

# 論文 非硬化型連続炭素繊維集合材を補強筋に用いたコンクリート床版の曲げ特性

山口 浩平\*1・太田 俊昭\*2・日野 伸一\*3・原田 耕司\*4

**要旨:** UCAS工法は、非硬化炭素繊維(CF)をコンクリート部材の補強材として用いる工法であり、エポキシ樹脂などで硬化、成形しない平行弦CFを自動配筋ロボットによって配筋する新しい補強工法である。この工法は、設計、積算、配筋などをオンライン化することで省力化、省資源化が図られ、環境に配慮した施工が行えるなどの利点がある。そこで本研究では、非硬化型CFのコンクリート補強材への適用を目的として、引張試験によりその材料特性を把握し、さらに非硬化型CFを補強筋として用いた実物大のプレキャストコンクリート床版の曲げ破壊試験を行いその力学特性の検証を行った。

**キーワード:** 非硬化型連続炭素繊維, 引張特性, 自動配筋ロボット, プレキャスト床版

## 1. はじめに

CFは、直径が約7ミクロンのフィラメントを12Kや70K(K=1,000本)に束ねた集合材である。**写真-1**は12Kをポピンに巻きつけた製品である。この集合材の引張強度は、初期ゆるみなどにより公称引張強度(通常3500~5000N/mm<sup>2</sup>)の10~20%である<sup>1)</sup>。このため従来のCFRPは、CFの集合材をまずプリプレグ(未硬化樹脂を含浸)し、次いで120~150℃で熱硬化させて公称引張強度の70%強の安定強度を得ている。反面、この工程により、CFRPは非硬型CFの5倍以上と高価にな

り、建設分野における普及の障害となっている。しかし、著者らが提案する非硬化型CFは、それらの工程を必要としない非硬化型もしくは部分硬化型であるため、大幅なコストダウンが図られる可能性がある。

その非硬化型CFをコンクリート部材の補強材に適用することにより、IT時代における環境適合型建設システムの一手法になると考えられ<sup>2)</sup>、それをUCAS(Un-resin Carbon-fiber Assembly Systems)工法と名付けている。そのシステムを**図-1**に示す。**同図(a)**、**(b)**のような自動配筋ロ



写真-1 炭素繊維



写真-2 自動配筋ロボット

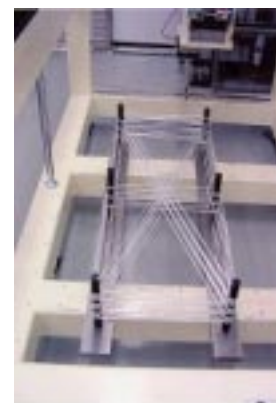


写真-3 配筋例

\*1 九州大学大学院 助手 工学研究院 博士(工学) (正会員)  
 \*2 九州大学大学院 教授 工学研究院 工博 (正会員)  
 \*3 九州大学大学院 助教授 工学研究院 工博 (正会員)  
 \*4 西松建設(株) 九州支店土木部土木課係長 博士(工学) (正会員)

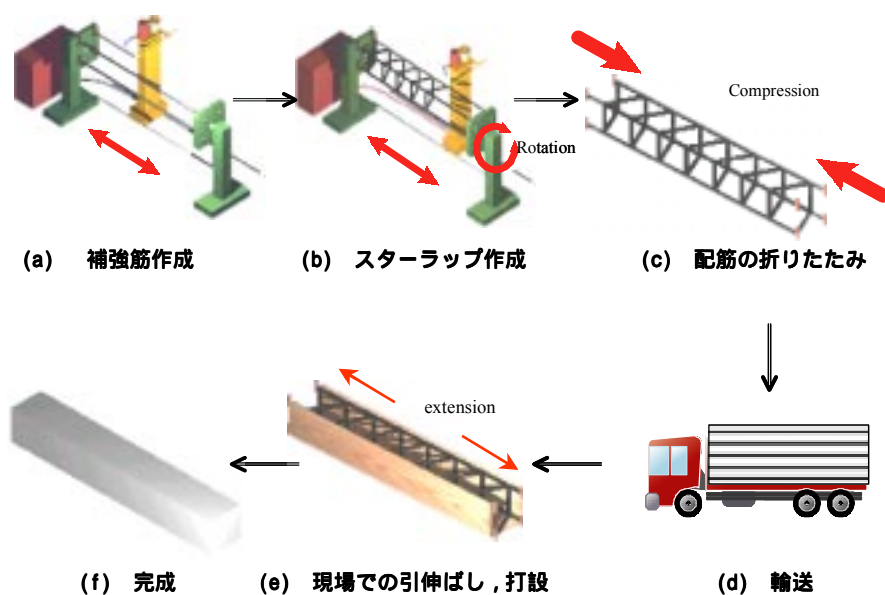


図-1 自動配筋ロボットとUCAS工法を用いた建設システム

ロボットを用い、デジタル化した設計図面により、設計通りの配筋システムを製作する。写真-2, 3は、九州大学 知能機械システム部門の鬼鞍教授らと共同で開発した自動配筋ロボット(1号機)である<sup>4)</sup>。CFケーブルをコンクリート部材の補強材として用いる場合、CFケーブル同士の交点や定着端部はスポット的にエポキシ樹脂などで接着させる。配筋構造はフレキシブルなため、同図(c)のようにコンパクトに縮小することができる。この軽量、コンパクトで設計情報を付加された製品は、最適ルートで安価に輸送できる(同図(d))。次に、型枠の中で引伸ばした状態で(同図(e))、流動性の良好なコンクリートを打設し完成となる(同図(f))。このため、鉄筋を用いる場合に比べて現場の配筋工、ガス圧接工、継手工など

の熟練工が大幅に省力化できる。また、軽量であるため、クレーンなどの重機使用量を大幅に削減でき、施工の安全性と効率性が向上する。このような設計、施工のオンライン化は、現場サイドでの設計変更も迅速に対応でき、性能管理・データ管理が容易となると考えられる。

## 2. 非硬化型CFの引張特性

### 2.1 試験体および試験方法

鉄筋の代わりに非硬化型CFを用いる場合、CFフィラメントを数十～百万本束ねてケーブルとする必要があるため、製作段階のたるみや撚りによりその引張強度はその公称引張強度に比べ著しく低下(10～20%)する傾向がある。そこで、自動配筋ロボットを用いて一定張力の管理の基

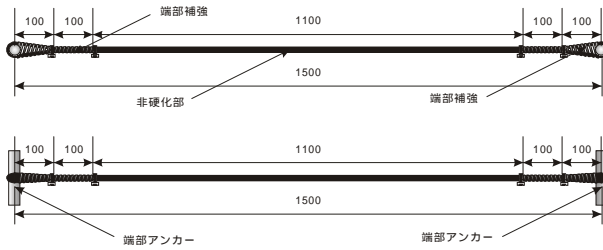
表-1 炭素繊維の材料特性

メーカー	品名	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 [N/mm <sup>2</sup> ]	限界ひずみ [%]	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	断面積 [mm <sup>2</sup> /本]*
東レ	TORAYCA T700S (12K)	4800	2.3x10 <sup>5</sup>	2.1	1.76	0.46

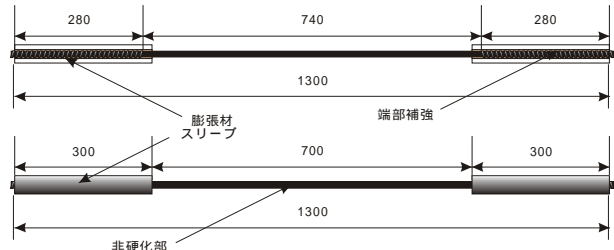
\* 1本 = 12K = 12000 filaments

表-2 試験体諸元

Type	本数	断面積 [mm <sup>2</sup> ]	試験体長 [mm]	非硬化部長 [mm]
A	40	18.4	1500	1100
B	80	36.8	1300	700
C	120	55.2	1300	700
D	120	55.2	4000	3500



(a) Type A



(b) Type B, C

図-2 試験体概略図

で製作された一定の径を有する非硬化型CFの引張試験を行い、その力学特性の検証を行った。

表-1にCFフィラメント1本の物性値を示す。表-2に試験体諸元を示す。Type A, B, Cは、それぞれ12Kを40, 80, 120本束ねて、その断面積はそれぞれ18.4, 36.8, 55.2mm<sup>2</sup>であり、各20体ずつ製作した。Type Dは、次章の床版試験体の主筋に用いた補強材と同一の引張試験体であり、9体製作した。

図-2(a)にType A、同図(b)にType B, Cの概略図を示している。Type Aは断面積が小さく引張荷重が小さいため両端部に鋼製アンカーを設けてその近傍をエポキシ樹脂により補強して、非硬化部で破断させる試験体としたが、Type B, Cは引張荷重が大きく端部での破壊が懸念されたため、鋼製スリーブと膨張材により端部定着させる試験体とした。試験体の製作手順は、まず非硬化型CFを自動配筋ロボットによって一定張力で両端のアンカーに巻きつけ、端部近傍にエポキシ樹脂を含浸させ、さらにらせん状にCFを巻きつけて硬化させた。その後アンカー部を切断

し、内径20mm外径40mmのスリーブに挿入し、膨張材(膨張圧60N/mm<sup>2</sup>)を充填し、CFとスリーブを一体化させた。

試験方法は、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)」の「連続繊維補強材の引張試験方法(案)(JSCE-E531-1995)」に準じて行った。

## 2.2 結果および考察

図-3に各タイプ1体の応力-ひずみ関係を示す。同図より、径が大きくなるにしたがい荷重初期段階の剛性がわずかに低下しているが、最大荷重の約30%以降はほぼ直線であることがわかる。

図-4は全試験体の最大荷重を、表-3に最大荷重、引張強度、保証引張強度およびヤング係数の平均値を示す。同図より、端部で破壊したType CのNo.8, 18を除くと、最大荷重のばらつきはそれぞれのタイプで7.4%, 4.2%および5.2%であり、また同表より全試験体の引張強度は保証引張強度以上であり、信頼性のあるデータが得ら

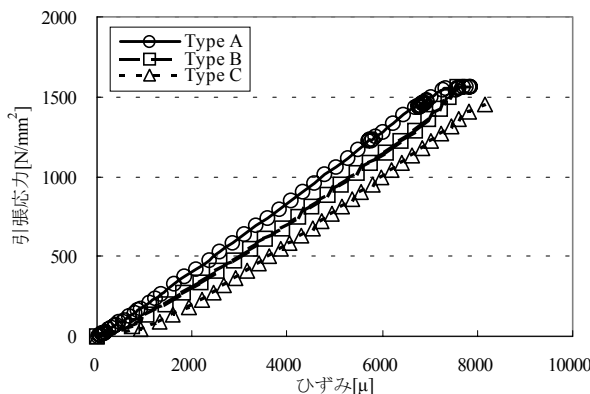


図-3 応力-ひずみ曲線

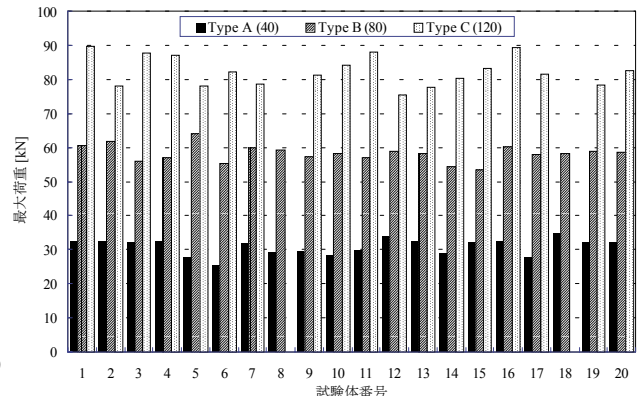


図-4 最大荷重

表-3 試験結果

Type	最大荷重 [kN]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	保証引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 [N/mm <sup>2</sup> ]
A	30.9	1676 (34.9%)	1295 (27.0%)	2.03x10 <sup>5</sup> (88.3%)
B	58.3	1583 (32.9%)	1381 (28.8%)	2.16x10 <sup>5</sup> (93.9%)
C	81.9	1480 (30.9%)	1261 (26.3%)	2.08x10 <sup>5</sup> (90.4%)
D	73.0	1323 (27.6%)	---	2.06x10 <sup>5</sup> (89.5%)

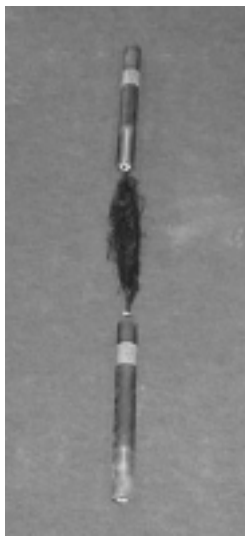


写真-4 破断部状況

れたものと考えられる。ここに保証引張強度は、引張強度の平均値から標準偏差の3倍を引いた値である。同表より、径が太くなるにしたがい引張強度およびヤング係数が低下する傾向ではあるが、非硬化型CFの引張強度は公称値(表-1)の30%以上と高強度を有し、主筋として十分に適

用可能であることがわかった。

写真-4は破断後の状況であり、試験体が2つに分断されることはなく非硬化部でフィラメント1本ずつが破断しており、繊維が毛羽立つ現象であった。

### 3. 非硬化型CFを用いたプレキャスト床版の曲げ特性

著者らのこれまでの研究により非硬化型CFは平行弦集合材であるためコンクリートとの付着強度はほとんど期待されないことがわかっている。そこで、主筋とスターラップのいずれにも非硬化型CFを用いた場合、その交点をエポキシ樹脂で接着して同部に節(グリッド)を設けることによりコンクリートとの機械的付着力を確保でき、スターラップ間隔やグリッドの数により設計上十分な付着力を持たせることが可能であることが実証されている。

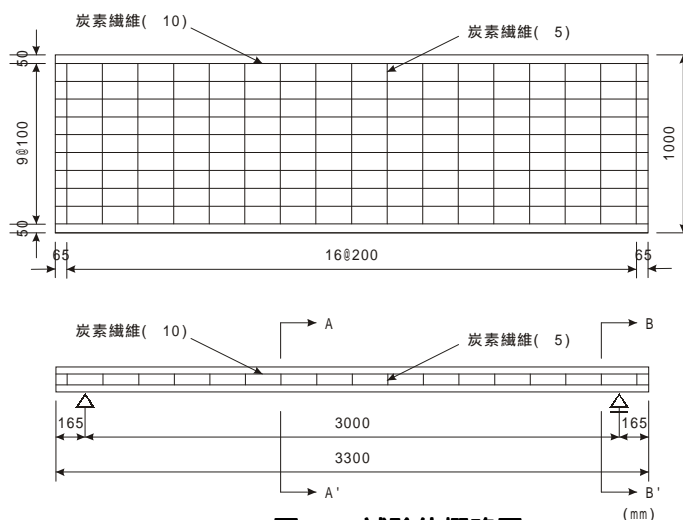


図-5 試験体概略図

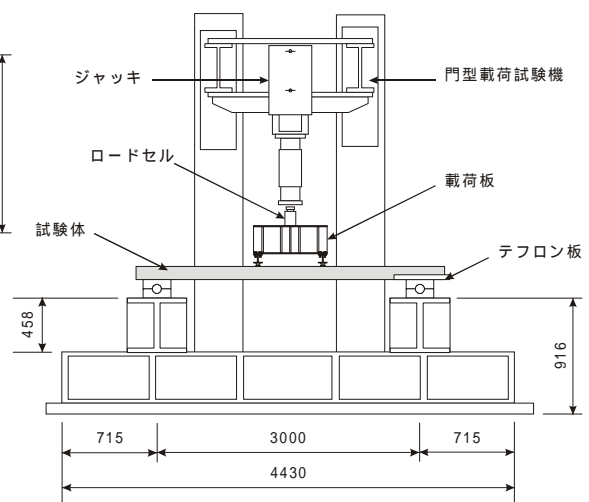


図-6 載荷方法

表-4 コンクリートおよびエポキシ樹脂の材料特性  
(a) コンクリート(材料試験結果) (b) エポキシ樹脂

圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 [N/mm <sup>2</sup> ]	ポアソン比
76.9	4.48	3.62x10 <sup>4</sup>	0.24

種類	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	粘度 [mPa・s]	伸び [%]
TSプライマー	53.0	619	1.67
TSレジン	53.0	14400	1.78

そこで、建物の床の一部に研究用として架設し長期計測を行うために、実物大の非硬化型CFで補強されたプレキャストコンクリート床版を製作して曲げ破壊試験を行い、設計荷重時の安全性照査および終局挙動に着目した曲げ破壊特性についての検証を行った。

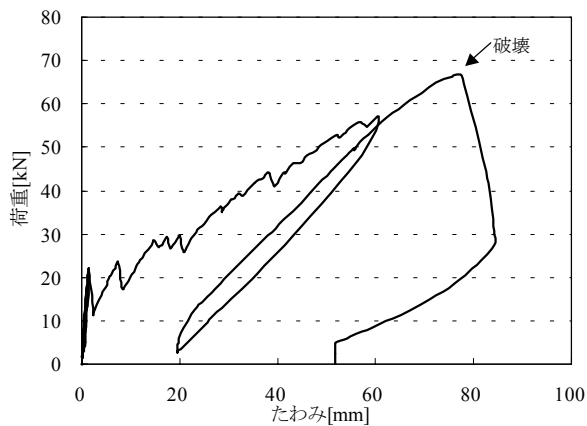
### 3.1 試験体および試験方法

図-5に試験体概略図を示す。試験体のサイズは、全長3.33m、幅1.0m、床版厚14cmの実物大モデルであり、主筋、スターラップとも非硬化型CFを用いて配筋した。主筋は表-2のType Dで、床版製作に先立ち主筋と同じサイズのケーブル

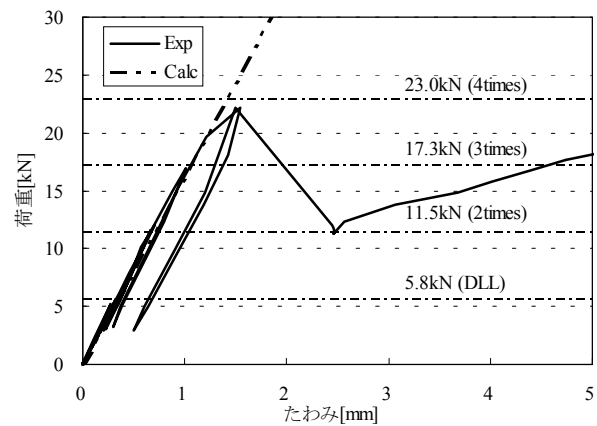
の引張試験を行いその引張特性を把握した。その結果を表-3に示す。また、スターラップは主筋の1/2の断面積のケーブルを用いて200mmピッチで配筋した。

試験体の製作は、まず鋼製型枠兼反力台上に主筋を一定張力でセットしてスターラップを配筋後、その交点を表-4に示す2種類のエポキシ樹脂を用いてグリッドを作成した。その後、コンクリートを打設し完成となる。同表(a)はコンクリートの材料定数を示している。

荷重は図-6に示すようにスパン3.0m、載荷スパン700mmの2点載荷であり、設計荷重の1, 2,



(a) 最大荷重



(b) 荷重初期段階

図-7 荷重 - たわみ関係

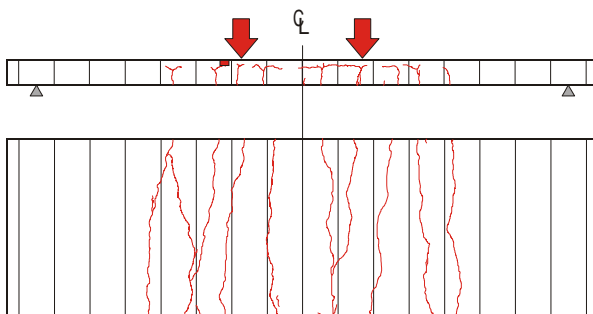


図-8 ひび割れ分布



写真-5 試験状況

3...倍と繰返し載荷を行った。計測項目はスパン中央部のたわみ、コンクリートと主筋のひずみ、主筋の引込み量およびひび割れ観察である。

### 3.2 結果および考察

図-7に荷重-たわみ関係であり、同図(b)は荷重初期段階(30kNまで)を示している。本床版の設計荷重は $3\text{kN/m}^2$ の分布荷重であり、本試験の2点載荷では5.8kNとなる。実構造物において、本床版の周辺は厚さ200mmの普通コンクリートを用いたRC床版であり、設計上、床版厚をさらに小さくできたが、両者の変形性状を考慮して床版厚は140mmとして、さらに初めての実施工ということで、高強度コンクリートを使用した。そのため、試験での設計荷重が5.8kNと小さくなっている。

同図よりその3倍以上の約20kNまでは直線で、計算値とも一致していることがわかる。しかし、設計荷重の4倍である23.0kN時に床版下面にひび割れが発生して、それと同時に主筋の引込みが始まり、一旦荷重が約12kNまで低下した。その後もひび割れの発生、進展時にその現象が繰返し起こり、荷重約65kNで最大荷重に達した。これはスターラップ間隔が大きかったためであり、もっと密にスターラップを配筋することによりこの現象を回避することが可能となる。なおこのことは、昨年実施したスターラップ間隔をパラメータとした非硬化型CFを補強筋として用いたはり試験により実証されている<sup>5)</sup>。図-8に床版下面、側面のひび割れ分布を、写真-5に試験状況を示す。

### 4. まとめ

本研究では、非硬化型CFのコンクリート補強材への適用を目的として、引張試験によりその材料特性を把握し、さらに非硬化型CFを補強筋として用いた実物大のプレキャストコンクリート床版を製作し曲げ破壊試験を行い、耐力や変

形性状などの曲げ特性の検証を行った。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 自動配筋ロボットにより一定張力の管理の基で製作された非硬化型CFは、従来の方法と比べてたるみや撚りによる強度低下が大幅に改善され、高強度で良好な製作再現性を有することが実証された。
- (2) 非硬化型CFの公称引張強度に対する最大引張強度の比は約30%と高強度であり、さらに集合材とすることによるヤング係数の低下もなく、同ケーブルはコンクリート部材の補強材として十分に適用できることがわかった。
- (3) 非硬化型CFを補強材として用いたプレキャストコンクリート床版は、その製作性も良好で、また十分な設計性能を有することがわかった。

### 参考文献

- 1) Development of computation techniques and the realities examination of resource and energy consumption and environmental hazards, Technical Memorandum of PWRI, No.3256, 2001
- 2) Hideki NAGAI, et al. : Application for LCA with High Polymer Composite Materials, Vol.44, No.8, 1998
- 3) Michael Gibbons, et al : The New Production of knowledge – The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies – , 1994
- 4) 九州大学大学院工学研究院 : 新社会基盤技術の開発研究, 平成12年度研究成果報告書, 2001.3
- 5) Toshiaki OHTA , Rudy DJAMALUDDIN, Shinichi HINO, Kohei YAMAGUCHI and Koji HARADA : Flexural properties of concrete beams reinforced with UCAS, Journal of Structural Engineering Vol.48A, 2002.3