

場所打ち UFC による PC 道路橋

デンカ小滝川橋

渡 邊 有 寿・一 宮 利 通・川 崎 文 義

「小滝川発電所2号機リニューアル橋梁架替え工事」は、新潟県糸魚川市にある民間の発電所設備の増強計画に伴い、建造後約100年経過した吊橋を架け替えるものである。本橋では、長寿命化によって凍結防止剤による塩害や凍害に対する維持管理性を向上させることを目的として、超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を採用した。本橋は、構造物全体をUFCで場所打ち施工した初めての事例であるとともに、新たに開発された高強度プレグラウトPC鋼材も初めて適用した道路橋である。本報では、UFCの場所打ち施工における各種取組みと施工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、場所打ち、大量施工、現場養生、高強度PC鋼材

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート(Ultra-high strength Fiber reinforced Concrete:以下、UFC)は、その名のとおり多量の繊維(鋼繊維)を用いた超高強度コンクリート(厳密にはモルタル)であり、圧縮強度 150 N/mm^2 以上、引張強度 5 N/mm^2 以上の特性値と高耐久性を有している。その優れた特性を活かすことで、部材の軽量化や長期耐久性付与など、設計・施工に多くの自由度と付加価値を見出すことができる。2004年に超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)¹⁾(以下、UFC指針)が発行されて以降、PC橋梁やPC床版、埋設型枠ならびに建材などへの適用を増やしている。UFCを用いた世界で最も大規模な工事としては羽田空港D滑走路拡張工事があり、約 19 万 m^2 (約 $22,000\text{ m}^3$)にUFCプレキャスト床版が用いられている^{2), 3)}。これまでUFCは、極めて高い性能を発揮させるために、給熱養生設備を有する工場でのプレキャスト部材を中心に展開されてきたが、常温環境でも性能が得られるものも開発されており⁴⁾、施工におけるさらなる自由度の向上、合理化が期待されている。

2. 小滝川橋

(1) 工事概要

小滝川発電所は新潟県糸魚川市の小滝川(姫川水系)の急流を利用した水力発電施設であり、国の天然記念

物に指定された小滝川硬玉産地(ヒスイ峡)にほど近い場所に位置する。同発電所では、発電設備の増強計画に伴うリニューアル工事が進められており、建造後約100年経過した吊橋の架替えが行われた。完成後の全景を写真-1に、工事概要を表-1に示す。

本橋には、凍害を受ける地域に建設されることや凍結防止剤が散布されることを踏まえ、今後100年までの維持管理費の削減を目的にUFCが採用された。上部工の構造パース図を図-1に示す。本橋では、橋

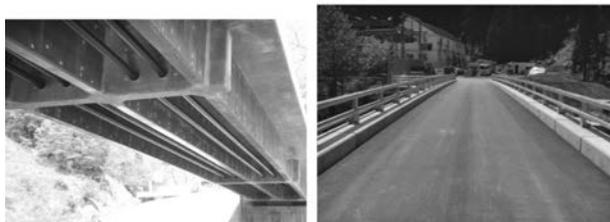
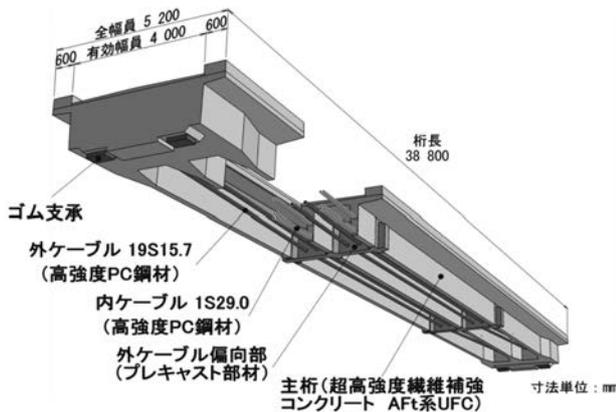


写真-1 完成状況(全景)

表一 工事概要

工 事 名	小滝川発電所高効率化リニューアル橋梁掛替え工事
発 注 者	デンカ(株)青海工場
設計・施工	鹿島建設(株)
工 事 場 所	新潟県糸魚川市
工 期	2013年10月～2014年4月(橋梁工事分)
工 事 内 容	【上部工】単純PCポストテンション方式T桁橋、橋長39.0m、有効幅員4.0m 【下部工】逆T字式橋台2基



図一 構造パース図

梁全体をUFCの場所打ちで構築する方法を採用した。この背景には、架設地点までは山間部の幅員の狭い道路を通行する必要があるため、大型のプレキャスト部材では運搬が困難であったことや、その対策として部材を細かく分割する方法では耐久性上の課題となる継目が増えてしまうことがある。

(2) 使用材料

本工事で用いたUFCの配合を表二に示す。本材料はエトリンナイト生成系UFC(以下、AFt系UFC)と言われ、土木学会でUFCとしての技術評価を受けているものの一つである。本工事では、場所打ち施工におけるひび割れ発生リスクを抑えるために、自己収縮を低減させたタイプを採用した。ここで、養生については、UFC指針では、打込みから脱型やプレストレス導入に必要な初期強度が得られるまで実施する「初期養生」と、最終強度を発現させるまで実施する

表二 UFCの配合 (AFt系)

水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)						補強繊維 (kg)
	水*	結合材 (収縮低減タイプ)	細骨材	収縮低減剤	高性能減水剤	消泡剤	
15.2	195	1,287	905	12.9	36.0	6.4	137.4 (1.75 vol.%)

*高性能減水剤中の水分を含む

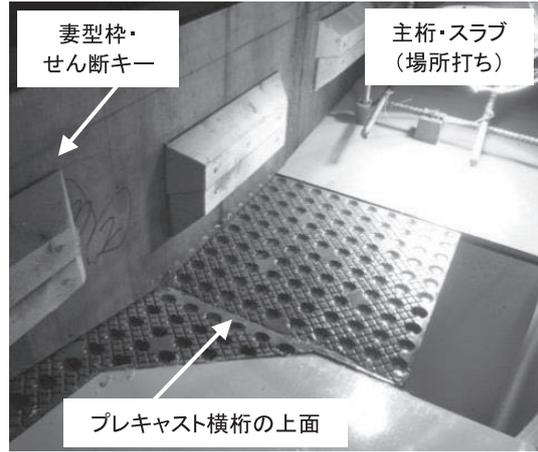
「標準熱養生」の二段構えを基本としている。AFt系UFCでは、この標準熱養生として最高温度85℃の蒸気養生を20～24時間行うこととしているが、これらは十分な設備を有する工場製作のプレキャスト部材を想定したものである。しかし、本橋では渇水期である冬期に施工する必要性から、積雪山間部である架設地点で工場のような理想的な養生を施すことが困難である。そこで、現場で実現可能な養生によって達成できる強度を勘案し、UFC指針の適用範囲の下限値である150 N/mm²を圧縮強度の設計基準強度に設定した。その他、本橋に用いたUFCの特性値および設計値を表三に示す⁵⁾。

表三 UFCの特性値および設計値

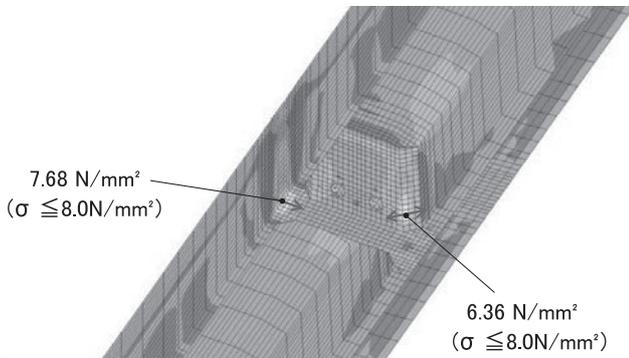
項目	単位	場所打ち	工場製作	
圧縮強度 (設計基準強度)	f _{ck}	N/mm ²	150	180
曲げ圧縮応力度の制限値 (許容曲げ圧縮応力度)	0.6 f _{ck}	N/mm ²	90	108
ひび割れ発生強度 ・許容曲げ引張応力度 ・許容斜引張応力度	f _{crk}	N/mm ²	4.0	8.0
引張強度	f _{tk}	N/mm ²	6.5	8.8

(3) UFCを用いたPC橋に適した構造計画

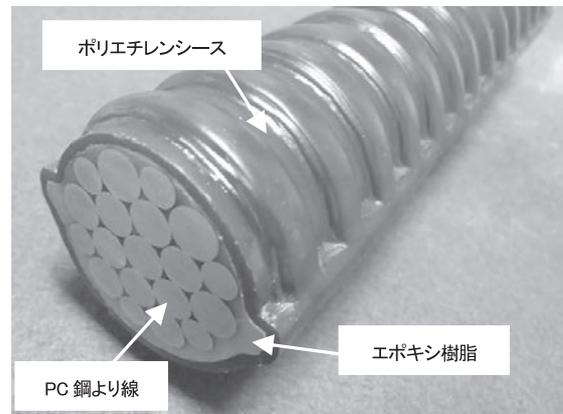
まず、UFCの高い圧縮強度をより有効活用するには下路桁形式が望ましいが、景観性および冬期の除雪作業を勘案して上路形式を採用した。次に、本橋ではUFCの場所打ち施工による構築を基本としたが、中間横桁のみプレキャスト部材を用いている(写真一2)。これは、主桁へのプレストレス導入で主桁下縁の橋軸方向に生じる圧縮応力により、その直角方向の大きな引張応力が中間横桁に生じるため、プレキャスト化によって局所的な発生応力に抵抗させるためである(図一2)。このことは、施工や品質確保の上でもメリットとなり、中間横桁を打込み境界(妻型枠)とすることで、全長約39m(約90m³)の部材を3回(3日)に分けて施工することが可能となり、コンクリートの供給能力や打込み能力が確保でき、流動距離が抑制でき、さらには鉛直打重ねを解消することができ



写真一 2 プレキャスト化した中間横桁



図一 2 中間横桁部の応力照査



写真一 3 プレグラウト PC 鋼材

た。横桁の上面は場所打ち UFC との一体化を図るため、凹凸を設けている。

PC 鋼材の仕様を表一 4 に示す。本橋では、UFC の高強度の効果に加えて、より断面のスリム化が可能となるように、内・外ケーブル併用配置とし、配置本数が低減できる高強度 PC 鋼材を内・外ともに採用した。防食仕様として、内ケーブルは低温環境での施工となることから、グラウト作業を省略できるプレグラ

ウトタイプとした。内ケーブルは新たに開発された湿気硬化型の高強度プレグラウト PC 鋼材 (1S29.0) であり、本橋が初適用となる (写真一 3) ⁶⁾。外ケーブルは、桁外であるがウェブ間に配置されることやコスト面を配慮し、エポキシ被覆ストランドをポリエチレン管内に配置し、セメントグラウトにて充填する 3 重防食仕様とした。鉄筋の使用は、定着体周り (補強筋) および地覆のみである。

表一 4 PC 鋼材の仕様

項目	単位	内ケーブル 19 本より線 1S29.0	内ケーブル 7 本より線 19S15.7B
断面積	mm ²	547.5	2,850
0.2% 永久伸びに対する荷重 (鋼材の降伏点)	kN (N/mm ²)	996 (1,810)	5,415 (1,900)
引張荷重 (引張強さ)	kN (N/mm ²)	1,139 (2,080)	6,365 (2,230)
導入力 (導入応力)	kN (N/mm ²)	783 (1,430)	4,380 (1,540)
見かけのリラクゼーション率	%	1.5	5.0
セット量	mm	7.0	11.0

3. 実施工に向けた検討および施工結果

(1) 鋼繊維の均一性確保

UFCを場所打ち施工する場合には、設備が整った工場と異なり、種々の条件で打込み位置が制限されることが想定される。本工事に際しても、クレーンの作業半径と降雪によって、クレーンの作業半径や屋根の開閉箇所制限により打込み位置が制限された。そこで、事前に主桁を模擬した10mの部材を用いてUFCの流動勾配や鋼繊維の均一性が確保される流動距離の限界を把握した(図-3)。流動先端の鋼繊維の量を測定した結果、10m流動後も繊維が均一に分散されていることを確認した上で、実施工では安全率も踏まえて8m以下の流動距離となるように打込み位置を決定した。

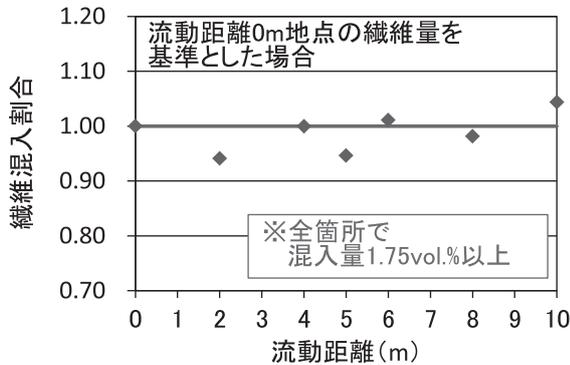


図-3 流動距離と繊維混入割合の確認

次に、長時間の打込みに伴う打重ねについては、ブリーディング(浮き水)が生じずに表面が乾燥しやすいUFC特有の性状や、鋼繊維の架橋による一体化の確保を考慮し、打込み空間の保湿方法(継続的な水の噴霧)および突き棒によるかき乱し方法を事前検討⁷⁾によって決定した。施工状況を写真-4に示す。実施工では最大1.5時間程度の打重ね時間間隔が生じた

が、打重ね線や表面気泡のない、きれいな仕上がりと became.

(2) UFCの製造および運搬

AfT系UFCの製造は、糸魚川市内の生コンプラント2社(二軸強制練りミキサ)で行い、約90m³を3日間で製造した(各日約30m³)。1バッチ当りの練混ぜ量は、両プラントともに2.0m³とし、1プラント当りの製造量は平均4.0m³/h、最大7.0m³/hであった。UFCはアジテータ車(2.0m³積)により約40分で現場まで運搬後、バケット(容量1.0m³)で場内運搬した。

(3) マスコンクリートへの対応

本橋の端部横桁は約2.0×4.0×1.5mのマスコンクリートであり、単位結合材量の多いAfT系UFCによって中心部の最高温度が110℃まで上昇することが事前の温度応力解析において予想された。これにより、部材内外の温度差による温度ひび割れリスクの他に、プレグラウトPC鋼材に使用されているエポキシ樹脂の硬化が進んでしまい、緊張工程への影響が懸念された。そこで、水温5℃の河川水を利用したパイプクーリングを実施し、中心部の温度上昇を抑制した(図-4、写真-5)。実工事に際しても事前の予測どおりに20~25℃程度最高温度の低減が図られ、前述の給熱保温養生で施工エリアの雰囲気温度を上げた効

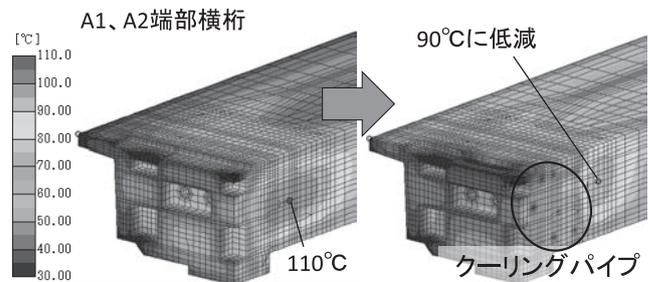
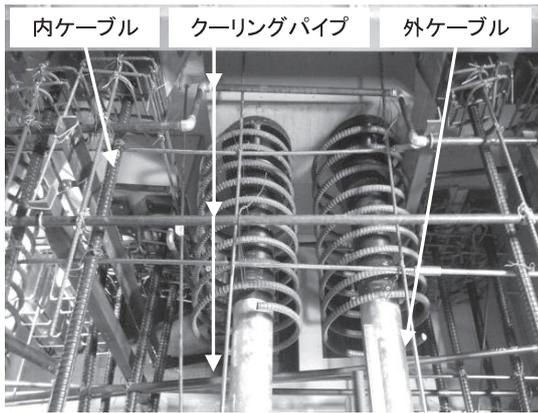


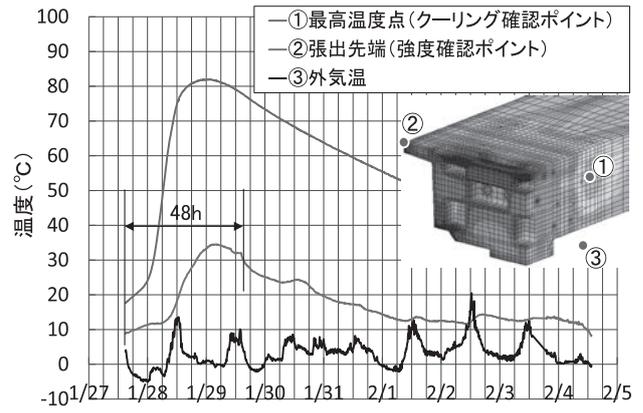
図-4 端部横桁の温度解析(パイプクーリング)



写真-4 施工状況



写真一五 端部横桁のパイプクーリング

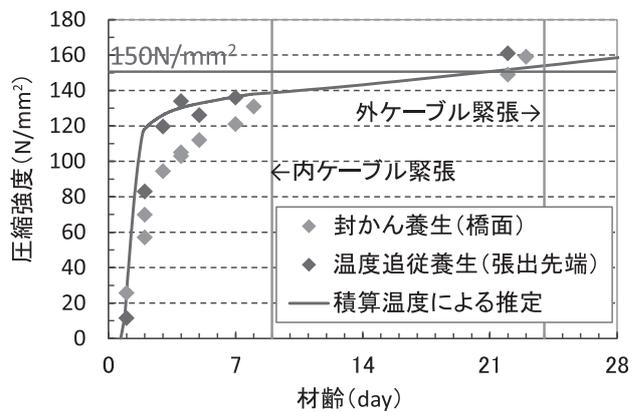


図一五 温度計測結果 (パイプクーリングと給熱保温養生)

果も相まって、有害なひび割れの発生を抑制することができている。なお、プレグラウト PC 鋼材を埋め込んだ AFt 系 UFC の簡易断熱試験により、仮に最高温度 100℃ を経験しても材齢 36 日までは緊張可能であることを事前に確認したことも付け加えておきたい。

(4) 冬期施工における現場養生

本工事は冬期(湯水期)の施工となったため、低温環境でもプレストレスを導入する材齢(工期)までに確実に強度を発現させる必要があった。そこで、現場で実現可能な給熱保温養生として、ユニット式養生パネルと二重の防炎シートで施工エリア全体を覆い、打込み後の雰囲気温度の目標を 30℃ とし、熱交換式温風機(熱出力 68, 700 kcal/hr × 6 台, 28, 600 kcal/hr × 2 台)を使用する計画とした(写真一六)。特に自己発熱の小さい薄肉部(床版の張出部など)の強度発現を確実にするため、積算温度による強度推定手法を用いながら、打込みから 48 時間までに強度発現のアクセラに必要な 30℃ を経験するように管理した(図一五)。AFt 系 UFC の現場養生供試体の強度試験結果を図一六に示す。図に示すように、打込みから材齢 22 日で目標の圧縮強度 150 N/mm² に到達した。ま

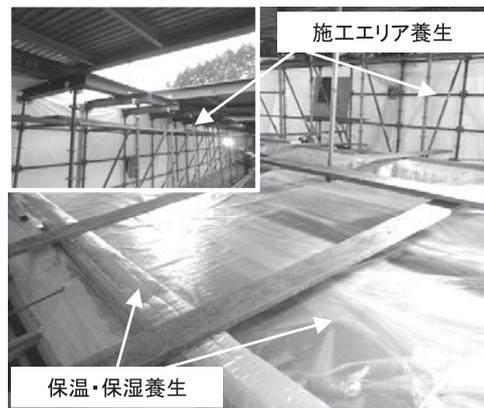


図一六 現場養生供試体の強度試験結果

た、前述の薄肉部で保温養生した供試体の強度は、当該部位の温度計測結果を用いた積算温度の推定値とほぼ同等であった。

(5) プレストレスの導入

前述のように、最終日(3日目)に打ち込まれた AFt 系 UFC が所定の圧縮強度 150 N/mm² に達していることを確認した後、内・外ケーブルを緊張した。外ケーブル緊張後のたわみは設計値 153 mm に対して 148 mm(上向き)であり、ほぼ設計通りの挙動であった。



写真一六 養生状況

4. おわりに

UFC (AFt系 UFC) の場所打ち施工となる橋梁の構築に際し、場所打ち施工に向けた各種検討を行い、これらを実施工へ反映させ、良好な結果を得た。今後は、新設工事のみならず道路床版の更新⁸⁾や、補修・補強分野においても UFC の場所打ち施工のニーズが高まることが予想される。本報が今後の用途拡大・新構造への参考になれば幸いである。最後に本工事にご尽力頂いた関係各位に厚く御礼申し上げます。

JCMIA

《参考文献》

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー 113，2004
- 2) 武者浩透，渡辺典男，稲原英彦ら：UFC（ダクタル）を用いた構造物の特徴と展開，大成建設技術センター報，第42号，pp.20_1-20_8，2009
- 3) 渡邊有寿，柳井修司，渡邊賢三ら：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の耐久性と最近の適用事例，鹿島技術研究所年報 第58号，pp.177-184，2010
- 4) 石関嘉一，平田隆祥，瀧田安浩：「スリムクリート」の港湾構造物リニューアル工事への適用，大林組技術研究所報 No.75，pp.1-8，2011
- 5) 伊藤康輔，別府 教，森田 遼，一宮利通：場所打ちによる超高強度繊維補強コンクリート製道路橋の設計，プレストレストコンクリート工学会 第23回シンポジウム論文集，pp.527-530，2014.10
- 6) 田中秀一，大島克仁，松原喜之ら：極太径 29.0 mm プレグラウト高強度 PC 鋼より線の開発，プレストレストコンクリート工学会 第23回シンポジウム論文集，pp.705-708，2014.10
- 7) 青山達彦，柳井修司，渡邊有寿ら：超高強度繊維補強コンクリートの打重ね部の一体性確保に関する基礎的実験，土木学会第69回年次学術講演会，pp.489-490，2013.9
- 8) 小坂 崇，佐藤彰紀，一宮利通ら：UFC 道路橋床版の開発と大規模更新への適用性検討，コンクリート工学，Vol.54，No.1，pp.21-27，2016

【筆者紹介】

渡邊 有寿（わたなべ ゆうじ）
鹿島建設株式会社
技術研究所 土木材料グループ
主任研究員



一宮 利通（いちのみや としみち）
鹿島建設株式会社
技術研究所 土木構造グループ
首席研究員



川崎 文義（かわさき ふみよし）
鹿島建設株式会社
土木管理本部 土木技術部

