

三岐鉄道「萱生川橋梁」の設計・施工

— 世界初の UFC 鉄道橋 —

森川 陽平*1・谷村 幸裕*2・中野 誠嗣*3・相浦 聡*4

本橋は、河川改修に伴う鋼製橋梁の改築工事として計画されたが、長スパン化による桁高の増加と河川計画高水位の上昇により、営業線の軌道高を嵩上げする問題を抱えていた。これに対し、橋梁を下路桁構造とし、鉄道橋梁では世界で初となる UFC を採用することで床版厚を薄くし、これらの課題を解決するに至った。

本稿では、従来の鉄道 PC 下路桁との設計比較、UFC 鉄道橋の設計概要と FEM 解析を用いた設計検証概要、および本橋の施工概要について報告する。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート，UFC，鉄道橋，低桁高・高耐久

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、薄肉部材による軽量化、高耐久性などの優れた特性から注目されており、歩道橋、道路橋、栈橋上の床版などに適用範囲を広めている。土木学会では「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）が作成され、この新技術の普及と促進が図られている。

本稿では、UFC を適用した世界でも初めての鉄道橋である「三岐鉄道 萱生川橋梁」について、その適用理由、PC 橋との比較設計、詳細設計および施工の概要について報告する。

2. 橋梁概要

本工事は、準用河川萱生川河川改修事業に伴う既設橋梁の架替え工事である。改修前には橋長 9.60 m、支間長 8.90 m、桁高 0.695 m の鋼製橋梁が架けられていたが、鋼橋では供用後に塗装などのメンテナンスが必要となり、騒音の問題もあることから、コンクリート橋が計画されていた。

改修にあたり、河川が拡幅されて橋長が長くなることで桁高の増加が予想されるうえ、計画高水位も上昇する。結果的に、桁高制限はきわめて厳しくなり、図 - 1 に示すように部材厚が 250 mm 以下に制約された。

新橋梁は、部材厚を薄くできる下路桁形式で構造検討を行ったが、従来コンクリートを用いた場合は、床版厚の制限値を満足せず、軌道高さの変更を要することが判明した。

そこで、超高強度で鉄筋が不要な UFC を適用することで部材厚を薄くし、制限値を満足することができた。これにより軌道の嵩上げが不要となり、総工事費の縮減が可能

となった。以下に橋梁諸元（表 - 1）および完成写真（写真 - 1）を示す。

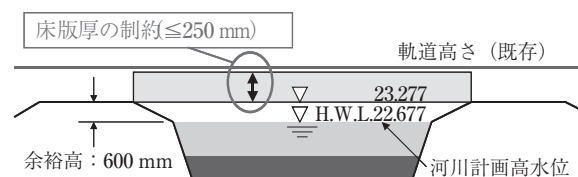


図 - 1 床版厚の制約条件

表 - 1 橋梁諸元

橋 梁 名	萱生川（かようがわ）橋梁
路 線 名	三岐鉄道三岐線
施 工 場 所	三重県四日市市
橋 長	15.86 m （支間長 14.50 m）
斜 角	A1, A2 = 62° 00' 09", R = ∞
幅 員	4.00 m（単線）
桁 高	1.50 m（支間中央）
構 造 形 式	PC 単純下路桁橋（UFC 製）
発 注 者	三岐鉄道（株）
技 術 指 導	（財）鉄道総合技術研究所
設 計 者	全日本コンサルタント（株）
施 工 者	大成建設（株）



写真 - 1 完成状況

*1 Yohei MORIKAWA：三岐鉄道（株）鉄道部

*2 Yukihiro TANIMURA：（財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部

*3 Masatsugu NAKANO：全日本コンサルタント（株）技術部

*4 Satoru AIURA：大成建設（株）土木技術部

3. UFC の特性

UFC は超高強度、高じん性、高耐久性を有する材料であり、鉄筋を一切必要としないという画期的な特徴を有している。以下に UFC（ダクタル）の材料・設計・および施工上の特徴を示す。

3.1 材料の特徴

基本的な構成材料は、セメント、シリカフューム等の混和材、骨材、水、減水剤、補強繊維である（表 - 2）。

UFC は、従来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、シリカフュームなどの微粒子によって隙間なく埋め尽くす「最密充てん」の思想に基づいた配合とすることで、緻密性を最大限に高めている（図 - 2）。

表 - 2 構成材料比較

	単位	UFC	普通コンクリート
使用材料	セメントの種類	ポルトランドセメント	
	骨材の粒径	mm	25
	その他	シリカフューム 補強用鋼繊維	—
水セメント比		～ 0.24	0.55
単位質量		kN/m ³	25.5
			24.5

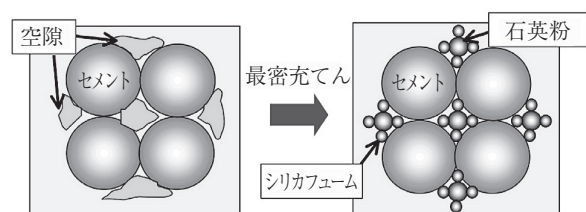


図 - 2 最密充てんの概念図

UFC には直径 0.1～0.25 mm、長さ 10～20 mm、引張強度 2 kN/mm² 以上の高張力な鋼繊維が 2 vol.% 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。

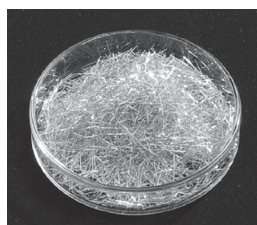


写真 - 2 鋼 繊 維

本橋に使用した UFC と従来コンクリートの物性値比較を表 - 3 に示す。

表 - 3 物性値比較

	単位	UFC	普通コンクリート
特性値	圧縮強度	N/mm ²	180
	引張強度 (ひび割れ発生強度)	N/mm ²	50
弾性係数		N/mm ²	8.0
ポアソン比			3.1
透水係数			0.2
塩化物イオンの拡散係数		cm/s	4 × 10 ⁻¹⁷
塩化物イオンの拡散係数		cm ² /年	10 ⁻¹¹ ～10 ⁻¹⁰
空隙量		vol. %	0.0019
			0.14～0.9
			4
			10

3.2 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。

非常に高い圧縮強度は、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 8 N/mm² であり、使用時にはひび割れを許さない設計としている。また、仮にひび割れが生じた場合でも、繊維補強効果により 0.04～0.06 mm 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。

緊張材（ポストテンションの場合）のかぶりは「20 mm 以上かつシースの直径の 1/2 以上」としている。鉄筋コンクリートと比べかぶりが少ないのは、硬化体組織がきわめて緻密であるためであり、上記を満足すれば、耐久性の照査（中性化、塩化物イオンの侵入等による補強鋼材の腐食）も満足するとされる。

3.3 施工上の特徴

(1) 高 流 動

UFC は高流動コンクリートであるため、自己充てん性に優れ、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。

(2) 養 生 方 法

UFC は打設後に初期養生を施したのち、標準熱養生（90℃の蒸気養生 48 時間）を行うことを原則とする。これにより、硬化後の組織がより緻密化し、高強度を発現するとともに、収縮やクリープは大幅に低減し、耐久性が向上する。

表 - 4 養生時の収縮量およびクリープ係数

	単位	UFC	普通コンクリート
収縮	標準熱養生中	× 10 ⁻⁶	450
	養生終了後	× 10 ⁻⁶	380
クリープ係数			50
			130
			0.4
			1.2

(3) プレキャスト化

UFC は 2 次養生が必要であるため、プレキャストブロックを工場製作し、現地でプレストレスにより一体化するプレキャストセグメント工法が一般的である。プレキャスト化により、高強度コンクリートに特有な自己収縮による問題を解消し、クリープ係数も小さいことからプレストレスのロスが少なく導入効率の向上に寄与している。

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。

プレキャストブロック間の継目部については、UFC を現地で打設し、給熱養生を実施するのが一般的である。

4. 設計概要

4.1 従来 PC 構造と UFC 構造の設計比較

UFC の採用にあたり、従来 PC 下路桁と UFC 下路桁の比較を行った。以下に、設計結果比較表および UFC 下路桁を採用した本橋の標準断面を示す（表 - 5、図 - 3）。

表 - 5 下路桁の設計結果比較表

	UFC 下路桁	従来設計による PC 下路桁
断面形状		
断面積	1.6 m ² (0.5)	3.2 m ² (1.0)
設計荷重	桁 700 kN (0.54) 軌道、碎石 500 kN 列車 1 100 kN 計 2 300 kN (0.79)	桁 1 300 kN (1.00) 軌道、碎石 500 kN 列車 1 100 kN 計 2 900 kN (1.00)
断面剛性	1.6 × 10 ⁷ kN・m ² (0.76)	2.1 × 10 ⁷ kN・m ² (1.00)

※ () 内は、対 PC 下路桁との比率を示す。

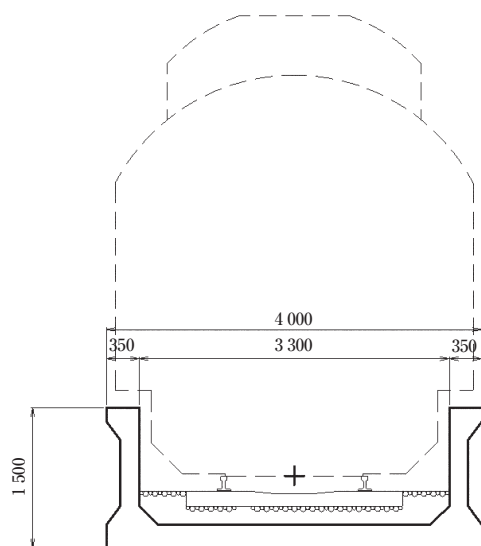


図 - 3 標準断面図 (mm)

(1) 従来設計による PC 下路桁

検討の結果、従来設計（設計強度 50 N/mm²）による PC 下路桁の下床版厚は 390 mm となり、前述の下床版厚 250 mm の制限を満足しなかった。

仮に下床版厚を 390 mm とした場合には、最大 150 mm の線路嵩上げを、本橋前後のすりつけ区間を含む約 300 m にわたり実施する必要があると判明した。線路嵩上げ工により全体工事費が大幅なコストアップとなること、および本橋に近接している駅部に影響範囲が及ぶことなどから、従来 PC 下路桁案は見送られることとなった。

(2) UFC 下路桁

UFC の大きな特徴は、従来コンクリートに比して 4 倍近い卓越した圧縮強度と 3 倍近い引張強度を有すること、鋼繊維補強コンクリートゆえ鉄筋コンクリートの構造細目が適用されないことにある。

UFC 下路桁では、従来 PC 下路桁と比べて部材厚を著しく薄くすることができ、軽量化を図ることが可能となる。これによって本橋の課題となっていた下床版厚の制限値を満足する構造が成立し、結果として鉄道縦断線形を変更せず改築が可能となった。

また、従来コンクリートと比べて耐久性にも優れ、メンテナンスなどのライフサイクルコストの低減にも寄与する。

4.2 現行基準への適合性に関する課題

本橋の設計基準は「鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物 鉄道総合技術研究所編 平成 16 年 4 月版」²⁾（以下、鉄道標準）に基づくことを原則とした。

ただし、UFC には従来のコンクリートと材料特性の異なる点があるため、適宜 UFC 指針を適用するものとした。

UFC を用いた鉄道橋は世界にも前例が無く、UFC に特有の項目については個別に設計方針を決定し、FEM 解析などを実施して詳細に検討する必要がある。以下に個別の検討課題を示す。

(1) 部材厚の規定

UFC の優れた材料特性により、各部材厚の薄肉化が可能となり、結果的に主梁上突縁幅および床スラブ厚においては、鉄道標準で規定された最小値を下回る値を採用した。鉄道標準規定外の部材厚を採用するにあたり、設計の妥当性をいかに検証するかが課題となった。

(2) 剛性低下の影響

部材厚の薄肉化に伴い、UFC 下路桁の断面剛性は従来 PC 下路桁よりも低下する。この影響を設計でどのように評価するかが課題となった。

(3) 補強鉄筋

吊下げ鉄筋、PC 定着部補強、ストッパー周辺の補強など、従来設計では補強鉄筋が必要とされるが、UFC には原則鉄筋を使用しないため、どのような方針で設計を行うかが課題となった。

4.3 部材厚に対する安全照査

(1) 設計方針

鉄道標準の規定では、床スラブの厚さは 350 mm 以上（単線桁）、主梁の上突縁幅は主梁のスパンの 3 % 以上とするのがよいとされる。ただし、主梁の高さが大きく上突縁幅が小さい場合には、別途、主梁の横座屈に関する安全性の照査が必要となる「鉄道標準 14.6.4 (1)(2)」。

床スラブは、主梁のねじり剛性や端横梁の曲げ剛性によって大きく影響を受ける。U 形断面の桁の場合、剛な横梁を設けるのが困難であるので、これを考慮して決定する。

本設計では、主梁の上突縁幅を縦方向 PC 鋼材の定着具形状から決まる最小値 350 mm とし、床スラブ厚を縦方向・横方向 PC シースの配置から決まる最小値 250 mm とした。

ともに、鉄道標準の構造細目を満足しない値となることをふまえ、部材厚に関する照査は以下のように定めた。

- ねじり等の断面剛性が小さくなる影響については、従来と同様に格子解析による照査のほか、3次元FEM解析により、部材に発生している主応力がUFCの引張応力の制限値内〔8 N/mm²〕にあることを照査した。
- 主梁の上突縁幅は、鉄道標準における最小値（径間長の3%〔14 500 mm × 0.03 = 435 mm〕）に満たないため、3次元FEMによるEuler座屈解析を行うことにより横座屈に対する安全性を照査した。

(2) 照査結果

- 横座屈に対する安全照査（図 - 4）
横座屈限界は変動荷重が約155倍作用した場合であり、十分に安全であることを確認した。

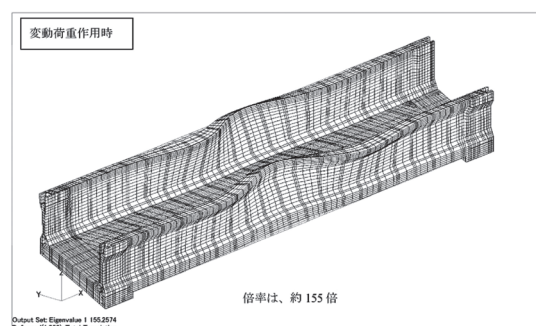


図 - 4 横座屈照査結果

- 軸方向応力度照査（図 - 5）
軸方向応力度が引張応力の制限値内であることを確認した。また、格子解析結果とも同等であった。

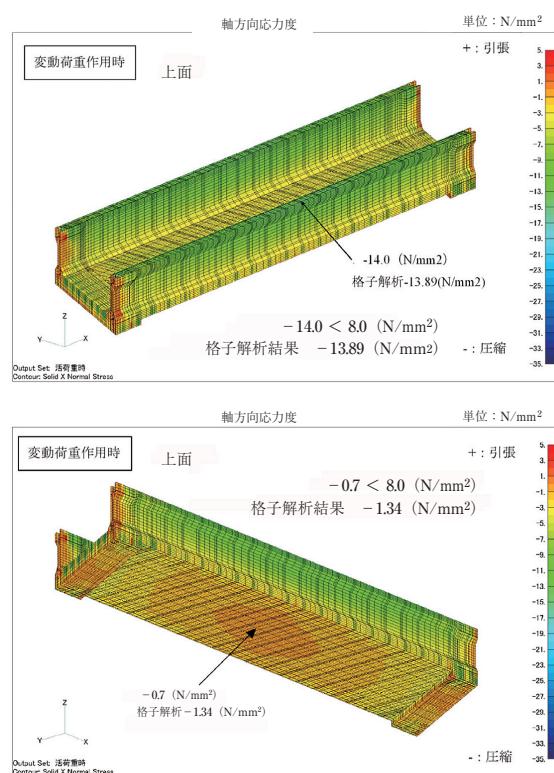


図 - 5 軸方向応力度

- 最大主応力照査（図 - 6）
主応力は引張応力の制限値内にあることを確認した。

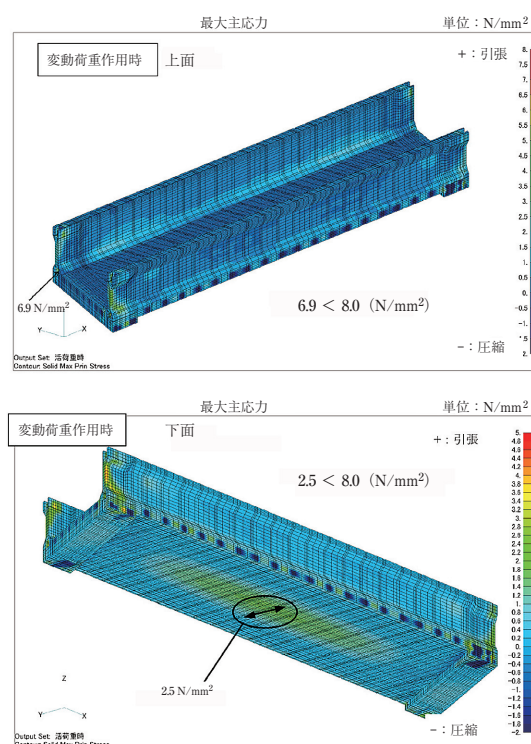


図 - 6 最大主応力時（下面）

4.4 振動特性の把握

(1) 設計方針

UFC構造物は部材厚が薄く、従来コンクリート構造物に比べて固有周期が長くなる可能性がある。そこで、本橋における列車走行時の振動特性（横方向の振動を含む）を把握し、共振や衝撃の影響がないことを確認した。

具体的には従来簡易式 $[f = \pi / (2 \times L_b^2) \cdot \sqrt{(EI \cdot g) / D}]$ （ここに、 f : 固有振動数 (Hz), L_b : 部材スパン, EI : 部材の曲げ剛性, g : 重力加速度, D : 単位長さあたりの死荷重）と、3次元FEM解析によって固有振動数を求めた。

(2) 照査結果

従来PC下路桁の簡易式による固有振動数は11.0 Hzであった。UFC下路桁の固有値解析では、1次モードが10.2 Hz、簡易式による振動数が11.1 Hzとなり、従来PC下路桁と同等の振動数となることを確認した（図 - 7）。

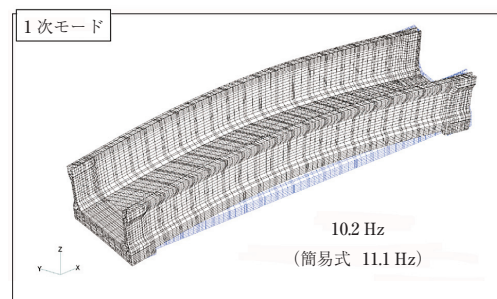


図 - 7 1次モード時

○ 報 文 ○

4.5 たわみ量の照査

(1) 設計方針

2次元フレーム解析および斜角を考慮した3次元FEM解析にてたわみ量の算出を行った。たわみの設計限界値は常時の走行安定性から $[\delta < L_b/500]$ とした「鉄道標準変位制限 7.2.3」³⁾。

(2) 照査結果

たわみ量は4.8 mm(2次元フレーム解析)、5.0 mm(FEM解析)となり、限界値29.0 mm以下であることを確認した。格子解析とFEM解析ではほぼ同程度の値が求まっており、この点からも問題ないと判断した(図-8)。

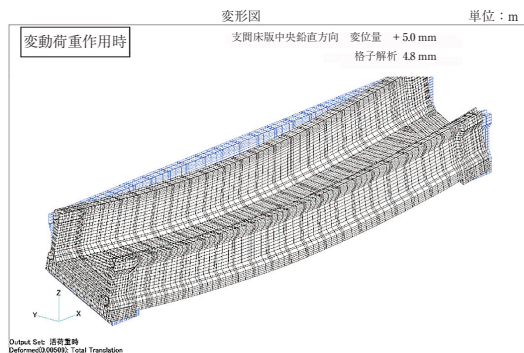


図-8 たわみ量

4.6 補強鉄筋の必要性の照査

(1) 吊下げ鉄筋

U形断面の桁は、床スラブが主梁下縁に吊り下げられている構造であるため、主梁腹部には鉛直方向の引張力が生じている。これに対して、吊下げ鉄筋を配置する必要がある「鉄道標準 14.6.4(9)」。

3次元FEM解析の結果、ウェブ下端に生じる鉛直方向応力はUFCの引張応力の制限値内であることが確認され、吊下げ鉄筋は不要と判断した。

(2) PC 定着部補強鉄筋

定着具背面のコンクリートは、PC鋼材に垂直な方向に生じる引張応力に対して、U字筋、格子状、らせん状の鉄筋で補強する「鉄道標準 11.12.2」。

本設計では、背面コンクリートの割裂に対する照査として、定着部の3次元FEM解析を行った。定着部背面に発

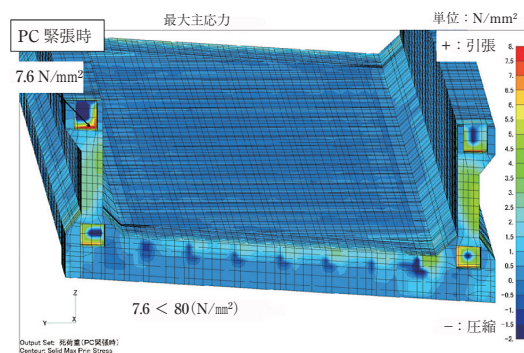


図-9 PC 定着背面主応力

生する主応力がUFCの引張応力の制限値内であることが確認され、補強筋は不要と判断した(図-9)。

(3) ストッパー周辺補強の照査

コンクリートの設計水平耐力算出式には、せん断破壊面に交差する補強鉄筋量が含まれている。UFCには鉄筋が配置されないため鉄道標準の規定では照査不可能である。

鉄道標準では、仮にコンクリートのせん断破壊が生じても桁端が破壊しないように補強鉄筋を配置することとしているが、本設計ではUFC指針に基づき、ストッパーの外側に働く面内のせん断に対して、せん断破壊面に沿って抵抗できる終局せん断耐力の照査を行い、十分に安全であることを確認した。よって、ストッパー周辺の補強鉄筋は不要と判断した。

4.7 設計の総括

本設計では、UFCが鉄道橋梁として実績の無い材料であることをふまえ、従来設計に基づくPC下路桁と比べ極端な断面剛性の低下を避けるため、桁高に関しては当初設計(PC下路桁)の値を踏襲した。結果的に、安全性および復旧性の照査では余裕がある結果となり、FEM解析による検証も問題なかった。

橋梁の供用に際しては、設計における仮定や計算値の妥当性を確認するため、実橋での計測を実施した。

具体的には、1)列車通過時のたわみ量を測定し設計段階における算定数値の妥当性を確認する、2)衝撃振動特性の把握を目的として振動計測を行い、固有振動数、振動モード形の確認を行った。詳細については追って報告するが、今後これらの実橋検証に基づいた設計手法の確立とともに、より長スパンの橋梁においても最適プロポジションに近づけることが可能になるものと考えている。

5. 施工概要

本工事は、萱生川改修事業(事業主体:四日市市)に伴う萱生川橋梁架替え工事のうち、UFC桁製作(数量25.3 m³)、現場地組、橋面工(防水工等)、仮橋撤去・横取り架設を行った。施工概要を以下に示す。

5.1 プレキャストブロック工場製作・運搬

本橋のブロック割は橋軸方向に7分割とし、端部ブロック(幅1.3~3.4 m、重量約11 t)、その他ブロック(幅2.2 m、重量約8 t)の2種類からなる。工場製作されたブロックはトレーラーにて運搬後、65 tラフタークレーンを用いて架橋地点横の地組ヤードに設置した(写真-3)。



写真-3 プレキャストブロック運搬状況

5.2 現場施工フロー

以下に現場の施工フローを示す（図 - 10）。

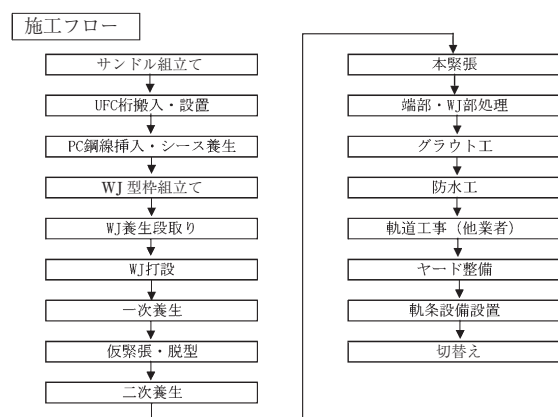


図 - 10 現場施工フロー

5.3 桁ブロック間詰工

桁ブロック間を間詰めするため、ブロック継目（間隔 60 mm）に現場練りの UFC を打設し（ウェットジョイント工、以下 WJ）、ジェットヒーター 4 台を用いて給熱養生を行った（写真 - 4、5）。



写真 - 4 打設状況

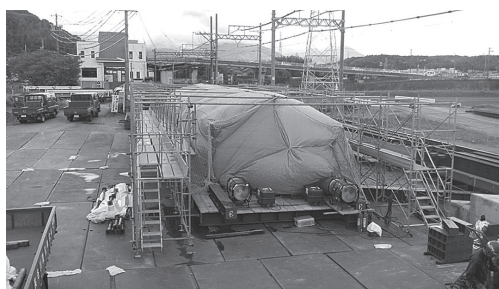


写真 - 5 WJ 部給熱養生状況

5.4 PC 緊張工

本橋に配置される PC 鋼材は以下のとおりである。

- ・縦締め：（主桁） 12S12.7 × 4 本
（下床版） 1S21.8 × 7 本
- ・横締め：（下床版） 1S21.8 × 29 本

WJ 後、一次養生により緊張可能強度に達した時点で脱型し、仮緊張によって桁の一体化を図った。仮緊張の緊張力はプレキャストセグメントの引寄せ力に準じ、全断面で

3 N/mm² 程度の圧縮力となるよう算出した。その後、二次養生による UFC 設計強度の発現を確認し、最終的な本緊張を行い橋体が完成した。緊張完了後、速やかに PC グラウトの充てんを実施した。

5.5 横取り架設

本橋は営業線の鉄道橋架替え工事であるため、地組した UFC 桁を横引きジャッキを用いて一晩で横取り架設を行った。まずは既設工事桁をクレーンにて撤去し、その後 50 t ジャッキ 4 台の押し引きで UFC 桁の横移動を行った（写真 - 6）。

4 基のゴム支承、伸縮装置および鋼棒ストッパーは事前に桁側へ固定し、移動完了・ジャッキダウン、プレキャストパラペットの設置後に、各種アンカー箱抜きを無収縮モルタルで充てんした。供用開始まで数時間という条件のため、超速硬型の無収縮モルタルを選定し、万一の硬化不良に備えて仮受け用の鋼材も配置した。



写真 - 6 桁横取り架設状況

6. おわりに

本橋は 2010 年 6 月に無事架替えを完了した。供用開始後、本橋では変位や振動、騒音などの実地測定・検証を行っており、検証結果については追って詳細な報告を行うものとするが、設計段階における解析結果に対して、実橋の観測値は精度良い相関を示したことが分かっている。

本橋の施工技術については、これまで積み重ねてきた各種橋梁の知見を十分にふまえ、高品質な構造物を完成できたものと思われる。また、UFC 桁が超軽量かつ高強度であることで、線路閉鎖後の夜間一括架設に対しても比較的軽微な設備で架設可能になるなど、多くのメリットが示された。

本橋の設計・施工にあたりご尽力を賜った関係者の皆様に深く感謝するとともに、本稿が UFC 鉄道橋の設計・施工の一助となれば幸いである。

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) 財 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物、平成 16 年 4 月
- 3) 財 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説変位制限、平成 18 年 2 月

【2010 年 11 月 1 日受付】