

白虹橋の施工

— 峡谷に溶け込む PC 単純複合トラス橋 —

籠谷 建太郎*¹・蔭山 路生*²・大野 達也*³・後藤 友和*⁴

白虹橋は、天ヶ瀬ダム再開発事業の一環として、京都府宇治市の風光明媚な景観が残る渓谷に建設された PC 単純複合トラス橋である。狭隘な施工ヤードで、現道交通の確保や既存の自然景観の保全等も求められたため、施工性ならびに景観性の観点から吊床版架設工法が採用された。本工法は、吊床版橋の技術を活用し、橋台間に張り渡したケーブルを支保工として橋体を構築するものであり、桁下空間の条件に左右されず、かつ、狭い施工ヤードでの架設が可能な架設工法である。また、本橋が横過する宇治川の約 2km 下流は、世界遺産である平等院や宇治上神社などの文化財がある観光地域があり、景観との調和が求められた。本橋の景観コンセプトは「渓谷との調和、虹と清流」であり、渓谷の奥行き感を活かして地形の中にすっきりと納まった橋梁デザインとなっている。

本稿は、架設事例の少ない本工法の施工概要や構造概要、架設時に実施した実橋計測について報告する。

キーワード：複合トラス橋、吊床版架設工法、ユニット化、構造系変換

1. はじめに

白虹橋は、世界遺産の平等院から宇治川の上流へ約 2 km、京都府宇治市の天ヶ瀬ダムの麓に架橋される PC 単純複合トラス橋である。架設地点は、風光明媚な景観が残る渓谷であり、既存の自然景観の保全が求められた。さらに、現道交通を確保する必要から施工ヤードは狭隘なスペースとなり、施工性および景観性の観点から吊床版架設工法による PC 単純複合トラス橋が採用された。本橋は、平成 28 年 10 月に完成し、昨年 3 月より供用を開始している（写真 - 1）。



写真 - 1 白虹橋 完成写真

本橋の架設工法は、橋台間に張り渡したケーブルを支保工として床版と鋼斜材を架設するものであり、施工時には、橋台パラペットに仮定着したケーブルの張力と橋台堅壁に設けたグランドアンカーの張力をバランスさせて施工時の安定性を確保する。また、部材の架設後には、橋台パラペットに仮定着したケーブルを桁端部に盛替え定着を行い、他碇式の吊床版構造から自碇式の単純トラス構造

へ構造系を変換させる。本構造形式は、1990 年（平成 2 年）に開発された新しい構造形式の橋梁であり、これまで国内で同工法により建設された橋梁は数例である。

本橋は、支間長が 72.8 m であり、支間 90 m を超えるこれまでの実績と比較して小規模ではあるが、支間長に対してサグ量がきわめて小さいことや、プレキャスト部材をユニット化して架設する新しい施工方法を採用したことなどの特徴を有している。また、景観に配慮し「渓谷との調和、虹と清流」をコンセプトにしたデザインが特徴的な橋梁である。

本稿では、架設事例の少ない本工法の施工概要や格点部の構造、架設時に実施した実橋計測について報告する。

2. 橋梁概要

本橋の橋梁諸元を表 - 1、主要材料規格を表 - 2、橋梁一般図を図 - 1 に示す。

表 - 1 橋梁諸元

工事名	白虹橋上部工架設工事
工事場所	京都府宇治市宇治金井戸～志津川仙郷谷
上部工形式	PC 単純複合トラス橋
架設工法	吊床版架設工法
下部工形式	逆 T 式橋台
基礎形式	深礎杭基礎（φ 3 500）
道路規格	第 3 種第 4 級
活荷重	A 活荷重、群集荷重
縦断勾配	2.925 %、5.148 %
橋長	75.688 m
吊支間	73.388 m
支間長	72.888 m
幅員	9.230～22.801 m
基本サグ量	3.561 m
構造高さ	5.930 m（支間中央部）

*¹ Kentaro KAGOTANI：近畿地方整備局 琵琶湖河川事務所

*² Michio KAGEYAMA：(株) オリエンタルコンサルタンツ 関西支店 国土技術部

*³ Tatsuya OHNO：(株) ビーエス三菱 大阪支店 土木工事部

*⁴ Tomokazu GOTO：(株) ビーエス三菱 大阪支店 土木工務部

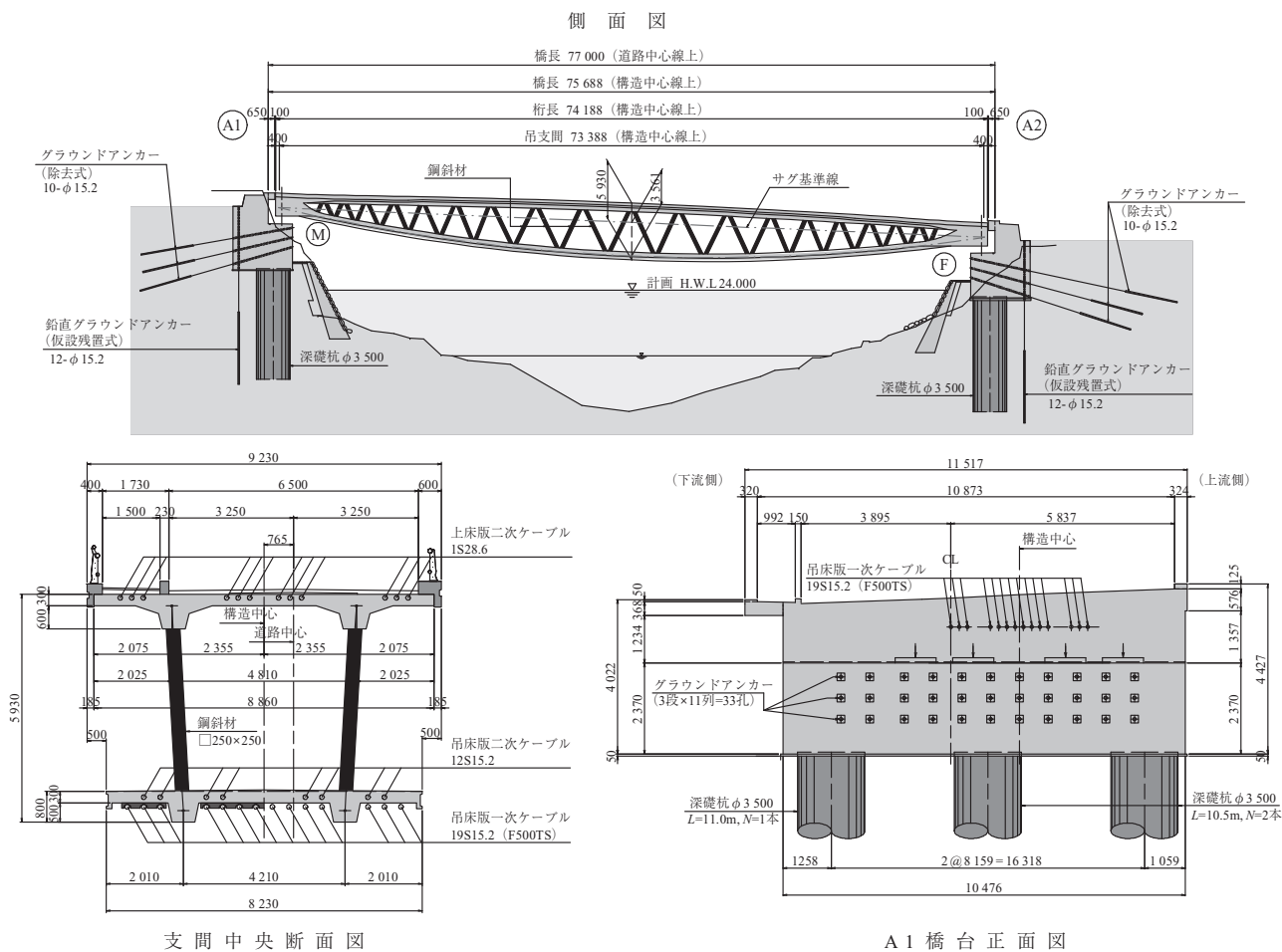


図 - 1 橋梁一般図

表 - 2 主要材料規格

コンクリート	上部工： $\sigma_{ck}=40 \text{ N/mm}^2$ ，下部工： $\sigma_{ck}=30 \text{ N/mm}^2$
鉄筋	SD345，SD490
鋼斜材	SM570W
1次ケーブル	19S15.2 (F500TS)
2次ケーブル	上床版：1S28.6，吊床版：12S15.2
床版横締め	1S28.6，12S12.7
グラウンドアンカー	10- ϕ 15.2 (除去式)，12- ϕ 15.2 (仮設残置式)

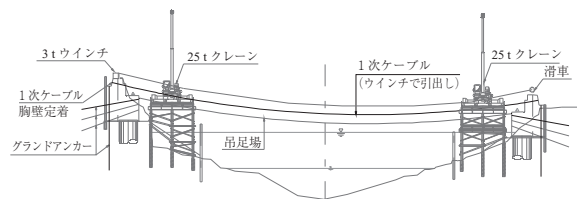
3. 施工概要

白虹橋の施工ステップを図 - 2，3に示す。

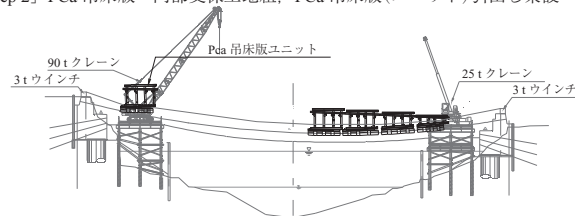
本橋は，1次ケーブル上に架設したプレキャスト吊床版部（以下，PCa吊床版）の上に内部支保工を設置し，鋼斜材およびプレキャスト上床版（以下，PCa上床版）を架設する吊床版架設工法を採用している（Step1～Step3）。

本工法は，施工の進捗に伴って1次ケーブルが受けもつ荷重が増加し，そのサグ量が漸次増大するが，従来工法では，1次ケーブル上にすべてのPCa吊床版を架設した上に内部支保工を組み立てるため，高度な形状管理と慎重な施工が要求された。そこで本橋では，位置決め精度の向上と作業安全性の確保を目的として，A1橋台前面の作業構台上に地組架台を設置し，地上と同等の作業状況で，橋体完成時の部材相互の位置関係に調整した複数枚（4～5枚）のPCa吊床版と内部支保工材をユニット化し，順次架設する施工方法を採用した。

〔Step 1〕グラウンドアンカー緊張，1次ケーブル架設



〔Step 2〕PCa吊床版・内部支保工地組，PCa吊床版(ユニット)引出し架設



〔Step 3〕グラウンドアンカー緊張，鋼斜材架設，PCa上床版架設

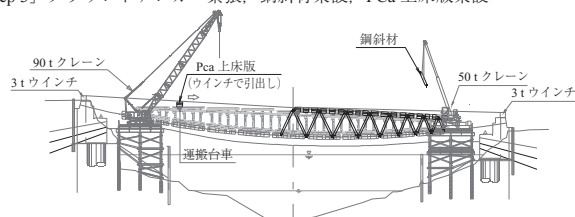
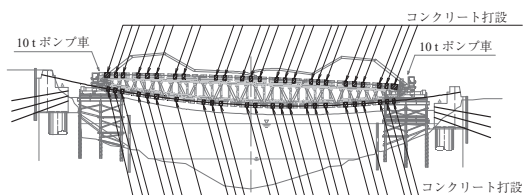
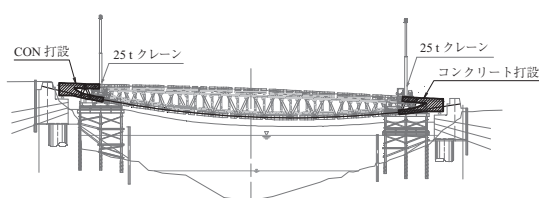


図 - 2 施工ステップ

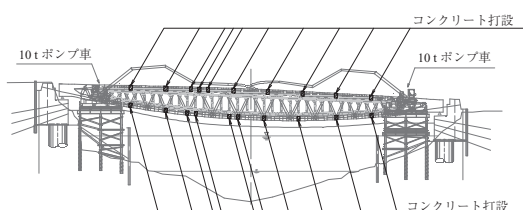
[Step 4] グラウンドアンカー緊張, ユニット内・吊床版間詰めコンクリート打設
ユニット内・上床版間詰めコンクリート打設, 1次ケーブルサグ調整



[Step 5] 端部ブロック, 1次ケーブルサグ調整



[Step 6] ユニット間・間詰めコンクリート打設



[Step 7] 上床版2次ケーブル緊張, 構造系変換, グラウンドアンカー撤去,
吊床版2次ケーブル緊張, 張出し床版, 橋面工

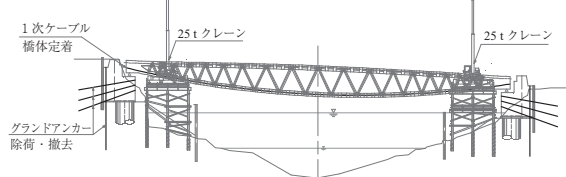


図 - 3 施工ステップ

3.1 1次ケーブルのサグ変化量

1次ケーブルは、ポリエチレン被覆されたPCケーブル(19S15.2)を使用した。1次ケーブルは、A1橋台上に電動ウィンチを2台、A2橋台上に滑車を設置して引出し架設を行っている。架設した1次ケーブルは、有限変位解析を用いた解体計算により施工中のサグ変化量を算出し、完成時のサグ量が3.561mとなるように両橋台のパラペット背面に緊張定着した。

各施工段階におけるサグ変化については、事前解析を実施して正確に把握し、部材架設位置の精度向上を図った。

解体計算による1次ケーブルのサグ変化量を表-3に示す。

表 - 3 1次ケーブルのサグ変化(計算値)

	施工ステップ	サグ量 (m)
Step 1	1次ケーブル架設完了時	1.354
Step 2	吊床版架設完了時	2.601
Step 3	鋼トラス斜材架設完了時(足場荷重含む)	2.681
	上床版架設完了時	3.177
Step 4	ユニット内・吊床版間詰めCon打設完了時	3.301
	ユニット内・上床版間詰めCon打設完了時	3.447
Step 6	ユニット間・間詰めCon打設完了時(完成時)	3.561

3.2 プレキャスト吊床版のユニット架設(Step2)

現場へ搬入された工場製作のPCa吊床版は、90t吊りクローラークレーンにより地組架台上へ複数枚(4～5枚)を取り込み、山留め内部支保工で完成時の相対位置に調整し、ユニット化を行った。PCa吊床版と内部支保工は、無収縮モルタルにて高さ調整し、高力ボルトで固定して一体化している(図-4)。

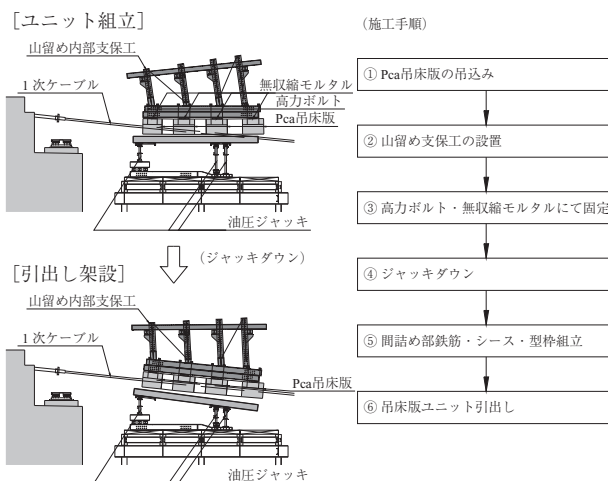


図 - 4 PCa吊床版のユニット架設

さらに、内部支保工は、完成時の橋体形状を保持できるように計画し、地組架台上でユニット単位の組立精度を管理することで、PCa吊床版ユニットの架設以降の鋼斜材およびPCa上床版の架設精度を向上させることができた。

また、ユニット化したPCa吊床版は、地組架台をジャッキダウンさせて1次ケーブルに自重を载荷したのちに、ユニット内のPCa吊床版の間詰め部の鉄筋・型枠の組立を行い、その後、ウィンチを使用してPCa吊床版ユニットの引出し架設を行った(写真-2)。架設前にこれらを組み立てることにより作業箇所を限定し、施工の省力化や架設精度および安全性の向上を図っている。



写真 - 2 PCa吊床版ユニットの引き出し架設

3.3 鋼斜材およびプレキャスト上床版の架設(Step3)

鋼斜材は、A1側構台上的90t吊りクローラークレーンとA2側構台上的50t吊りラフタークレーンを用いて直接架設した。架設した鋼斜材は、完成時の部材相互の位置関係となるように高さや間隔の調整を行い、専用バンド治具を使用して内部支保工に固定している(写真-3)。

次に PCa 上床版は、PCa 吊床版および鋼斜材の架設完了後、内部支保工上の引出し軌道および専用の架設台車を設置し、A1 側構台上の 90t 吊りクローラクレーンにより台車上へ吊り込んで固定したのち、3t 電動ウィンチにて A2 側に引出して架設を行った（写真 - 4）。所定の位置まで引き出した PCa 上床版は、吊床版との相対位置を確認し内部支保工上に固定している。

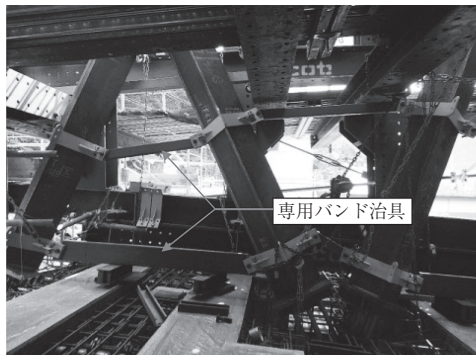


写真 - 3 鋼斜材の固定



写真 - 4 PCa 上床版の引出し架設

4. 格点構造

4.1 構造概要

PC 複合トラス橋における鋼斜材とコンクリート床版の格点部は、構造を成立させる上で重要な部位であるが、格点構造は標準化されていないのが現状である。このため、既往の実績橋における格点構造形式は、既に耐荷性能が確認された形式を採用するか、新たな形式の場合には格点部を模擬した実物大、あるいは縮小モデルによる載荷実験を実施して耐荷性能を確認したあとに採用を決定している。

本橋の格点構造は、既往の橋梁と類似しているが、景観設計の配慮により、① 支圧プレートの補強リブをコンクリート内に埋設する、② ビルトアップによる角形鋼管を使用する、といった点で相違箇所がある（図 - 5）。そこで、本橋の格点構造に着目した載荷実験を実施して、構造の安全性を確認した。

4.2 格点実験

格点実験は、格点部の耐荷性能を確認するとともに、ビルトアップによる角形鋼管を用いた鋼斜材の溶接施工性を確認するため、実物大の供試体を用いて実施した。

実験対象とする格点は、設計荷重時に最大軸力が発生す

る斜材を対象とし、格点コンクリートの部材寸法が小さい吊床版側をモデル化した（図 - 6）。載荷実験は、この供試体の鋼斜材下端をピンで支持し、既往の実験と同様に水平方向に加力する方法としている。

載荷ステップは、引張斜材の設計荷重時（1 285 kN）、圧縮斜材の設計荷重時（1 760 kN）、1.7×設計荷重時（2 920 kN）の 3 段階とし、載荷フレームを用いて片振り繰返し載荷を行った。なお、実験時には、斜材のひずみをモニタリングし、斜材の作用軸力を確認して載荷を行った。

図 - 7 は、載荷試験により得られた斜材軸力と水平変位の関係を示したグラフである。載荷初期は、各固定治具のなじみにより 3 mm 程度の変位が増加しているが、その後は圧縮斜材の設計荷重時まで直線的な変形挙動を示している。この段階において、格点部にひび割れや変状は認められず、コンクリート表面のひずみ測定値からも、設計荷重時の許容引張応力度以下であることが確認できた。

次に、設計荷重の 1.7 倍まで荷重を増加させると、変形挙動に非線形性が現れるようになり、斜材の支圧プレート周辺にひび割れが発生した。このひび割れは、格点部コンクリートへ斜材を定着させる PC 鋼棒が伸びたことにより、支圧プレート周辺のコンクリートが剥離したもので、格点の耐荷性能への影響は無いと考えられた（写真 - 5）。また、その他の部位には、ひび割れ等の損傷は認められず、格点内部に配置した補強鉄筋についても、100 N/mm² を超える引張応力度の発生は認められなかった。

以上より、今回採用した格点構造は設計上必要な耐荷性能を有していると判断した。また、実験結果より、定着 PC 鋼棒の伸びによる剥離ひび割れが認められたため、格点部の耐久性を向上させる目的で、定着 PC 鋼棒は、エポキシ樹脂塗装を施した異形 PC 鋼棒を採用することとした。

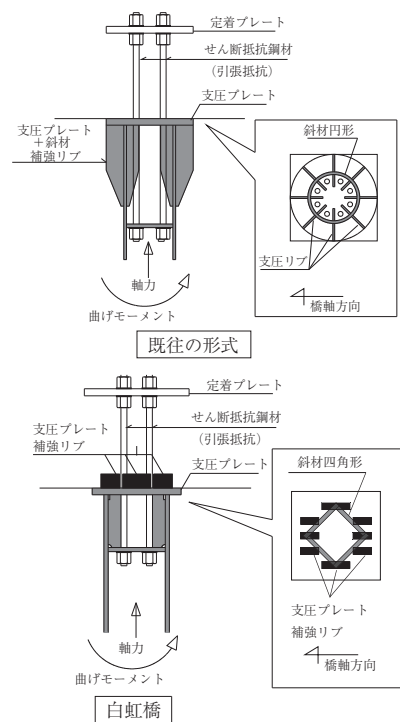


図 - 5 接合部詳細図

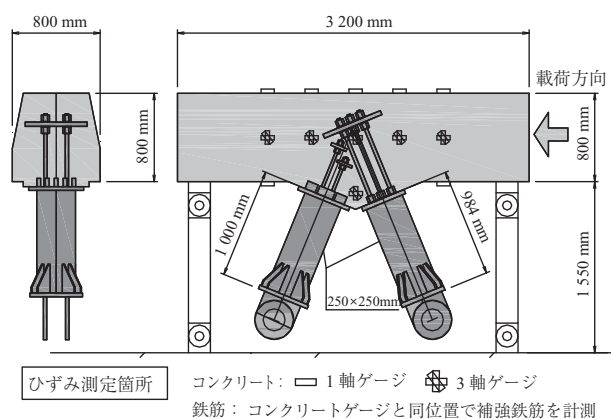


図-6 供試体概要図

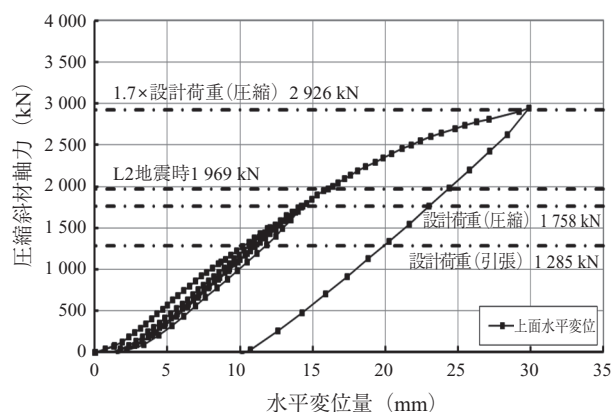


図-7 斜材軸力と水平変位の関係



写真-5 荷重試験後の供試体状況

5. 実橋計測

本橋は建設事例の少ない架設工法による施工であるため、架設時の安全性確保と架設精度の確認を目的として、実橋における応力計測を実施した。ここでは、1次ケーブルの張力と構造系変換時の部材ひずみについて計測結果を報告する。

5.1 1次ケーブルの張力管理

吊床版架設工法は、1次ケーブルを支保工として上部構造を構築するため、施工の進捗に伴って1次ケーブルの張力が変化する。そのため、施工時の安全性を確保するためには、各施工段階の1次ケーブルのサグ変化量を管理するとともに1次ケーブルの張力を確認することが重要となる。

そこで、磁歪現象を応用して鋼材応力を直接計測するこ

とができるEMセンサーを支間中央部に設置し、各施工段階での1次ケーブル張力の計測管理を行った。

張力管理において、架設時は、サグ量管理を主とした形状管理とし、張力測定値が許容値以下である事と、解体計算により求めた計画張力と対比することで、架設時の安全性を確保した。また、構造系変換時は、設計で定められたプレストレスを正確に上部工へ導入するため、EMセンサーの計測値とジャッキ圧力の両方で管理した。

図-8に1次ケーブル張力の計測結果を示す。各施工段階において、ケーブル張力は許容値以下であり、設計で想定した計算値ともおおむね一致している。

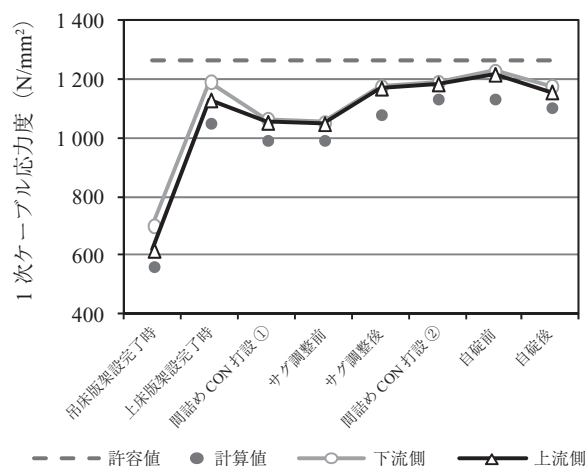


図-8 1次ケーブルの張力計測結果 (引張: 正)

5.2 構造系変換時のひずみ計測

本橋の架設における最大の特徴として、吊構造として床版と鋼斜材を支持していた1次ケーブルの張力を、単純トラス桁橋のプレストレスに利用する構造系の変換があげられる。この構造系変換は、橋台背面に定着していた1次ケーブルを解放して桁端部に盛替え定着する作業であるが、構造の成立性を左右する重要な工種であることから、実橋において応力計測を実施し施工品質の確認を実施した。

応力の確認は、図-9に示すように支間の1/2L、1/4L、1/8L点を計測箇所とし、埋込みひずみ計および表面ひずみ計により実施した。図-10に床版応力度と鋼斜材軸力の計測結果を示す。

上床版のコンクリート応力度は、支間部において設計値に比べ若干圧縮応力度が高くなっている。これは、1次ケーブルの張力が設計に比べて5%程度大きくなっていること、上床版と吊床版に導入されるプレストレスの比率が設計と若干相違したことが要因として考えられた。ただし、計測値は、許容圧縮応力度に対して十分に余裕があり、橋面荷重および活荷重により増加する応力度を考慮しても問題にならないことを確認している。

吊床版のコンクリート応力度は、橋梁端部の1/8L点において若干の差異が認められたが、設計値と概ね一致した。なお、1/8L点における設計値との相違は、橋梁端部の曲面による断面変化による影響と考えられる。また、鋼斜材の軸力は、圧縮側と引張側ともに設計値とおおむね同様な

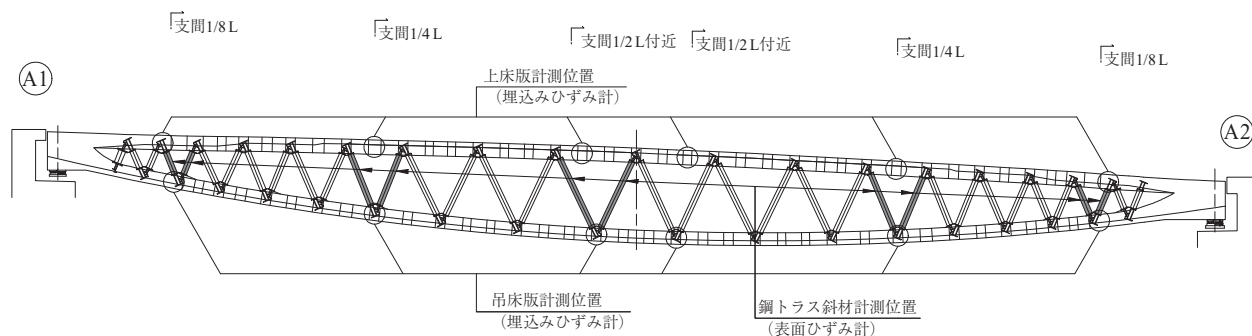


図-9 ひずみ計測位置

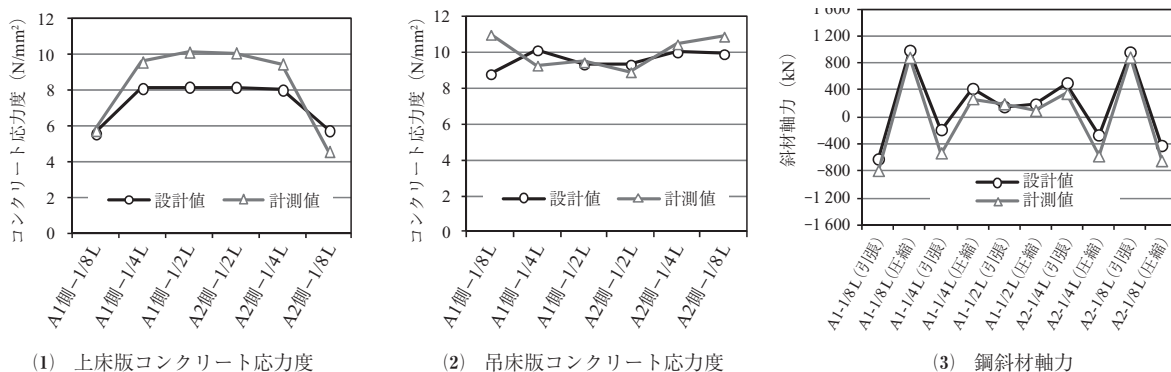


図-10 ひずみ計測結果（圧縮：正）

挙動を示している。

以上により構造系変換による各部材の挙動は、ほぼ設計での想定と一致したことが確認できた。

6. 景観設計

本橋は、「天ヶ瀬ダム再開発事業景観検討委員会」により細部まで景観性の検討がなされている。その結果、上部工の構造形式だけでなく、鋼斜材の配置についても、陰影によって細く見えるように角型鋼管の隅角側を橋軸方向に向けるなど、細部まで配慮がされている。

また、橋梁端部は、車道幅員の拡幅にともなって、橋体の形状変化が3次元曲面によりデザインされている。この

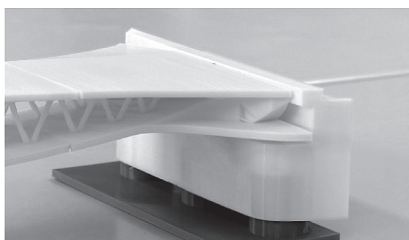


写真-6 3Dプリンタ模型



写真-7 橋梁端部の曲面形状

橋梁端部の施工に際しては、2次元のCAD図面のデータから3次元データを作成し、3Dプリンターを用いて模型を製作し、型枠や支保工の計画を行った（写真-6, 7）。

7. おわりに

本稿では、施工例の少ない吊床版架設工法によるPC単純複合トラス橋の架設方法や格点構造について紹介した。また、今回新しく試みた、PCa吊床版と内部支保工をユニット化して架設する施工方法は、施工の省力化や架設時の安全性向上に関して十分な成果があったものとする。

今後、白虹橋が自然豊かな宇治川の渓谷に溶け込み、ダム観光との相乗効果により地域の活性化につながることを期待している。

最後に、本形式の橋梁は施工実績が非常に少なく、施工にあたっては多方面からのご指導、ご協力をいただくとともに、実績橋梁の施工報告や検討成果を参考とさせていただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 籠谷, 白井, 笹, 藤山, 大野, 後藤: 白虹橋の施工, 橋梁と基礎, pp.7-12, 2017.3
- 2) 堀内, 出口, 善本, 越島: 白虹橋 格点部耐荷力確認実物大実験, 第24回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.707-710, 2015
- 3) 林, 杉谷, 平野, 西澤, 諸橋, 桑野: 大簾川橋の設計と施工, 橋梁と基礎, pp.5-11, 2011
- 4) 桑野, 林, 杉谷, 河野: 吊構造を利用した架設方法による複合トラス橋 大簾川橋の施工, 第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.589-592, 2011

【2017年10月23日受付】