# 論文　U 型アンカーを有する CFRP ロッドの引張特性および RC はりの曲げ補強筋としての適用

渡邉　弘史[*1]・山口　浩平[*2]・越路　正人[*3]・日野　伸一[*4]

**要旨**：本研究は，炭素繊維を自動配筋ロボットによりロッド状に束ね，熱硬化型樹脂により硬化した CFRP ロッドを用いた工法を開発するに当たり，本ロッドの引張特性および RC はりの曲げ補強筋としての適用を検討した。内容は，引張強度，継手強度，リラクセーション率，付着強度および RC はりの曲げ挙動である。これらの結果より，100 万時間純推定リラクセーション率に対しては本ロッドの改良が必要と判断されたが，本ロッドを RC はりの曲げ補強筋として適用した場合，U 型アンカーが継手として有効に機能すること，また現行の RC 理論で設計可能であることが明らかとなった。

**キーワード**：　CFRP ロッド，引張特性，リラクセーション率，付着強度，RC はりの曲げ補強筋

## 1. はじめに

近年，コンクリート構造物(PC や RC 構造)の早期劣化が顕在化し，大きな社会問題となっている。特に飛沫帯付近の塩害環境下にある構造物にその傾向が顕著に認められる。このような環境下でのコンクリート構造物の早期劣化要因は種々あるが，その一つとして，塩害による内部鉄筋の腐食が考えられる。腐食した内部鉄筋の補修補強としては，炭素繊維補強材を用いる場合が多い。しかし，現在の設計手法では内部鉄筋を降伏させないように補強量を選定するため，補強量が過大になり経済的ではない場合がある。

そこで，著書らは炭素繊維を自動配筋ロボットによりロッド状に束ね，熱硬化型樹脂により硬化した CFRP ロッド(以下，CF ロッド)を開発した。現在は，この CF ロッドをコンクリート構造物の内部鉄筋と置き換える工法（以下，CF 工法）を開発中である。この CF 工法が確立すれば，コンクリート構造物中の鉄筋の腐食対策は原則不要となり，メンテナンスフリーとなることが期待される。また，内部鉄筋に炭素繊維を用いることから，コンクリート構造物の軽量化が可能になると期待される。特に港湾構造物では塩害の影響が大きいため, CF 工法が大いに貢献できると考える。

CF ロッドの製作工程において，**写真－1** のような「U 型部」が製作されるため，CF 工法ではこの U 型部を継手および PC 部材の定着部に応用することも検討中である。本研究は，CF 工法を開発するに当たり，CF ロッドの引張特性および RC はりの曲げ補強筋としての適用に関する試験を実施したものである。

## 2. CF ロッドの特徴

CF ロッドに用いる炭素繊維の規格を**表－1**，**表－2** に示す。また，製作方法の概要を**図－1** に示す。CF ロッドは「巻き数」により必要な引張耐力を設計でき，本研究では**表－3** に示す巻き数を用いた。これは異形鉄筋では D13 および D29 の引張耐力に相当する。

**写真－1　CF ロッド(左：全景，右：U 型部接写)**

**表－1　炭素繊維の規格**

| 引張強度(N/mm$^2$) | 繊維 tex※(g/1000m) | 密度(g/m$^3$) |
|---|---|---|
| 4900 | 800 | 1.80 |

※繊維 tex：繊維の太さを示す単位

**表－2　熱硬化型樹脂含浸後の炭素繊維**

| 繊維体積含有率 (%) | 樹脂含有率 (%) | 空隙率 (%) | 繊維断面積 (mm$^2$) |
|---|---|---|---|
| 58.0 | 33.0 | 9.00 | 0.44 |

**表－3　CF ロッド規格(設計値)**

| 名称 | 直径 (mm) | 断面積 (mm$^2$) | 引張耐力 (kN) | 引張強度 (N/mm$^2$) |
|---|---|---|---|---|
| 20 巻 | 6.0 | 28.3 | 77.0 | 2551 |
| 80 巻 | 12.5 | 123 | 347.0 | 2828 |

*1　（株）福山コンサルタント　リスクマネジメント事業部　(正会員)
*2　（一財）橋梁調査会　博（工）　(正会員)
*3 東京鉄鋼（株）　開発部
*4 九州大学大学院　工学研究院　工博　(正会員)

## 3. 引張特性に関する試験

### 3.1 引張強度試験

#### (1) 供試体

JSCE－E531　連続繊維補強材の引張試験方法(案)[1)]に準じて，CF ロッド 20 巻および 80 巻に対して引張強度試験を実施した供試体を**図－2** に示す。供試体は各 5 本ずつ作製した。なお，　CF ロッドの 2 倍の引張耐力まで耐えられるように, CF ロッドの両側は静的破砕剤により CF ロッドと鋼管スリーブを定着した。

試験状況を**図－3** に示す。固定側には球座を設置し，偏心による影響を最小限とした。また，定着部付近で変位を計測し，鋼管スリーブの引き抜けは変位計により確認した。ヤング率は，ひずみゲージのひずみ値より算出した。

#### (2) 試験結果

試験結果の平均値(各 5 本)を**表－4** に示す。既往の研究結果 [2)]と同様に，20 巻および 80 巻の両方とも実測値が設計値をやや下回った。これは，一般的な CFRP ロッド製作時の課題点である，全ての繊維に均等に張力が作用しないことが要因と考える。

**図－4** に 20 巻の荷重－ひずみ関係(N=5 本)を示す。同図より全ての供試体は線形挙動を示し，最大引張ひずみ 15,000 $\mu$ 程度であることがわかる。なお，CF ロッドはぜい性的に破断するため, 破断箇所の特定はできなかった。また，No.5 はひずみ値が減少している箇所が認められる。これは, CF ロッドの周方向繊維の一部が破断したためと推定する。

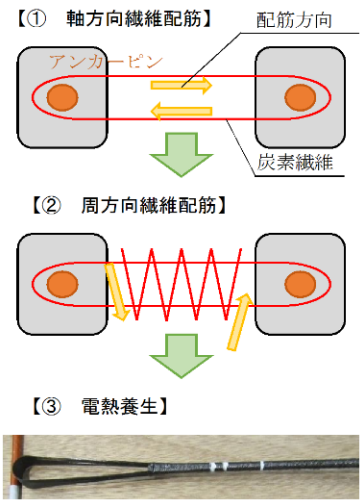
### 3.2 継手強度試験

#### (1) 継手形式の選定

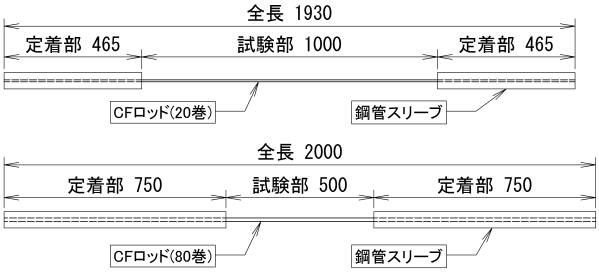
CF 工法を開発するに当たり，CF ロッドをコンクリート構造物の内部鉄筋と置き換える際, CF ロッドの継手方法が課題となる。異形鉄筋の一般的な継手方法としては，重ね継手，圧接継手および機械式継手がある。これらの継手方法の CF ロッドへの適用性を検討した。なお，CF ロッドは炭素繊維であることから圧接継手は除外した。

#### (2) 供試体

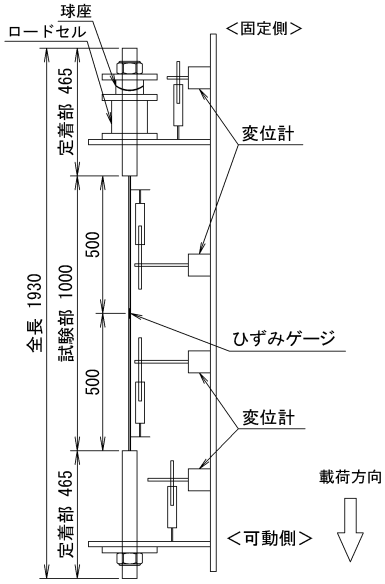
継手形式の検討は，機械式継手を引張試験で，重ね継手をはり試験にて実施した。JSCE－E531　連続繊維補強材の引張試験方法(案)[1)]に準じて，機械式継手を設けた CF ロッド 20 巻に対して引張試験を実施した。供試体を**図－5** に，継手部詳細を**図－6** に示す。本試験では CF ロッド製作時にできる U 型部を機械式継手として配置した。なお，試験方法は 3.1 と同様である。




**図－1　CF ロッド製作概要図**



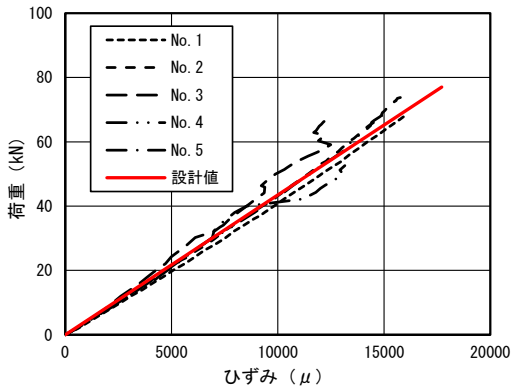

**図－2　引張強度試験供試体(上：20 巻，下：80 巻)**



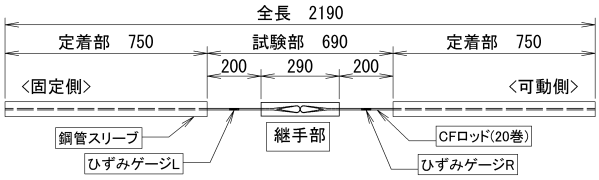

**図－3　引張強度試験状況(20 巻)**

**表－4　引張強度試験結果**

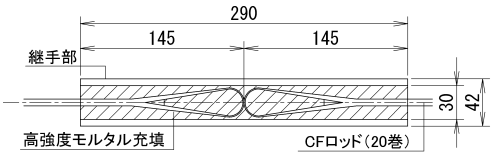
| 供試体 | 荷重(kN) | | | 引張強度(N/mm$^2$) | | | ヤング率(×10$^5$N/mm$^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 設計値 | 実測値(平均) | 実測/設計 | 設計値 | 実測値(平均) | 実測/設計 | 実測値(平均) |
| 20 巻 | 77.0 | 69.8 | 0.91 | 2551 | 2311 | 0.91 | 1.62 |
| 80 巻 | 347 | 292 | 0.84 | 2828 | 2381 | 0.84 | 1.28 |



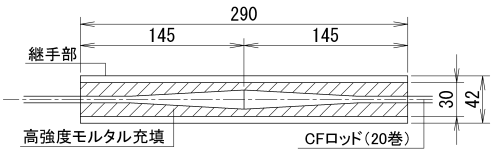

図－4　引張強度試験荷重－ひずみ関係(20 巻)




図－5　継手強度試験供試体




(a)　正面図



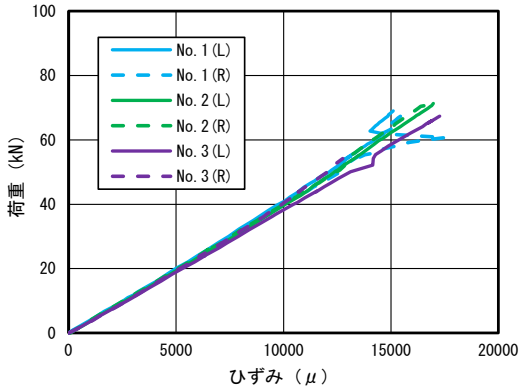

(b)　平面図

図－6　継手部詳細

表－5　継手強度試験結果

| No. | 荷重(kN) | | | 実測/設計 | 破壊モード |
|---|---|---|---|---|---|
| | 設計値※1 | 実測値 | 実測値(平均) | | |
| 1 | 69.8 | 69.0 | 69.2 | 0.99 | 母材の引張破断 |
| 2 | | 71.3 | | 1.02 | 母材の引張破断 |
| 3 | | 67.4 | | 0.97 | 母材の引張破断 |

※1　設計値は引張強度試験の平均値




図－7　継手強度試験荷重－ひずみ関係

(3) 試験結果

試験結果を**表－5** に示す。全ての供試体が**図－5** 中の試験部 200mm の母材で引張破断し，実測値は引張強度試験と同程度であった。これは U 型部内のモルタルと U 型部との支圧力によって，いわゆるくさび効果を発揮したためである[2)]。よって，機械式継手の有効性が示されたと考える。また，荷重－ひずみ関係を**図－7** に示す。引張強度試験と同様，線形挙動を示し終局に至っており，定着部の引き抜けがないことが確認されている。

### 3.3 リラクセーション試験

(1) 供試体および試験方法

CF 工法では，PC 構造物の緊張材への適用も考えている。その際に，CF ロッドのリラクセーション率が設計上必要であるため，リラクセーション試験を実施した。

本試験で用いた供試体を**図－8** に示す。リラクセーション試験は CF ロッド自体の物性を確認する目的から，U 型部は除去した。本試験で用いた試験機を**写真－2** に示す。JSCE－E534　連続繊維補強材の長時間リラクセーション試験方法(案)[1)]に基づき，3 本の供試体に対し引張強度の実測平均値の 70%まで載荷した後，載荷状態を保持し，規程の時間の荷重およびひずみを計測した。

(2) 試験結果

**図－9** に 1000 時間での荷重変化を，**図－10** に 100 万時間推定純リラクセーション率をそれぞれ示す。平均 100 万時間推定純リラクセーション率は 20.5%となり，JIS G 3109 に示される PC 鋼棒の規格値である 4.0%以下を超過した。要因としては，定着部の緩やかな引き抜け，炭素繊維の局部的な破断が考えられるため，CF ロッドを PC 構造物に適用するためには，定着部や CF ロッドの改良が必要と考える。

## 4. 付着特性に関する試験

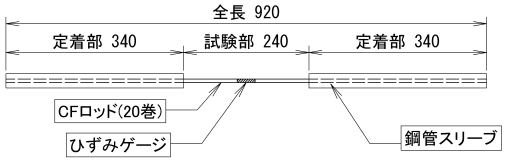
(1) 供試体

CF ロッドとコンクリートとの付着特性を確認する目的で，付着強度試験を実施した。供試体は JSCE－E539 引抜き試験による連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験方法(案)[1)]に準じて作製した。供試体を**図－11** に示す。また，CF ロッドと同径の異形鉄筋 D6 についても同様の試験を実施した。なお，供試体は各 5 体とした。

引張強度試験と同様に，変位計により定着部およびコンクリートブロックから突出させた CF ロッド端部の引き抜け量を計測した。

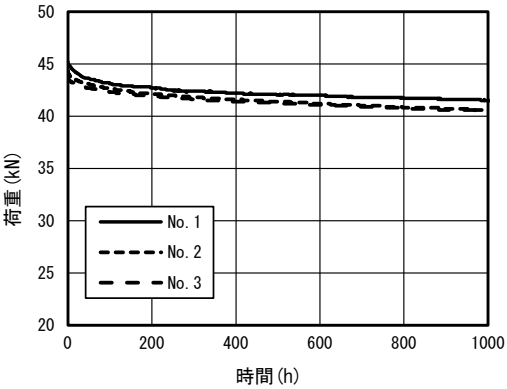
(2) 試験結果

付着強度試験の結果を**表－6** に示す。同表より，CF ロッドは異形鉄筋とほぼ同程度の付着強度を呈したことから，CF ロッドは異形鉄筋と同程度の付着特性を有することが示されたと考える。

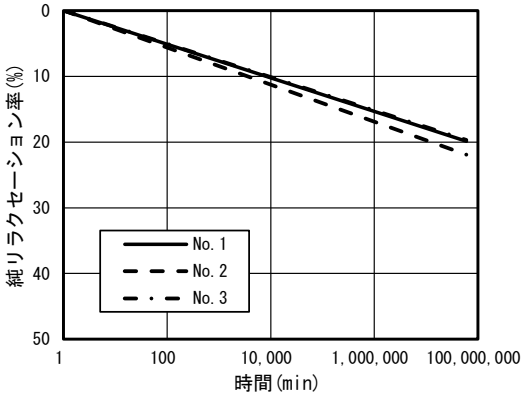



図－8　リラクセーション試験供試体

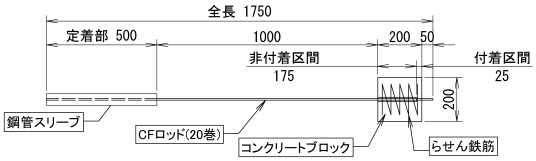
写真－2　リラクセーション試験機
（左：試験機，右：載荷状態保持用架台）



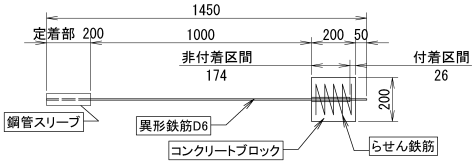

図－9　荷重－時間関係




図－10　100 万時間推定純リラクセーション率




(a)　CF ロッド(20 巻)




(b)　異形鉄筋 D6

図－11　付着強度試験供試体

表－6　付着強度試験結果

| 供試体 | | 付着強度(N/mm²) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 設計値 | 実測値 | 実測値平均 | 実測/設計 |
| CF ロッド (20 巻) | 1 | 10.5 | 23.6 | 20.4 | 2.25 |
| | 2 | | 22.0 | | 2.10 |
| | 3 | | 15.5 | | 1.48 |
| | 4 | | 24.7 | | 2.35 |
| | 5 | | 16.4 | | 1.56 |
| 異形鉄筋 D6 | 1 | 9.80 | 24.1 | 23.9 | 2.46 |
| | 2 | | 26.5 | | 2.70 |
| | 3 | | 26.9 | | 2.74 |
| | 4 | | 23.6 | | 2.41 |
| | 5 | | 18.4 | | 1.88 |

## 5. CF ロッド同士の継手を有する RC はりの曲げ挙動

### (1) 供試体

引張強度試験，継手強度試験および付着強度試験の結果を基に，CF 工法の有効性を確認するため，引張鉄筋を CF ロッドと置き換えた継手を有するはり供試体を作製し，曲げ試験を実施した。はり供試体に用いた材料特性を**表－7** に示す。なお，表中の「保証値」とは，引張強度および付着強度の最大値と最小値を除いた，残り 3 本の平均値から標準偏差の 3 倍を引いた値である。

はり供試体の設計荷重および種類を**表－8**，**表－9** に，形状を**図－12** および**図－13** に示す。ここに，**表－8** の CF ロッド破断荷重は，CF ロッドのひずみが，**表－7**(b)の 1/3 引張強度に達した時の荷重である。同じく，コンクリート圧壊荷重は，コンクリートの曲げ圧縮破壊荷重であり，はりの終局時には CF ロッドは破断しないと設計した。引張力が作用する側に CF ロッド 20 巻を 3 本配置し，圧縮側に D22 を 3 本，せん断補強筋は D13 を 100mm 間隔で配置した。

供試体は 4 種類作製した。TYPE-0 は，継手を有しない CF ロッドを引張補強筋として配置した基準試験体である。TYPE-S-300 は，CF ロッドとコンクリートの付着強度から算出される重ね継手長さ式[3] を用いて算出した重ね継手長さ 300 ㎜を有する U 型アンカーなしの試験体である。ただし，既往の研究[4] によると，一般的な CF ロッドとコンクリートの付着特性に基づく重ね継手長を有する RC はりが曲げを受けた場合，CF ロッドは鉄筋と同様の扱いができずに，その継手性能が劣ることが報告されている。そこで，TYPE-U-300 として，TYPE-S-300 の重ね継手長部分に U 型アンカーを含ませ，U 型アンカーで定着力が確保し得る重ね継手を併用した試験体である。TYPE-U-150 は参考文献[2] で得られた『U 型アンカーの引抜耐力は，CF ロッドの引張耐力以上である。』ことを鑑み，重ね継手による継手性能を満足しない継手長を 150 ㎜として，主に U 型アンカーで定着力を確保した試験体である。また，コンクリート標準示方書【設計編】[3]に基づき，継手を同一断面に集

めないよう，軸方向に CF ロッド直径の 25 倍の離隔を確保した。さらに，CF ロッドをはり側面から 10mm 突出させ，CF ロッドの引き抜けについて計測した。

(2) 試験結果

試験結果を**表－10** に示す。TYPE-0 と TYPE-U-300 の最大荷重は設計値を超過したが，他の 2 体は設計値の 50~60%程度で破壊した。**図－14** に荷重 - スパン中央変位関係を示す。全ての試験体は荷重 40kN 程度で荷重が一時低下し，この時に曲げひび割れが発生した。

TYPE-0 と TYPE-U-300 の最大荷重は同程度であり，中央部変位は約 40mm に達した。U 型アンカーを用いた TYPE-U-300 は，TYPE-0 と同様の挙動を示したことから，十分な継手性能を有することがわかった。これは U 型アンカー内のコンクリートのくさび効果により定着力が確保されたことを示唆している。

TYPE-S-300，TYPE-U-150 は荷重 60-80kN で荷重が増加することなく，中央部変位が増加していき，ひび割れの開口幅が増大したため，試験を終了させた。これは，既往の研究[4]と同様の傾向を示し，引張補強筋である CF ロッドが引張力を負担できなくなったためであり，CF ロッドの継手性能が不十分で CF ロッドが引き抜けたことを示唆している。また，両タイプを比較すると，U 型アンカーが配置されていても継手長 150mm では不十分となる結果となった。このことより，必要な定着長に U 型アンカーを含ませることで，十分な継手性能を発揮することがわかった。

次に，はりの上縁コンクリートの荷重-ひずみ関係を**図－15** のマイナス側に，CF ロッドの荷重-ひずみ関係を同図のプラス側に示す。いずれの試験体も荷重 40kN 付近での曲げひび割れ発生時にコンクリートが負担する引張力が解放され，CF ロッドに応力が伝達されたため，CF ロッドの引張ひずみが増加しているのがわかる。また，TYPE-0 と TYPE-U-300 の CF ロッドの最大ひずみは同程度であった。全試験体の中で最も大きいひずみを示したのは，TYPE-0 の 10640$\mu$ であった。しかし，ロッドの設計上の破断ひずみ 15910$\mu$ を超えていないことから，CF ロッドが破断していないことが推察される。さらに，TYPE-0 および TYPE-U-300 の最大荷重は，RC はりの曲げ圧縮破壊を仮定した設計値と同値であること，RC はりの両端部に突出させた CF ロッドの引込も確認されなかったことから，これらのタイプでは，CF ロッドの付着破壊は起きなかったことを示唆している。また，はり上縁コンクリートのひずみ値が使用したコンクリートの終局ひずみ約 4000$\mu$ 未満であることから，圧縮破壊もしていないと推察される。

TYPE-S-300 および TYPE-U-150 の最大荷重時のひずみは引張側が 4000$\mu$ 程度，圧縮側は 1500$\mu$ 程度とともに小さいことから，CF ロッドが破断していないことおよびはり上縁のコンクリートは圧縮破壊していないと推察される。今後，数値解析により CF ロッドの付着特性，U 型アンカー部の挙動，くさび効果の確認および引き抜けが生じた原因の解明を検討する予定である。

**表－7　材料特性値**

(a)　RC はり

| 項目 | コンクリート(N/mm$^2$) | 鉄筋(N/mm$^2$) |
|---|---|---|
| 圧縮強度 | 24.0 | — |
| 引張強度 | — | 490 |
| 降伏強度 | — | 345 |
| 弾性係数 | $2.50\times10^4$ | $2.05\times10^5$ |

(b)　CF ロッド

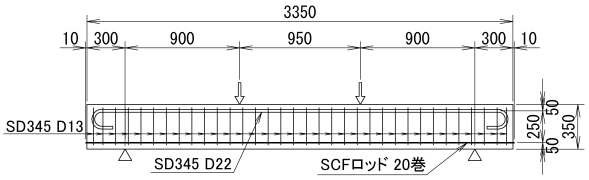
| 項目 | 単位 | 設計値 | 備考 |
|---|---|---|---|
| 巻き数 | — | 20 巻 | — |
| 公称径 | mm | 6.00 | — |
| 公称断面積 | mm$^2$ | 30.2 | — |
| 引張強度 | N/mm$^2$ | 2227 | 保証値 |
| 1/3 引張強度 | N/mm$^2$ | 740 | 許容引張応力度として使用 |
| 付着強度 | N/mm$^2$ | 11.4 | 保証値 |
| 1/3 付着強度 | N/mm$^2$ | 3.80 | 許容付着応力度として使用 |
| 破断時ひずみ | $\varepsilon_t$ | 15910 | 保証値から再計算 |
| 弾性係数 | N/mm$^2$ | $1.40\times10^5$ | 保証値から再計算 |

**表－8　RC はり供試体設計荷重**

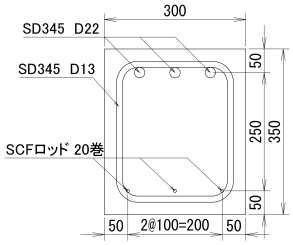
| 項目 | 単位 | 荷重 |
|---|---|---|
| ひびわれ荷重 | kN | 27.9 |
| CF ロッド許容引張強度時荷重 | kN | 45.0 |
| CF ロッド破断荷重 | kN | 120 |
| コンクリート圧壊荷重 | kN | 120 |

**表－9　RC はり供試体種類**

| 供試体 | 継手長(mm) | 継手方法 |
|---|---|---|
| TYPE-0 | — | — |
| TYPE-S-300 | 300 | 重ね継手 |
| TYPE-U-300 | 300 | 重ね継手+機械式継手 |
| TYPE-U-150 | 150 | 重ね継手+機械式継手 |

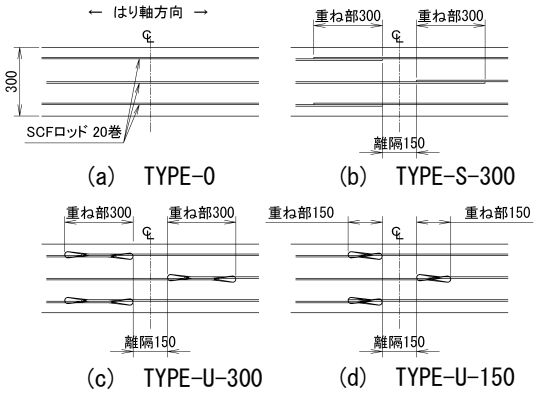



(a)　側面図




(b)　断面図

**図－12　はり供試体(TYPE-0)**



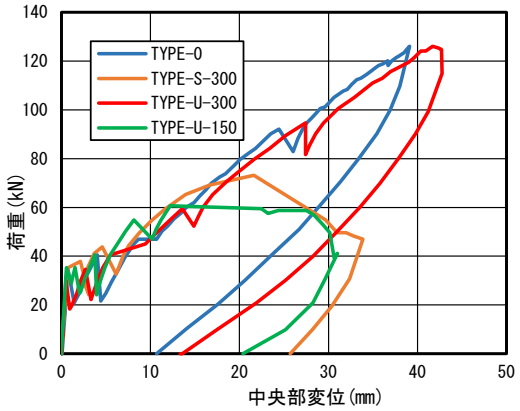

(a) TYPE-0　(b) TYPE-S-300

(c) TYPE-U-300　(d) TYPE-U-150

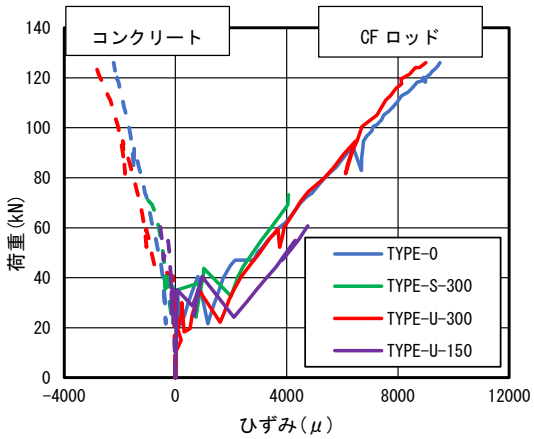
図－13　はり供試体継手部詳細

表－10　はり試験結果

| 供試体 | CF ロッド破断荷重(kN) | 最大荷重(kN) | | 曲げ補強筋 |
|---|---|---|---|---|
| | 設計値 | 実測値 | 実測値/設計値 | |
| TYPE-0 | 120 | 126 | 1.05 | — |
| TYPE-S-300 | | 73.1 | 0.61 | 引き抜け |
| TYPE-U-300 | | 126 | 1.05 | — |
| TYPE-U-150 | | 60.7 | 0.51 | 引き抜け |




図－14　荷重－中央部変位関係




図－15　荷重－ひずみ関係

## 6. まとめ

本研究では，CF 工法を開発するに当たり，CF ロッドの引張特性に関する試験を実施した。以下に得られた結果を示す。

(1) 引張強度試験では，全ての供試体において，設計値より実測値がやや下回った。これは既往の研究結果と同様の傾向であった。CF ロッド製作時に全ての繊維に均等に張力が作用しないことが要因と推定する。

(2) 継手強度試験では，全ての供試体が母材破断となり，U 型アンカーを用いた機械式継手の妥当性が示された。

(3) 100 万時間推定純リラクセーション率は約 20%程度となり，PC 鋼棒の規定である 4.0%を超過した。CF ロッドを PC 構造物の緊張材として用いるためには，定着部や CF ロッドの改良が必要と考える。

(4) 付着強度試験において，CF ロッド 20 巻は同径の異形鉄筋と同程度の付着強度 20N/mm$^2$ が得られた。

(5) U 型アンカーによる機械式継手と重ね継手を併用することで，変形能および耐荷挙動は継手なしのタイプと同等であり，十分な継手性能を有することがわかった。これは U 型アンカー内のコンクリートのくさび効果により定着力が確保されたことを示唆している。


## 謝辞

本研究は，「Super-CFRP 推進研究会」の工法開発研究テーマの一環として実施しました。研究を実施するに当たり，琉球大学　富山潤准教授にはリラクセーション試験機についてご協力いただきました。また，Super-CFRP 推進研究会の方々および当時九州大学大学院生　甘宇君にも多大なご協力を頂きました。この場をお借りして御礼申し上げます。


## 参考文献


1) 土木学会：コンクリートライブラリー88　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(案)，2002.1

2) 鳥巣陽平：CFRP の強度特性および CFRP を用いた RC はりのせん断耐力評価に関する研究，九州大学修士論文，2009.3

3) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2013.3

4) 椎名貴快，伊藤忠彦，潮田和司，松野繁宏：鉄筋との重ね継手を有する CFRP コンクリートはりの曲げ挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，pp.253-258，2000.7