

# 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)による 高性能・高耐久性橋梁の開発

相浦 聡<sup>1</sup>・大熊 光<sup>2</sup>・武者 浩透<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 大成建設株式会社 土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 大成建設株式会社 土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 大成建設株式会社 土木技術開発部 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

超高強度繊維補強コンクリート(UFC)は、超高強度、高靱性、高流動性、高耐久性を有する材料であり、その優れた性能を活用することで、様々な橋梁形式が提案され、実用化されてきた。2002年に国内初の本格的UFC橋である「酒田みらい橋」が完成して以来、歩道橋をはじめ、道路橋、鉄道橋、栈橋上の床版など、その適用範囲は大幅に広がってきており、本稿ではこれまでの主な技術開発と最近の適用事例について概説する。

また、UFCの耐久性の高さは要素実験レベルで実証されているが、「酒田みらい橋」では定期的に追跡調査が実施されており、本稿では5年次点検において得られた耐久性試験結果について報告する。

**キーワード**：超高強度繊維補強コンクリート，UFC，耐久性，低桁高，軽量化

## 1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート(以下、UFC)は、土木学会のコンクリートライブラリー113「超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案)」<sup>1)</sup>(以下、UFC指針)によれば、粒径2.5mm以下の骨材、セメント、ポズラン材から構成されており、水セメント比は0.24以下である。粒径の大きな骨材を使用しない点や、ポズラン材の使用、水セメント比の上限値の設定などにより、UFCは緻密性を最大限に高めた材料であると言える。

UFCには直径0.1~0.25mm、引張強度2kN/mm<sup>2</sup>以上の高張力な短繊維(長さ10~20mm)が2vol%程度配合されており、緻密な材料とのマッチングにより付着性を確保しているため、優れた繊維補強効果が得られている。

このようなUFCの材料配合に起因する強度特性と耐久性は従来のコンクリートに比べて格段に優れた性能を示しており、近年では歩道橋や道路橋、床版といった様々な用途にUFCが適用され、ローメンテナンスで長寿命なインフラ整備が進みつつある。

本稿では、UFC技術の進展とその適用事例を述べるとともに、最近の事例として、栈橋構造滑走路におけるUFC床版、およびUFC初の鉄道橋について報告

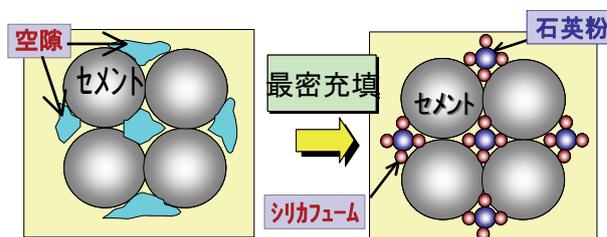


図-1 最密充填の概念図

する。また、実橋の追跡調査を事例として耐久性を検証する。

## 2. UFCの特徴

### (1) 材料の特徴

UFCの配合は、通常のコンクリートではセメント粒子の周辺に存在する空隙を、平均粒径0.1μm、比表面積は200,000cm<sup>2</sup>/g程度の超微粒子であるシリカフュームなどを用いて隙間なく埋め尽くす「最密充填」という思想に基づいている(図-1)。そのため、その組織は極めて緻密であり、超高強度と高耐久性を実現している。

また、UFCは高張力鋼繊維が配合されているため、高靱性が確保されており、鉄筋を一切必要としないという画期的な特長を有している。

## (2) 設計上の特徴

UFCの強度特性値としては、圧縮強度、ひび割れ発生強度、引張強度の3種類が規定されている<sup>1)</sup>。

非常に高い圧縮強度（特性値：180N/mm<sup>2</sup>）は、部材が薄い場合でもプレストレスによる大きな圧縮力を導入することができ、長スパンや低桁高を可能としている。

ひび割れ発生強度の特性値は8N/mm<sup>2</sup>であり、使用時にはひび割れを許さない設計としている。UFCでは、実際にひび割れが生じたとしても、繊維補強効果により0.04～0.06mm幅の微細なひび割れが分散して数多く入る。そのため耐久性に悪影響を及ぼす可能性は少ないと考えられるが、鋼繊維の耐久性を重視しひび割れを許さないこととしている。

## (3) 製作上の特徴

UFCは高流動コンクリートであるため、締固めが不要である。そのため、打設において作業員の熟練度による品質への影響は少ない。

また、UFCは脱型後に90℃×48時間の2次養生（UFC指針では標準熱養生と表現）を施すことを原則としている。2次養生により、所定の強度が発現し、クリープ・乾燥収縮の小さい安定した性状となる。

## 3. UFCの適用事例

### (1) UFCのPC橋梁への適用

UFCを適用したPC橋梁の特徴としては、鉄筋を使用しないことによる薄肉化と軽量化、そして長スパン化といった点がある。また、高耐久による維持管理費用の低減と長寿命化という点も挙げられる。

以下に、UFCを適用したPC橋梁の実績とその構造の特徴を示す。

### (2) 歩道橋

UFCによるPC歩道橋は、2002年に国内で初めて建設された「酒田みらい橋」<sup>2)</sup>（写真-1、2）以降、10橋以上が完成している。以下に、UFC橋の特徴、プレキャストブロック間の接合方法、構造形式について述べる。

#### a) 薄い部材厚

UFC橋では鉄筋が不要となることにより、部材厚が配筋やかぶりの制約を受けない。そのため、部材厚を薄く設定することで、プレストレスの導入効率が向上し、超高強度を活かした設計が可能となる。



写真-1 酒田みらい橋

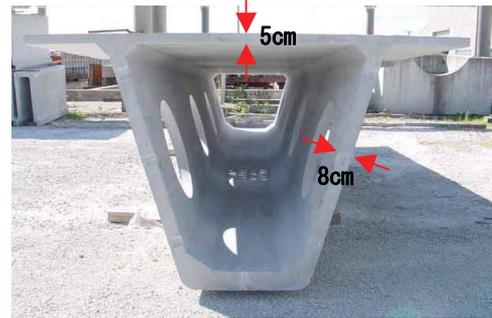


写真-2 酒田みらい橋の断面

写真-2に酒田みらい橋の断面を示す。箱桁断面の実績としては、床版厚5～7cm、ウェブ厚7～8cmと非常に薄い部材厚を実現している。

#### b) 軽量化

部材厚が薄いことにより、上部工の大幅な軽量化が実現している。単位橋面積当りの数量は0.2m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>程度であり、従来コンクリート歩道橋と比べて約1/4である。

軽量化により架設機械の小型化が図れる他、上部工の反力が減少するため下部工費の縮減につながる。

#### c) 低桁高スパン比

UFCの超高強度を活かした設計により、桁高スパン比は小さく抑えられており、PC箱桁橋では1/40程度である。設計強度上では更なる桁高スパン比の低減が可能であるが、通常は、たわみ量と固有振動数の制限により桁高が決まることが多い。

酒田みらい橋においては、河川の計画高水位とすり付け道路との関係から厳しい桁高制限があり、桁端部における桁高スパン比1/90（支間49.35mに対し桁高550mm）を実現している。

以上により、従来コンクリート橋と比較した場合、支間長が同じであれば桁高を低くすることができ、また、桁高が同じであればスパン長を大きくすることができる。スパン長を大きくすることで、中間橋脚の省略による河川阻害率の低減、下部工費の縮減を図ることが可能となる。

#### d) プレキャストブロックの分割

UFCは2次養生が必要のため、通常は工場で製作されたプレキャスト部材を現地で接合する工法で施工される。そのため、プレキャストブロックの分割、接合方法が製造および架設工の施工性を左右する。

プレキャストブロックの分割方法は、設計上有利な継目位置、部材の製造性、および運搬性（寸法、重量）を考慮して決められる。UFCは軽量であるため、プレキャストブロックを大型化することで、現地の接合工を省力化することが可能である。

2007年に竣工した三兼池橋<sup>3)</sup>（写真-3, 4, 5）はプレキャストブロックの効率的な製造と運搬を考慮して床版と主桁（U桁）の分離構造を採用している。床版幅は3.5mであったが、床版とU桁を分割することで、幅2.1mのU桁はトレーラー幅に収まり、橋軸方向に8～10m程度の大きなブロック単位での運搬が可能となった。また、一般にUFC橋は低桁高のため、箱桁を製作する場合は内枠の施工性が問題となるが、床版を分離したことで、型枠の施工性は大幅に向上した。三兼池橋は橋長81.2mの2径間連続PC箱桁橋であり、UFCとしては初の連続橋となった。

#### e) プレキャストブロック間の接合

プレキャストブロック間の接合方法としては、①主桁間の接合と、②床版と主桁との接合がある。①については、UFC指針<sup>1)</sup> 参考資料に示されているように、せん断キーを設けた桁間の遊間（3～6cm程度）にUFCを打設する接合方法が主に採用されている。

遊間を無くした接着剤での接合方法についても開発されており、2007年には豊田市総合体育館横断歩道橋<sup>4)</sup>において、桁高55cm、上下床版厚6cmの箱桁がマッチキャストで製作され接合された。

②については、孔明き鋼板ジベル（PBL）による接合技術が開発され、適用されている<sup>5)</sup>。本接合方法は、ジベル筋やアンカーボルトと比較して、強度および剛性が高く、UFCの超高強度に適した接合方法といえる。従来コンクリートで用いられる場合は、鋼板の孔に鉄筋を通す構造が一般的であるが、UFCでは鋼繊維による架橋効果が期待できるため鉄筋は不要である。

#### f) 下路桁橋

UFCの薄い部材厚を活かした構造として、下路桁橋の適用事例が増えている。2006年には国内最長スパンとなる63.3mを誇る下路桁橋：曳田歩道橋<sup>6)</sup>が建設されている。その後も2008年には神戸三田プレミアムアウトレット歩道橋（写真-6）、2009年には岐阜県飛騨市に吉城橋<sup>7)</sup>（写真-7）が完成している。



写真-3 三兼池歩道橋

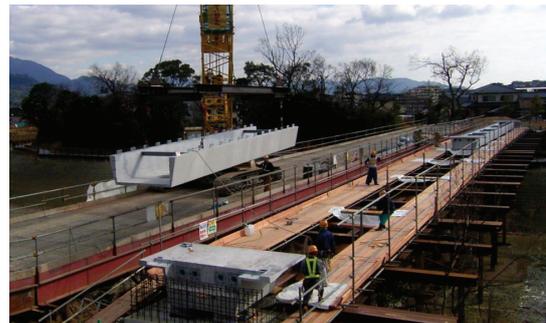


写真-4 三兼池歩道橋 U桁の架設



写真-5 三兼池歩道橋 床版の架設



写真-6 神戸三田プレミアムアウトレット歩道橋



写真-7 吉城橋

吉城橋は、歴史的景観地区に周囲の趣のある街並みとの調和に配慮し、ウェブに開口部と装飾格子などを設けたスパン40mの下路桁橋である。軽量化や長スパンなどの構造的な特性と、高耐久・長寿命などの材料的な利点に加え、低桁高や形状の自由度といったデザイン性によるメリットが活かされている。

### (3) 道路橋

UFCが国内で初めて道路橋に適用されたのは、2005年に完成した北九州JCT堀越Cランプ橋<sup>8)</sup>である。同橋は主桁にUFCを、床版には従来コンクリートを適用した合成構造であり、その接合工法としては、前述のPBLを採用している。

2008年には支間長46mのUFC道路橋である羽田空港GSE橋梁<sup>9)</sup>（写真-8）が完成している。この橋は羽田空港国際線地区エプロン等整備事業で建設された地上支援車両（GSE車両）が通行するための橋梁である。主桁部にUFCを用いることにより、総重量50tfのGSE車両を連行荷重として考慮しながら、桁高を通常のコンクリート橋の約80%となる1.86mに抑え、アプローチ部分の盛土量を削減している。

### (4) 栈橋上の床版

最近では羽田空港のD滑走路拡張工事において、滑走路外周部の約192,000m<sup>2</sup>に約6,900枚のUFC床版（写真-9）が適用されている<sup>10)</sup>。

UFCを栈橋部床版に適用することによって、通常コンクリートのPC床版と比較して約60%の軽量化が図られ、これに伴い栈橋ジャケット鋼材量が約3%低減された。また、高耐久性の材料であるため塩害対策や防水対策などの維持管理費の低減が期待できる。

UFCとしては初めての大量生産（UFC体積：約22,000m<sup>3</sup>）であったが、強度や製作上のばらつきは通常のコンクリートより小さく、大量生産にも十分対応可能であることが確認された。

### (5) 鉄道橋

2010年7月、世界で初めて鉄道橋にUFCを適用した三岐鉄道 萱生川（かようがわ）橋梁が完成した。

本橋は河川改修に伴う橋梁改築工事として計画された橋長15.86m、支間長14.50mのPC単純下路桁橋であり、三重県四日市市に位置している（写真-10）。

架橋地点における河川計画高水位と軌道面の高低差が小さいため、構造形式は下路桁とされたが、更に床版厚を極力抑える事が求められていた。従来コンクリートでは床版厚が大きくなり、橋梁前後のすり付け区間を含めて140mにわたり軌道高さを変更す



写真-8 羽田空港 GSE 橋梁



写真-9 羽田 D 滑走路 UFC 床版



写真-10 三岐鉄道萱生川橋梁

る必要が生じた。

これに対し、超高強度のUFCを適用することで床版厚25cmという極めて薄い構造が成立し、軌道変更工事の回避と上部工の軽量化を図る事が可能となった。また、塗装の塗り替え等のメンテナンスも不要で、橋梁の長寿命化も期待できることから、ライフサイクルコストの縮減が見込まれている。

供用中の鉄道橋架替のため、架橋地点の横に設けた施工ヤードでプレキャストブロックを組立て、横引きジャッキを用いて一晩で横取架設を行った。

UFCを鉄道橋に適用する際、鋼桁に対する利点として期待されるのは、橋の構造体から発生する騒音の低減効果である。本橋では列車走行時の騒音、振動計測を実施しており、その騒音レベルは、盛土部の走行時と殆ど変わらない値である事が判明している。また、本路線上には、同じ下路桁構造の鋼橋（無道床橋梁）が複数あり、その中から同程度の規模の橋梁を選定して騒音レベルを測定し、UFC橋と比較したところ、UFC橋の騒音レベルは、鋼橋より

も約10dB小さい結果であった。本件については、別途、詳細に報告する予定である。

#### 4. UFC構造物の耐久性調査

UFCは非常に高い耐久性を有する材料であるが、その裏付けとなるデータのほとんどは室内の促進試験によるものであり、開発されてさほど年月が経っていないため、UFCのフィールドデータは非常に少ないのが現状であった。そのため、実際のUFC構造物の耐久性を検証するために、2002年10月に竣工した酒田みらい橋の追跡調査を定期的に行っている。第2回目の調査を竣工の5年後にあたる2007年10月に実施しており、その概要を報告する。

##### (1) 調査の背景

酒田みらい橋（写真-1, 2）は、山形県酒田市内を流れる新田川の河口から約2kmの位置に架けられている。この川は満潮時に本橋付近まで海水が逆流し、冬季には塩分を多く含んだ激しい風が吹き付けるなど、ステンレスの橋名板が一冬にして全面錆びつくほどの厳しい塩害環境下にさらされている。

日本初のUFC橋梁となる本橋では、UFC構造物の経時変化についてのフィールドデータを収集するため、長期的な追跡調査プログラムが実行されている。耐久性の追跡調査に使用する多数の供試体は、本橋のUFC桁と同時に製作され、桁内部に存置されている（写真-11）。本橋は景観デザイン上、ウェブに大きな開口があり、下流から吹き付ける潮風が吹き抜ける構造であるため、それらの供試体は橋桁とほぼ同環境であると考えられる。追跡調査は竣工後の2年間に2回実施されたが、特に変状が見られなかったため、その後は期間を置き5年後に実施した。

##### (2) 強度の推移

図-2に圧縮強度、図-3に曲げひび割れ発生強度および曲げ強度の推移グラフを示す。圧縮強度試験についてはφ5×10cm、曲げ試験については4×4×16cmの供試体を用いた。若干のデータのばらつきはあるものの、強度の大きな変動や低下は見られず、室内における促進試験の結果と同様の推移を示した。

##### (3) 塩化物イオン浸透深さ

塩化物イオン(Cl)に対する耐久性能を確認するため、EPMAによる断面内の塩化物イオン浸透深さを測定した（写真-12）。また、分析結果を基に供試体表



写真-11 桁内に収納された多量の暴露供試体

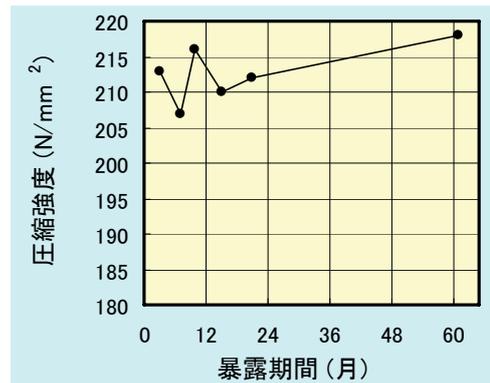


図-2 圧縮強度の推移

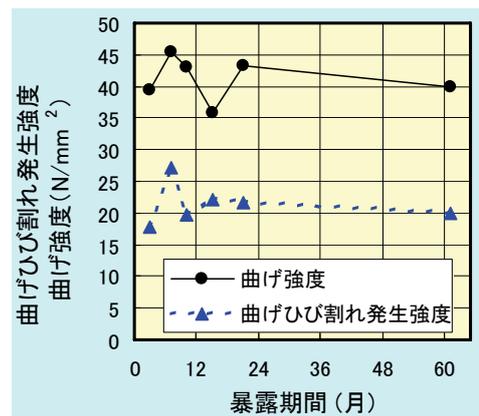


図-3 曲げひび割れ発生強度および曲げ強度の推移

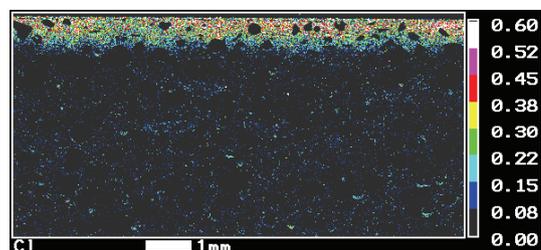


写真-12 暴露供試体の EPMA 測定結果

面から垂直深さ方向のCl濃度分布および見掛けの拡散係数を推定した。深さ方向にEPMAのデータを平均する間隔は0.1mmとした。

C1濃度分布の作成結果を図-4に、C1に関する見かけの拡散係数の算出結果を表-1に示す。

見かけの拡散係数は、暴露期間1773日とし、表面からの深さ0.4mm以上の測定結果から算出した。

結果としては、暴露供試体のC1浸透深さは約1mm程度であった。また、UFC指針に示されている人工海水浸漬試験の結果から得られる見かけの拡散係数は非常に小さなものであるが、今回算出された見かけの拡散係数はUFC指針の値(0.0019cm<sup>2</sup>/年)よりもさらに1桁小さいオーダーであることが確認された。

これらの追跡調査結果より、UFCが塩化物イオンの浸透に対して高い抵抗力を有することをフィールドデータから検証することができた。

## 5. おわりに

UFCの開発によって、従来はコンクリートの適用をあきらめていたようなケースでも、その高い強度と靱性、耐久性能を最大限に活かした、超軽量かつ長寿命の構造物を提案する事が可能となった。

長期的な視野に立ったインフラ整備が叫ばれる昨今、UFCの果たしていく役割はますます重要なものになると考えられる。

本稿に紹介した適用事例は、いずれも初めての取り組みとして試行錯誤しながら完成に至ったプロジェクトである。今後はこれらの実績から得られた数多くの知見を良く検証し、より合理的な設計方法や施工方法を求めて一歩ずつ工夫・改良を重ねることで、UFCの更なる活用が期待できると考えている。

### 参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー113，2004.
- 2) 武者浩透，大竹明朗，児玉明彦，小林忠司：超高強度コンクリート系新素材「ダクタル」を用いたPC橋梁の設計・施工—酒田みらい橋—，プレストレストコンクリート，Vol. 45，No. 2，p40-48，Mar，2003.
- 3) 武者浩透，石田有三，山野井毅，山下健：三兼池橋—日本初の超高強度繊維補強コンクリートによる連続桁橋—，プレストレストコンクリート，Vol. 49，No. 5，p18-26，2007.

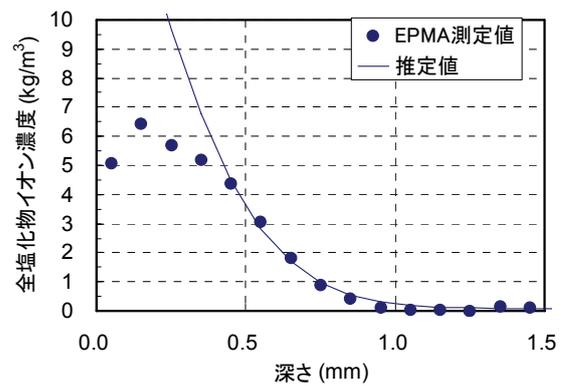


図-4 暴露供試体のC1濃度分布

表-1 見かけの拡散係数の算出結果

見かけの拡散係数(Dap)		表面Cl濃度 (kg/m <sup>3</sup> )
(cm <sup>2</sup> /年)	(m <sup>2</sup> /sec)	
0.000148	4.69 × 10 <sup>-16</sup>	18.9

- 4) 大島邦裕，中島稔，田中浩二，稲原英彦：豊田市総合体育館横断歩道橋の施工—超高強度繊維補強コンクリートを用いた歩道橋—，コンクリート工学，Vol. 46，No. 6，p25-30，2008. 6
- 5) 細谷学，武者浩透，安部吉広，信夫榮：「赤倉温泉ゆけむり橋」の施工—超高強度繊維補強コンクリートを使用したPC歩道橋—，プレストレストコンクリート，Vol. 46，No. 3，p16-23，2004.
- 6) 松山 高広，宮島 朗，横畑 勝彦，平井 康夫：曳田歩道橋—UFCを用いた世界最大規模のPC下路式歩道橋—，プレストレストコンクリート，Vol. 50，No. 1，2008.
- 7) 宮島 朗，三輪眞一，石井豪，須田康弘：旧吉城橋の架替えによる景観検討とUFC場所打ち目地部の施工，プレストレストコンクリートシンポジウム，2009.
- 8) 大熊光，大竹明朗，黒岩正，西川孝一：超高強度繊維補強コンクリートを用いた国内初の道路橋，土木学会第60回年次学術講演会，VI-263，pp. 525-526，2005.
- 9) 武者浩透，渡辺典男，福原哲，一戸秀久：UFCを用いたGSE橋梁の設計と実験，プレストレストコンクリート，Vol. 51，No. 6，p13-20，2008.
- 10) 大竹明朗，野口孝俊，大熊光，横井謙二：羽田D滑走路建設工事におけるUFC床版の製作，プレストレストコンクリート，Vol. 52，No1，2010.