

UCAS 補強材のコンクリート構造物への適用に関する研究開発

Research and Development on Application of UCAS to Concrete Structures

原田 耕司*

Koji Harada

要 約

UCAS (Un-resin Carbon-fibers Assembly System) は、これまでの硬化型連続炭素繊維と異なり、非硬化型連続炭素繊維をコンクリート部材の補強材として用いる工法である。UCAS は、配筋等をオンライン化することにより省力化・省資源化が図られ、コスト面や環境面で従来工法に比較して優れたシステムである¹⁾。しかしながら、本システムの力学的な検討は、これまでほとんど実施されていなかった。そこで、本研究開発では、UCAS 補強材のコンクリート構造物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、実物大のプレキャスト床版の曲げ載荷試験を行い、その挙動について検討を行った。なお、プレキャスト床版は九州大学キャンパス内の施設に試験的に施工された。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. UCAS 補強材の作製方法
- § 3. UCAS 補強材の引張特性
- § 4. UCAS 補強材を用いたプレキャスト床版の曲げ特性
- § 5. 実施工
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

炭素繊維は、レーヨン、石油または石油ピッチ、およびポリアクリルニトリルなどを原料とした繊維を焼成して製造される。炭素繊維のフィラメント（単繊維）の直径は約7~14 μm であるが、一般的には、写真-1に示すように1,000、3,000、6,000あるいは10,000本など、多数のフィラメントからなる糸の形で市販されている²⁾。

炭素繊維の特徴は、錆びないことや異形鉄筋に比べ比重が1/4と軽量で、引張強度やヤング率が高いことである。土木建築分野では、シート状の炭素繊維による橋脚の耐震補強や、炭素繊維をエポキシ樹脂等の結合材で集束して、異形鉄筋や PC 鋼材の代替材として使用されている。

樹脂で集束した硬化型連続炭素繊維は、材料としての力学特性には利点があるものの、価格が異形鉄筋の約

30倍高いことが普及の障害となっていた。これは、従来の硬化型連続炭素繊維はエポキシ樹脂等の結合材を含浸して集束させ、一定の張力で引き揃え、異形加工を施し、樹脂を加熱硬化させて成形する工程（プルトルージョン法）が必要であったためである。

これに対して UCAS 補強材は、樹脂による集束工程を省略することにより、コストダウンを図ることが可能であると考えられた。さらに、UCAS は、設計・施工をオンライン化することにより省力化が図られ、折畳んだ状態で運搬が可能のため、運搬費も安くできるなどのメリットが考えられた¹⁾。しかしながら、UCAS 補強材に関する力学特性等については、確認されていなかった。

そこで、本研究開発では、UCAS 補強材のコンクリート構造物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、実物大のプレキャスト床版の曲げ載荷試験を行い、その挙動について検討を行った。



写真-1 炭素繊維 (12,000フィラメント)

*九州(支) 土木部土木課

§ 2. UCAS 補強材の作製方法

UCAS 補強材は、炭素繊維に一定の高張力を加えながら、任意の形状に配筋が可能な写真-2に示す自動配筋ロボット³⁾で作製する。

UCAS 補強材は、このように一定の高張力で配筋することにより、炭素繊維が平行状態になり、炭素繊維の優れた性能を十分に活用できることが可能になると考えられた。張力管理をせずに炭素繊維を集束した場合、図-1(a)のように多くの炭素繊維が力に対して平行ではなく、力を負担しない炭素繊維（以下、無応力炭素繊維と呼ぶ）が多く存在する。一方、UCAS 補強材は、自動配筋ロボットを用いて一定の高張力を加えることにより、図-1(b)のように多くの炭素繊維の方向が力に対して平行になり、無応力炭素繊維が少なくなると考えられた。

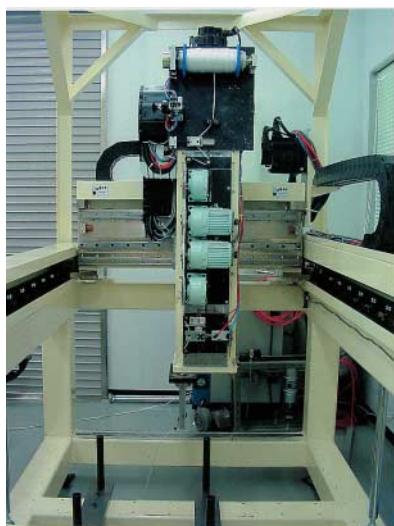
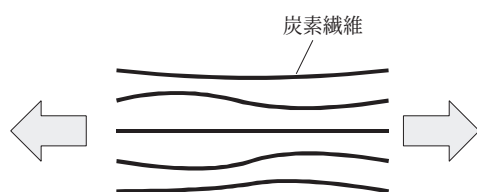
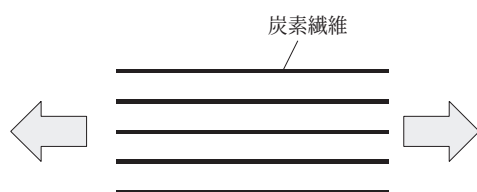


写真-2 自動配筋ロボット



(a) 張力管理しない場合



(b) UCAS 補強材

図-1 繊維の方向性

§ 3. UCAS 補強材の引張特性

3-1 試験概要

鉄筋の代わりに UCAS 補強材を用いる場合、鉄筋と同レベルの引張耐力を持たせるためには、炭素繊維を数十万～数百万本束ねる必要がある。自動配筋ロボットを採用しても、作製段階のたるみや撚りにより、その引張強度は理論引張強度に比べ低下することが予想された。そこで、自動配筋ロボットにより作製した UCAS 補強材の引張試験を行い、その力学特性を検証した。

今回使用した炭素繊維のフィラメントは、表-1に示すように、引張強度は鉄筋の約 15 倍、ヤング率は鉄筋と同じ性能を有するものであった。また、フィラメント数は 12k (k=1,000 本, 12k=12,000 本) であった。

表-2に供試体の諸元を示す。Type A～C は、それぞれ 12k を 40 束 (48 万本)、80 束 (96 万本)、120 束 (144 万本) 束ねたものである。Type D は、次章に述べる床版の主筋であり、12k を 120 束用いて供試体長を 4,000 mm とした。したがって、Type A～C で、炭素繊維の本数による影響を確認でき、Type C と D を比較することにより、炭素繊維の長さの影響を検討することができる。供試体数は、保証耐力を求めるため各ケース 20 体としたが、Type D については 6 体とした。なお、Type E は、Type A と同条件の炭素繊維を樹脂で硬化させたものである。

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。具体的には、写真-3に示すように供試体の両端に鋼管スリーブをセットして、鉄筋の引張試験と同様に試験機のチャックで直接スリーブをつかみ載荷した。なお、試験では荷重とひずみゲージにより UCAS 補強材中央部のひずみを計測した。

表-1 炭素繊維フィラメントの特性

引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	限界ひずみ (%)	断面積 (mm ² /本)
4,800	2.3×10^5	2.1	3.8×10^{-5}

表-2 供試体の諸元

Type	12k の繊維束数 (束)	断面積 (mm ²)	供試体長 (mm)
A	40	18.4	1,100
B	80	36.8	1,300
C	120	55.2	1,300
D	120	55.2	4,000
E	40	18.4	700

3-2 実験結果および考察

図-2に Type A～C の代表的供試体の応力～ひずみ関係を示す。破断強度は炭素繊維の本数が増えるに従い低下する傾向が確認できる。この理由としては、炭素繊維の本数が増えるに従い、無応力炭素繊維の割合が増加したためと考えられる。また、ヤング率に関しても炭素繊維の本数が増えるに従い低下する傾向が確認できる。

UCAS 補強材のコストダウンを図るには、無応力炭素繊維を少なくすることが重要である。そこで、無応力炭素繊維の影響を把握するため、以下のような有効率(D)を定義した。

$$D = \frac{f_w}{f_t} \times 100(\%) \quad (1)$$

ここで、 f_w ：UCAS 補強材の引張強度
 f_t ：理論上（フィラメント）の引張強度

表-3には、有効率を含めた引張試験結果の一覧を示す。Type A, B および C の有効率は、それぞれ 34.9%, 33.0%, 30.8% となっており、炭素繊維の本数が増加するに従い低下し、無応力炭素繊維の割合が増加していることが分かる。自動配筋ロボットを使用せずに作製した非硬化型連続炭素繊維の有効率は、10～20%と報告されており⁴⁾、自動配筋ロボットの有効性が確認できる。しかしながら、UCAS 補強材でも、炭素繊維の約 70% は力に対して有効に働いていないと考えられ、よりコストダウンを図るためには、さらに有効率を向上させる必要がある。なお、繊維を硬化させた Type E の有効率は、非硬化の UCAS 材（Type A）の約 2.5 倍の 86.7% を示しており、樹脂による繊維の硬化が有効率改善に効果的であることが分かる。

Type C と D は、炭素繊維の本数は同じであるが、繊維長が異なるものである。炭素繊維長 4,000mm の Type D は、炭素繊維長 1,300mm の Type C に比べて、有効率が低くなっており、繊維長が長くなると有効率が低下する傾向が確認される。

設計に用いる保証耐力は、Type A, B および C でそれぞれ 23.8kN, 50.8kN および 69.6kN であり、Type C の場合、SD295 の D16 クラスと同レベルとなる。UCAS 補強材は、炭素繊維の本数が増えたり、炭素繊維長が長くなると有効率が低下することに留意する必要があるものの、引張耐力的にはコンクリート構造物の補強材として使用できるものであることが分かる。

なお、写真-4には破断後の UCAS 補強材の状況を示す。UCAS 補強材は、異形鉄筋等と異なり、試験体が 2 つに分断されることなく、炭素繊維が毛羽立って破断した。

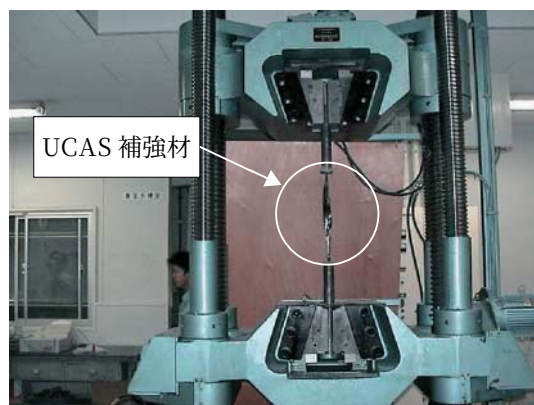


写真-3 試験状況

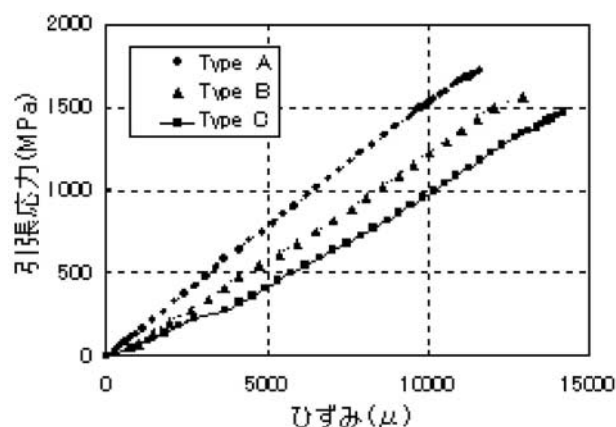


図-2 応力～ひずみ関係

表-3 引張試験結果

Type	最大荷重 (kN)	引張強度 (N/mm ²)	保証耐力* (kN)	有効率 (%)
A	30.9	1,676	23.8	34.9
B	58.3	1,583	50.8	33.0
C	81.9	1,480	69.6	30.8
D	73.0	1,323	70.1	27.6
E	76.5	4,160		86.7

*保証耐力：20 個以上の引張試験の平均値から標準偏差の 3 倍を減じた値。

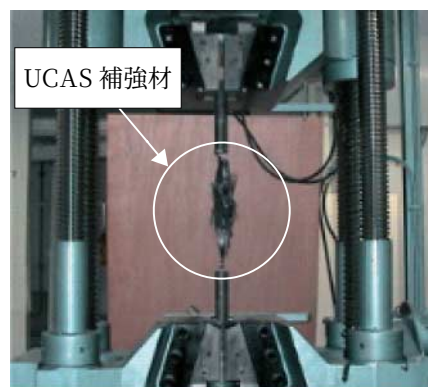


写真-4 引張試験後の UCAS 補強材

§ 4. UCAS 補強材を用いたプレキャスト床版の曲げ特性

UCAS 補強材を鉄筋の代わりにプレキャスト床版（以下、UCAS 床版と呼ぶ）に適用し、その曲げ載荷実験を行い、荷重～変位関係等のデータから、UCAS 補強材のコンクリート構造物の補強材としての適用性について検討を行った。

4-1 供試体および試験方法

供試体は、**図-3**に示すように全長3.33m、幅1.0m、床版厚14cmの実物大モデルである。主筋およびスターラップともにUCAS 補強材を配筋した。主筋は**表-3**のType Dを使用し、スターラップは、主筋の1/2の本数のUCAS 補強材を使用した。

供試体の作製は、まず**写真-5**に示すバネの力を利用した緊張装置付き鋼製型枠に主筋を一定張力でセットした。続いてスターラップを配筋後（**写真-6**参照）、UCAS 補強材とコンクリートの付着を確保するため、スターラップと主筋の交点を**表-4**に示す2種類の樹脂を用いて接合し、グリッドを作製した。最後に、**表-5**に示す高流動コンクリートを打設した。

載荷は、**図-4**に示すようなスパン3.0m、載荷スパン700mmの2点載荷とし、設計荷重の1, 2, 3, 4倍の繰返し載荷を行い、ひび割れ発生後は破壊まで荷重を増加させた。

設計の対象とした実床版の設計荷重は、 3kN/m^2 の分布荷重であったため、UCAS 床版では最大曲げモーメントが一致する 5.8kN を設計荷重とした。さらに、設計の対象とした実床版は、厚さ200mmの普通コンクリートを用いたRC床版である。設計上、UCAS 床版の厚さをさらに薄くできるものの、両者の変形性状を考慮して床版厚は140mmとした。なお、スターラップの間隔は、実床版と同じ200mmとした。

計測項目は、載荷荷重、スパン中央部のたわみ、コンクリートと主筋のひずみおよびひび割れ観察である。

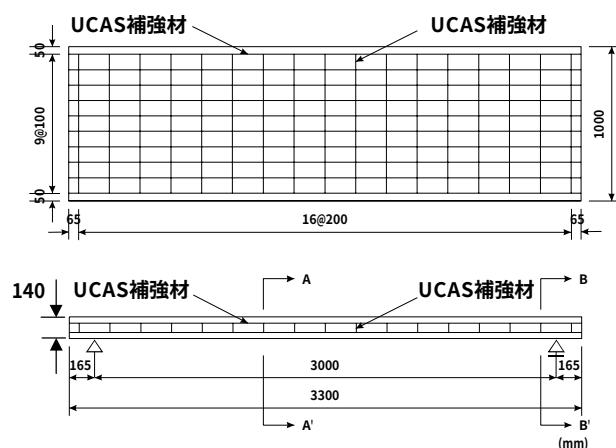


図-3 供試体の配筋



写真-5 緊張装置



写真-6 配筋状況

表-4 樹脂の特性

種 類	引張強度 (N/mm^2)	粘度 ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	伸び (%)	備考
TS プライマー	53.0	619	1.67	浸透用
TS レジン	53.0	14,400	1.78	成形用

表-5 コンクリートの特性

スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (材齢 14 日) (N/mm^2)	引張強度 (材齢 14 日) (N/mm^2)	ヤング率 (N/mm^2)
62.0×61.0	1.8	76.9	4.48	3.62×10^4

4-2 実験結果および考察

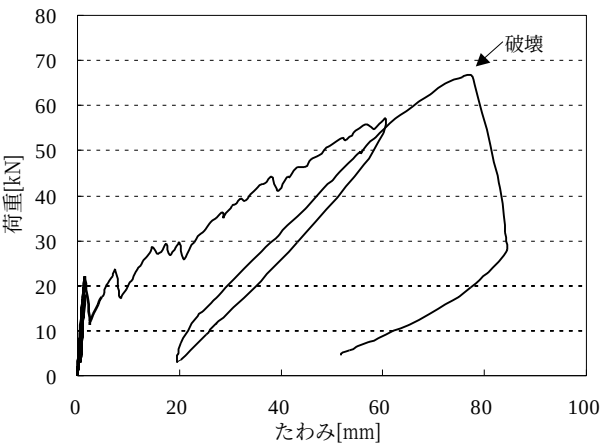
図-5は荷重～たわみ関係であり、**図-5(b)**は載荷初期段階(30kN まで)を拡大したものである。**図-5(b)**より設計荷重の3倍以上の約20kN までは、直線で計算値とも一致していることが分かる。しかしながら、設計荷重の約4倍である22.3kN 時に床版下面にひび割れが発生して、荷重が急激に約12kN まで低下した。これは、UCAS 補強材とコンクリートの交点に設けたグリッドの間隔が200mm と大きかったため、UCAS 補強材とコンクリートの付着力が不十分であったことが原因である。

と考えられる。その後は、破壊荷重に至るまで数度荷重の低下が発生し剛性が低下しながら、66.6kNで最大荷重に達した。最大荷重時の主筋のひずみは約6,000 μ 、コンクリートひずみは約2,500 μ であり、UCAS床版は、UCAS補強材の破断ではなく、コンクリートの圧壊で曲げ破壊をした。

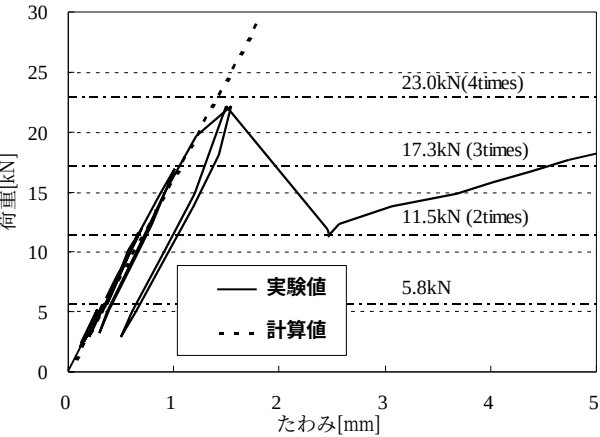
載荷途中および載荷後のUCAS補強材の端部を観察すると、UCAS補強材の中央部が窪んでおり、UCAS補強材の全断面が有効に働いていなかった。これは、主筋とスターラップの交点での接着が、不十分であったためと考えられる。UCAS補強材のフィラメント数が少なければ問題ないが、フィラメント数が増えた場合は、交点の接合方法や交点数について十分な検討が必要であると言える。

表-6には、ひび割れ発生荷重および終局耐力の実験値と計算値を示す。ひび割れ発生荷重は、ほぼ計算値と同じであるが、終局耐力は計算値の0.54倍であり、終局状態まで平面保持が成立していなかったことが伺える。

図-6に実験後のひび割れ発生状況を示す。ひび割れの分布は、ほぼ左右対称になっており、またグリッドとグリッドの間でひび割れが発生している。これは、グリッド間ではUCAS補強材とコンクリートの付着がないことと、グリッド間隔が大きかったことが影響したのではないかと考えられる。



(a) 最大荷重



(b) 載荷初期段階

図-5 荷重～たわみ関係

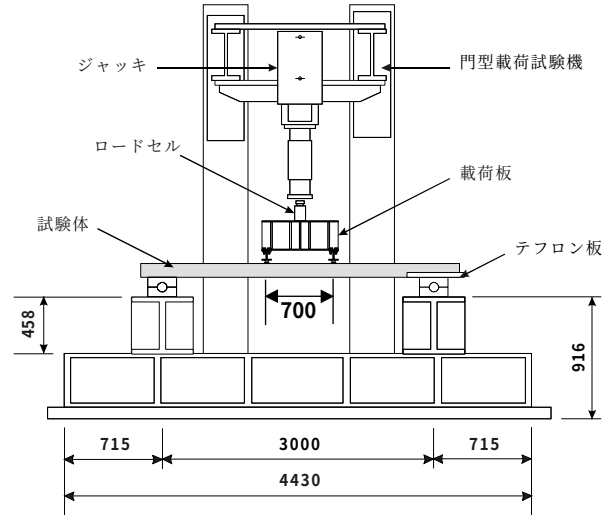


図-4 載荷概要

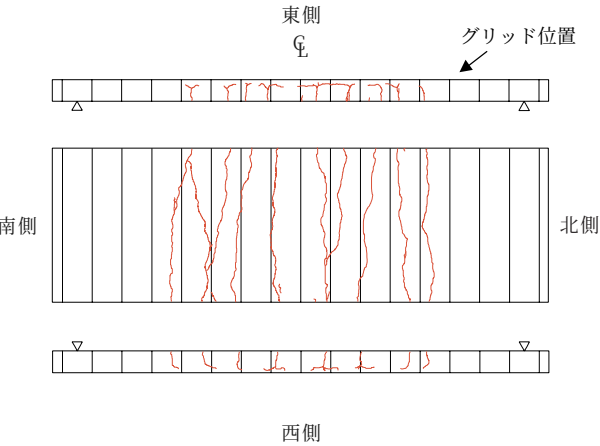


図-6 ひび割れ発生状況

表-6 実験値および設計値

実験値		設計値		実験値/設計値	
ひび割れ発生荷重 (kN)	終局荷重 (kN)	ひび割れ発生荷重 (kN)	終局荷重 (kN)	ひび割れ発生荷重	終局荷重
22.3	66.6	19.6	123	1.14	0.54

§ 5. 実施工

UCAS 補強材を用いた床版（全長=3.33m、幅=1.0m、厚さ=14cm）は、**写真-7**に示すように九州大学キャンパス内の施設に試験的に設置された。現在、長期挙動の計測を実施している。



写真-7 UCAS 床版の設置状況

§ 6. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。まず、UCAS 補強材の引張試験では、

- ①40本、60本および80本のUCAS補強材の保証耐力は、それぞれ23.8kN、50.8kNおよび69.6kNであり、引張耐力的にはコンクリート構造物の補強材として適用できることが分かった。
- ②UCAS補強材は、炭素繊維の本数が増える程、引張耐力、ヤング率および有効率が小さくなる傾向を示した。③また、繊維長が長くなる程、有効率が低下する傾向を示した。
- ④UCAS補強材の有効率は30%程度であり、コストダ

ウンを図るためには、さらなる有効率の改善策を講ずる必要がある。

- ⑤UCAS補強材の破壊は、異形鉄筋と異なり、試験体が2つに分断されることなく、炭素繊維が毛羽立って破断した。

続いて、プレキャスト床版の曲げ載荷試験では、

- ①UCAS補強材とコンクリートの付着を確保するため、グリッド間隔を出来るだけ小さくする必要があると考えられる。
- ②炭素繊維の本数が増えると、炭素繊維の全断面が有効に働かないことが明らかになった。すなわち、UCAS補強材では、寸法効果を考慮する必要があると言える。
- ③UCAS床版は、ひび割れ発生後は平面保持が成立しないことが確認できた。

最後に、UCASは、まだまだ多くの課題を有する技術であるが、鉄筋コンクリート構造物の耐久性が大きな社会問題となっている現状を考えると、錆びないUCAS補強材は、ライフサイクルコストを考慮した設計が検討される場合、適用可能な技術であると考えられる。

謝辞：本論は、九州大学太田俊昭教授との共同研究の成果をまとめたものである。また、実施工においては、土木設計部および技術研究所の御協力を頂いた。ここに、付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 太田俊昭：IT時代におけるコンクリート構造物の新しいコンセプトとライフサイクルアセスメント，土木学会誌，Vol. 86，pp. 46-49，March，2001.
- 2) カーボンファイバ，島村昭治編，オーム社，1984.
- 3) 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.
- 4) Development of computation techniques and the realities examination of resource and energy consumption and environmental hazards, Technical Memorandum of PWRI, No. 3256, 2001.