)
標準偏差 (kN)	1.02 (20.5)	23.2 (467)	1.31 (26.3)	3.85 (77.4)	1.97 (39.6)	1.58 (31.7)	3.71 (75)	2.53 (51)
変動係数	0.012	0.358	0.017	0.050	0.026	0.020	0.047	0.032

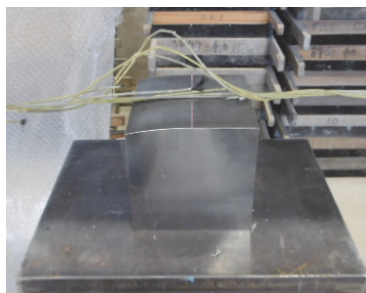
※ () 内の数値は引張強度 (単位: MPa) に換算した場合

表-4 引張弾性係数の測定結果

項目	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
平均 (GPa)	90.1	88.1	87.4	84.7	91.6	91.7	87.2	87.1
標準偏差 (GPa)	3.93	3.16	2.82	1.55	3.18	1.80	4.55	5.56
変動係数	0.044	0.036	0.032	0.018	0.035	0.020	0.052	0.064



a) ほうき状の素線の破断 (No.1)



b) 偏向具付近での破断 (No.7)



c) No.2で引張耐力が顕著に低い場合

図-7 破壊形態

$$E_t = \frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon \cdot A} \quad (2)$$

ここに、 E_t : 引張弾性係数、 ΔP : 最大荷重の20%と60%の2点間の荷重の差、 $\Delta \varepsilon$: ΔP_x と対応する荷重時の2点間のひずみの差、 A : 有効断面積

なお、No.2～8の試験体の引張弾性係数の算定には、式(1)の固定側荷重を用いた。

既往の研究では、熱硬化性CFRPを用いて曲げ引張載荷試験を行っている⁹⁾。式(3)を用いて引張耐力保持率を算定し、既往の研究との比較を試みた。

$$R_b = \frac{P_b}{P_0} \quad (3)$$

ここに、 R_b : 引張耐力保持率、 P_b : 曲げ引張載荷における引張耐力、 P_0 : 直線載荷における引張耐力の平均値

3. 引張試験結果と考察

(1) 荷重-変位関係

荷重-変位関係を図-6に示す。なお、最大荷重 (引張耐力) に至るまでの荷重と変位を示している。いずれの

試験条件においても、線形関係を示すことが確認される。各試験体の引張耐力は70～80kN程度の範囲であり、最大変位は4～5mm程度（ひずみに換算すると16000～20000 μ 程度）であった。ただし、試験条件No.2（偏向具の曲げ半径90mm、曲げ角度4°）の1体の試験体のみ、引張耐力は30kN程度、最大変位は2mm程度であった。

引張耐力および引張弾性係数の測定結果を、それぞれ、表-3および表-4に示す。引張耐力は、No.2を除き、平均値が77.1～85.4kN、変動係数が0.012～0.050の範囲であった。引張弾性係数は、平均値が84.7～91.7の範囲、変動係数が0.018～0.064の範囲であった。これらの結果から、No.2の引張耐力の結果を除き、各試験結果のばらつきは大きくないと考えられる。

(2) 破壊形態

破壊形態を図-7に示す。直線で載荷した条件（No.1）では、図-7 a)に示すように、素線がほうき状に破断し、破壊に至った。曲げ引張载荷の偏向具付近で素線が破断した例を図-7 b)に示す。曲げ引張载荷時の状況から、偏向具に接触した素線から破断するものと推察された。なお、試験条件No.2で引張耐力が顕著に低かった試験体においては、素線がほうき状に破断せず、図-7 c)のように破断した面の繊維が揃っていた。

偏向具に接触した素線には、摩擦によるせん断応力が生じると考えられる⁹⁾。No.2は偏向具の曲げ半径を90mmと小さくした条件であり、試験体との接触面が小さくなることが想定される。図-8に曲げ半径90mm、180mm、360mmの偏向具における試験体の接触痕を示す。素線の破断後、試験体が急激に引っ張られるため、偏向具には図-8のような接触痕が残る。曲げ半径90mmの場合、他と比較して接触痕が短く、偏向具と試験体の接触面が小さかったことが推察される。このため、No.2では、偏向具の法線方向の直応力が大きくなって摩擦によるせん断応力が大きくなり、図-7 c)のように破断する恐れがあるものと思われる。

(3) 曲げ角度および曲げ半径が引張耐力に及ぼす影響

曲げ角度が引張耐力に及ぼす影響を図-9に示す。曲げ引張载荷とした場合、直線载荷と比較して、平均で約10%程度引張耐力が低下し、曲げ角度を大きくしてもその傾向は同様であることが確認された。曲げ角度を4°とした条件では、最大で約14%引張耐力が低下した。

参考文献5)に示されるプレキャストPC桁の曲げ上げ部は約4°であることから、今回の試験体を同様のPC桁に適用する場合、曲げ上げ部で最大約14%の引張耐力の低下があることを考慮する必要があると考えられる。

既往の研究では、熱硬化性樹脂を用いた直径12.5mmの7本より線のCFRPについて、曲げ引張試験が行われて

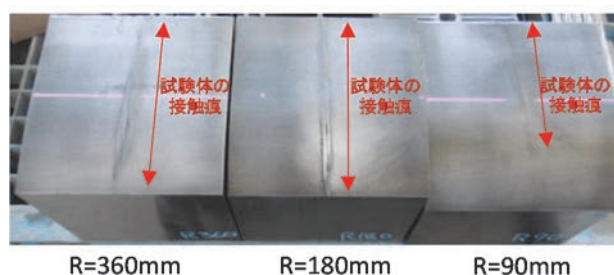


図-8 偏向具における試験体の接触痕

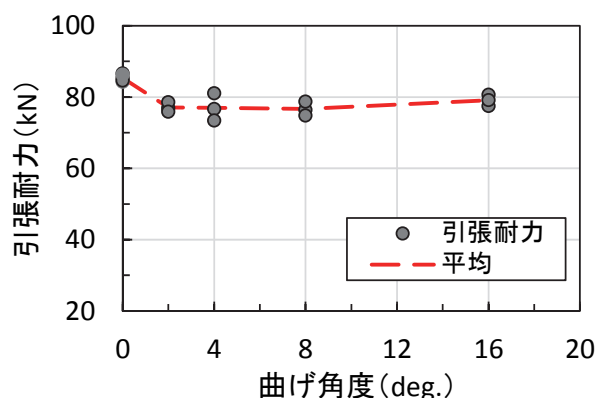


図-9 曲げ角度が引張耐力に及ぼす影響

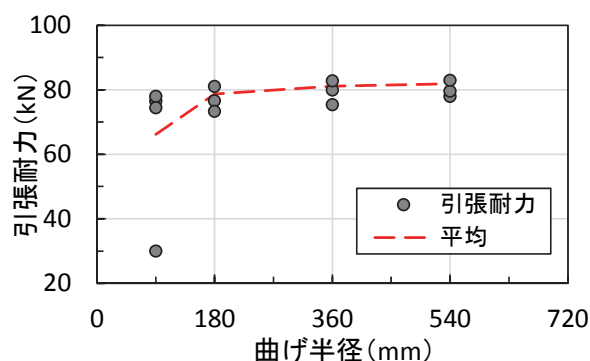


図-10 偏向具の曲げ半径が引張耐力に及ぼす影響

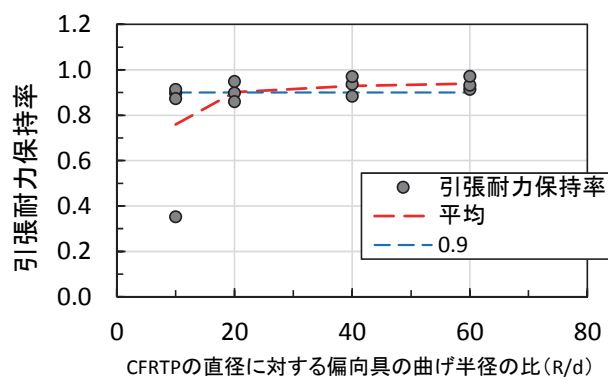


図-11 引張耐力保持率と CFRTP の直径に対する偏向具の曲げ半径の比の関係

いる⁹⁾。この研究においては、曲げ角度を15°よりも大きくした場合、曲げ角度の影響が小さくなり、一定の引張耐力に収束したことが示されている。本研究で用いた試験体については、曲げ角度2°以降に一定の引張耐力に収束したものと思われ、従来のCFRPよりも曲げ角度の影響を受けにくい可能性がある。ただし、既往の研究において、上述の曲げ引張試験では偏向具の形状が円形のものを用いており、本研究で用いた偏向具の形状(図-4)と異なる。今後、偏向具の形状の影響も確認する必要がある。

偏向具の曲げ半径が引張耐力に及ぼす影響を図-10に示す。偏向具の曲げ半径が大きい方が、引張耐力の低下が小さくなる傾向が確認される。また、曲げ半径を90mmとした場合には、上述した通り、1体の試験体で引張耐力が30kN程度となり、顕著に引張耐力が低下した。よって、偏向具の曲げ半径については、180mm以上、すなわち、CFRTPの直径に対して20倍以上にする必要があると考えられる。引張耐力の低下を防ぐためには、なるべく曲げ半径が大きい偏向具の使用が望ましい。

引張耐力保持率とCFRTPの直径に対する偏向具の曲げ半径の比の関係を図-11に示す。既往の研究では、偏向具の曲げ半径の影響も検討されている⁹⁾。例えば熱硬化性樹脂を用いた直径15.2mmの7本より線のCFRPの場合、曲げ角度5°の条件において、円弧状の偏向具の曲げ半径をCFRPの直径の16.5倍以上とすると直線での引張耐力と比較して引張耐力の低下が10%以下になることが確認されている。図-9では、CFRTPの直径に対する偏向具の曲げ半径の比を20倍以上(曲げ半径180mm以上)の場合で平均値が同程度の傾向になることから、偏向具の曲げ半径の影響は従来のCFRPと同程度の可能性がある。

4. まとめ

本研究では、PC構造物の曲げ上げ部を想定し、直径9mmの7本より線の熱可塑性CFRP緊張材について、曲げ角度および偏向具の曲げ半径が引張耐力に及ぼす影響を検討した。

- 1) 曲げ半径を180mmとし、曲げ角度を変化させて引張耐力の結果、直線での引張耐力と比較して、平均で約10%、最大で約14%引張耐力が低下すること、今回の実験範囲(0~16°)では曲げ角度を大き

くしてもその傾向は同様であることがわかった。

- 2) 偏向具の曲げ半径を大きくした場合、引張耐力の低下度合いが小さくなる傾向があること、曲げ半径を90mmとした場合には引張耐力が大きく低下する恐れがあることが確認された。
- 3) 偏向具の曲げ半径については、CFRTPの直径に対して20倍以上にする必要があると考えられる。引張耐力の低下を防ぐためには、なるべく曲げ半径が大きい偏向具の使用が望ましい。

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) 細沼宏之，川畑勝嗣：橋梁への新素材の適用による耐久性向上に向けた取組み，土木技術資料，57-12，pp.38-41，2015。
- 2) 深田宰史，花岡大伸，小林和弘，幸田英司：塩害環境に長期暴露されたCFCC緊張材を有するPC桁の耐力・耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.1411-1416，2018。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) プレストレスト・コンクリート建設業協会：道路橋用橋げた設計・製造便覧 JIS A 5373-2004 プレキャストプレストレストコンクリート製品，p144-154,239-252，2004。
- 6) 原田哲夫，榎本剛，佐々木謙二，牛島健一：CFRPより線の曲げ引張特性と外ケーブル工法への適用に関する研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.68，No.4，pp.330-342，2017。
- 7) 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.45-47，1996。
- 8) Hong Zhu, Zhi-Qiang Dong, Gang Wu, HAO-Yang Chen, Jian Li and Yan Liu: Experimental evaluation of bent FRP tendons for strengthening by external prestressing, Journal of Composite for Construction, Vol.21(5), 2017。

TENSILE TEST FOR THE CFRTP TENDON WITH DEVIATORS OF PC MEMBERS

Hiroki SAKURABA, Yoko KAWASHIMA and Itaru NISHIZAKI

This paper investigates the effect of bending angles and bending radii of deviators to tensile load capacity of CFRTP tendon for pre-stressed concrete members. Tensile load capacity was lowered about 10% for the test conditions of bending angles from 2° to 16° with bending radius of 180mm, but the effect of increasing bending angle was not significant. It is noted that for the test conditions of bending angles of 4° with bending radius of 90mm, tensile load capacity was significantly lowered and that bending radius for the CFRTP tendon should be more than 20 times the size of its radius.