

# フーバーダムバイパスプロジェクト コロラドリバー橋

## — 北米最長のコンクリートアーチ橋 —

高德 裕平\*1・加藤 敏明\*2・新倉 一郎\*3・隠塚 功一郎\*4

コロラドリバー橋は、2010年10月に開通した全長5.6kmのフーバーダムバイパスの一部であり、北米最長、世界第4位の支間を誇るコンクリートアーチ橋である。ダム周辺の自然環境保護区に指定される現場付近は、夏期の気温が連日40度を超え、湿度10%程度の砂漠性気候である。本稿では、このような過酷な施工条件のもと行った海外での長大コンクリートアーチ橋建設工事についての報告を行う。

キーワード：海外工事、コンクリートアーチ橋、ピロン工法、3次元解析、たわみ管理

### 1. はじめに

U.S.Highway 93 (US93) はアリゾナ州、ネバダ州とユタ州を通る商業上重要な交通ルートであり、北米自由貿易協定においてもメキシコ-カナダ間を結ぶ主要幹線道路と位置付けられている(図-1)。US93は、アリゾナ州とネバダ州の州境において、フーバーダムの堤体上を通過していたが、ダム観光客の道路横断や低い法定速度によって頻繁に発生する交通渋滞が問題となっていた(写真-1)。このダム周辺の交通事情を改善するため、ダム上を通過しない迂回道路を建設する全長5.6kmのフーバーダムバイパスプロジェクトが計画された。バイパスの建設は2002年から開始され、2010年10月には、全工事を完了、新しいフーバーダムバイパスが開通した。



写真-1 フーバーダム橋周辺



図-1 現場位置図

大林組・PSM-USA JVは、本プロジェクトのメイン工事となるコロラドリバー橋(正式名称: Mike O'Callaghan-PatTillman Memorial Bridge)を2005年1月から2010年8月にかけて建設した。本稿では、アーチ施工をはじめとし

た特徴的な施工について報告する。

### 2. プロジェクト概要

#### 2.1 プロジェクトの概要

コロラドリバー橋は、北米最長のアーチ支間323mを有するコンクリートアーチ橋で、フーバーダムの下流わずか460mの地点に位置する。フーバーダムは1936年に完成、アメリカ国定歴史建造物(U.S.National Historic Landmark)に指定される米国を代表する土木構造物であり、その貯水量400億tは、日本のダムすべての貯水量を合せても及ばない。また、このダムは、1年間に100万人以上の人々が訪れる観光名所でもある。本工事の工事概要を表-1に、完成した本橋とフーバーダムを写真-2に示す。施工場所周辺の気候は砂漠性気候であり、夏期は連日摂氏40度を超える猛暑が続くうえ、湿度は10%程度と乾燥も激しく、非常に厳しい施工環境であった。

\*1 Yuhei Takatoku : (株)大林組 海外支店 北米統括事務所サンフランシスコ事務所

\*2 Ichiro Niikura : (株)大林組 東京本社 土木本部生産技術本部 橋梁技術部

\*3 Toshiaki Kato : (株)大林組 東京本社 土木本部生産技術本部 橋梁技術部

\*4 Koichiro Onzuka : (株)ピーエス三菱 九州支店

○ 工事報告 ○

表 - 1 工事概要

橋名	Colorado River Bridge 正式名称：Mike O'Callaghan-Pat Tillman Memorial Bridge
所在	アメリカ合衆国 ネバダ州 / アリゾナ州
橋長	578 m
支間長	323 m (アーチ支間)
構造形式	上路固定式アーチ橋
荷重	AASHTO HL-93 Standard Loading
事業主	Federal Highway Administration
設計	HDR Engineering/T.Y.LIN International/Sverdrup Civil, Inc
施工	(株)大林組・PSM Construction USA, Inc JV



写真 - 2 本橋とフーバーダム

2.2 橋梁概要

本工事の施工区間は、支間 323 m のアーチ部を含む、全長 578 m の橋梁部であり、中央のアーチ部とネバダ州側 5 径間、アリゾナ州側 2 径間のアプローチ部にて構成される。図 - 2 に構造一般図を示す。

アーチ部は、2本の鉄筋コンクリート製アーチリブが並列するツインリブ構造の上路式固定アーチで、スパン 323 m、アーチライズ 84 m、アーチ角度 48 ~ 1.5 度となっている。2本のアーチリブは、アーチ施工中に鋼製ストラットにて連結される。橋脚は、高さ 4 ~ 87 m のプレキャストセグメント製であり、基礎は直接基礎である。上部工は鋼とコンクリートの複合構造であり、場所打ちコンクリートの柱頭部、柱頭部間に配置する鋼製ガーダーおよび

場所打ちコンクリート床版にて構成される。幅員は 26.8 m で、上下各 2 車線、計 4 車線の車道、橋面ダム側には幅 2 m の歩道が整備される。コロラド川水面から橋面までは約 270 m の高低差があり、供用後は橋梁上からフーバーダムの眺望を見下ろすことができる。

2.3 施工手順と使用機械

本工事の施工手順は、次のとおりである。

① 発破による岩掘削、② 基礎およびアプローチ部の橋脚、上部工施工、③ アプローチ部床版上に仮設ピロン柱を設置、アーチ部の張出し施工、④ アーチ施工完了後、仮設ピロン柱と斜材ケーブル撤去、⑤ アーチ上の橋脚と上部工施工。

本工事では、周辺の地形を考慮し、荷役運搬用機械としてケーブルクレーンを採用した(写真 - 3)。本橋で使用したケーブルクレーンは、独立 1 本柱形式であり、タワー基部がピン構造となっている。このタワーをアリゾナ州側とネバダ州側にそれぞれ 2 本ずつ、計 4 本配置し、2 ラインのケーブルクレーンを配置した。タワー間距離は 760 m、タワー高さ 101 m、最大吊り荷重は 45 t である。横方向の吊り荷の移動は、ラフティングというタワーを横方向に傾ける動きにて対応した。断崖絶壁に囲まれた当現場では、このケーブルクレーンは、資機材の運搬だけでなく、作業員の現場へのアクセスにも使用する工事の生命線となる重



写真 - 3 ケーブルクレーン使用状況

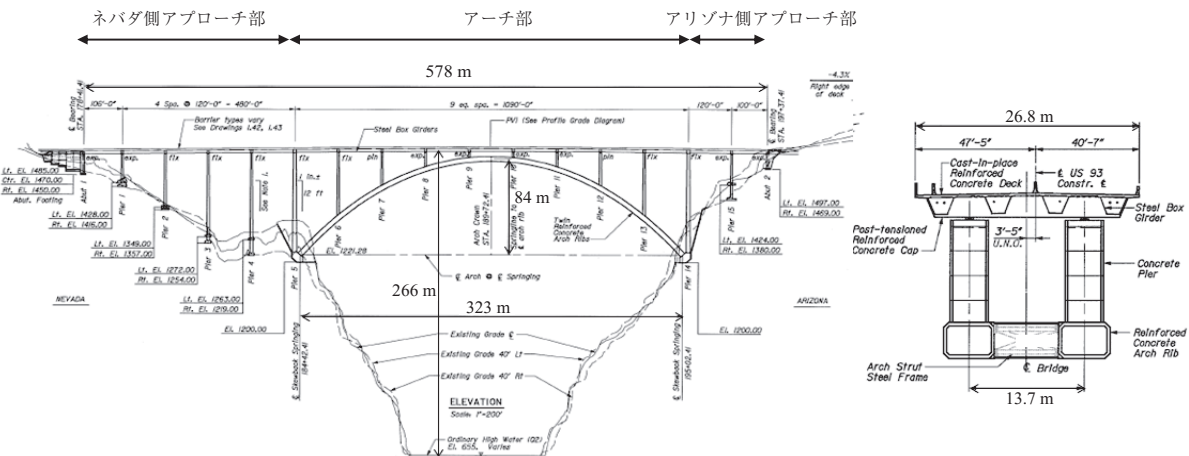


図 - 2 構造一般図

要な機械設備であった。

### 3. アーチ部の施工について

次に工事の詳細について、アーチ部およびアーチ上で行ったプレキャスト橋脚の架設と上部工施工について述べる。

#### 3.1 アーチリブの施工

アーチ部の施工には、斜材ケーブルと床版上に設置した仮設ピロン柱を用いた張出し架設、いわゆるピロン工法を採用した。1つのアーチリブは26個の場所打ちセグメントにて構成され、ネバダ州側・アリゾナ州側の各アーチアバットから張出し架設を行い、左右に並列する2連のアーチリブを構築する。セグメントの形状は中空箱桁で、1セグメントあたり標準長さ7.9m、高さ4.2m、幅6.0mである。2連の並列するアーチリブを、施工中に全8箇所の鋼製ストラットにて連結した(写真-4)。



写真 - 4 アーチ架設状況

張出し架設で用いた移動作業台車は、中国にて製作後、現地に搬入した。上部開放型の下支え式構造の作業台車を採用した理由は、鉄筋かごの一括架設を実現するためである。最大48度あるアーチ上での鉄筋組立て作業は、作業効率が悪いうえ、安全面でも懸念事項であった。そこで、アーチ上での現地組に替えて、ケーブルクレーンを用いた鉄筋かごの一括架設を採用した(写真-5)。このほか、上面型枠を1枚のパネル方式としてケーブルクレーンを用いた一括架設とし、型枠組立てにおいても作業の効率化を図った。これらの工夫を行った結果、施工計画時は8日と想定していた1セグメント製作に要するサイクル日数を、最短6日に短縮することができた。

アーチ部のコンクリートは、設計基準強度70N/mm<sup>2</sup>と高強度である。このコンクリートは、JV直営のバッチプラントにて練混ぜを行った。特記仕様書の規定により、アーチコンクリートは打設後の温度を68℃以下に保たなければならない。夏場の気温が40℃を超えることから、コンクリートの温度管理には入念な計画が必要であった。そこで、温度対策として、コンクリート打設はすべて夜間作業とし、骨材のプレクーリング、冷水による練混ぜを行い、さらに、練混ぜ直後に液化窒素を注入し、コンクリートの



写真 - 5 鉄筋かご設置状況

冷却を行った(写真-6)。また、コンクリート打設後、温度センサーを用いて硬化中のコンクリート温度をモニタリングした。



写真 - 6 液化窒素によるコンクリートの冷却

#### 3.2 ピロン工法

次に、本橋でのピロン工法について説明する。仮設ピロン柱はネバダ州側、アリゾナ州側それぞれのアプローチ床版端部に配置した。ピロン柱はプレキャストセグメント製で、高さは50mである。ピロン柱基部は、仮設構造物であるピロン柱自体の簡素化を図るため、ピン構造として計画された。よって、施工中はアーチ荷重にあわせてピロン柱が前方に大きく傾く構造であった。アーチ施工中のピロン柱頂部の変位は600mm以下となるよう制限した。

斜材ケーブルは径15.2mmのPC鋼より線を19本あるいは22本束ねた構造であり、温度変化の影響を軽減するため、鋼より線を白色HDPE(高密度ポリエチレン)管にて保護した。斜材ケーブルの緊張管理では、自動計測器を用いて仮設ピロン柱とアーチの変位を計測した。本橋の斜材ケーブルは仮設材であることから、緊張管理上許される範囲内で張力を調整し、実測にあわせて、アーチ形状と仮設ピロン変位の補正にも用いた。なお、斜材ケーブルの許容応力は鋼材引張強度の56%以下と設定した。

## ○ 工事報告 ○

### 3.3 3次元解析とアーチ形状管理

適切な施工管理を行うために、アーチ施工の各段階を忠実に再現した3次元解析を採用した。図-3に解析モデルを示す。解析を3次元とした理由は、2連の並列するアーチリブが施工途中で鋼ストラットにより連結されることから、左右のアーチリブ間の相互に及ぼす影響を考慮するためである。この3次元解析により、アーチリブに発生する断面力、斜材ケーブルの応力、および形状管理に用いるアーチや仮設ピロンの変位量を算出した。解析では、アーチ施工中だけでなく、アーチ上に施工する橋脚や上部工を施工するステップも取り込み、全1800の施工ステップを考慮した。架設中はアーチリブのひび割れ発生を許容し、ひび割れ幅は、ACI (American Concrete Institute) で定義される乾燥地域 (Dry air or protective membrane) での規準値 0.4 mm を制限値とした。

ただし、実施工でのひび割れ幅は、最大でも 0.25 mm 程度と制限値以下であった。

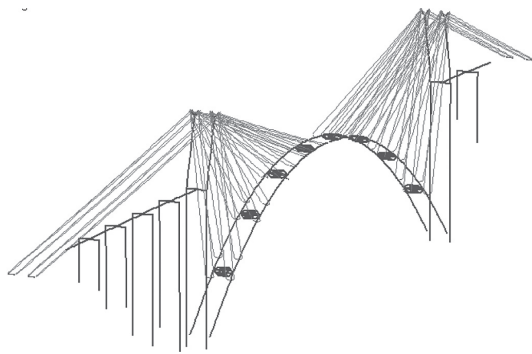


図 - 3 3次元解析モデル

160 m を超えるピロン併用張出し施工、あわせて外気温 40 度を超える環境下でのアーチ形状管理 (たわみ管理) は本プロジェクトの大きな技術的課題であった。

特記仕様書で定められた形状管理の規格値を下記に示す。

#### ① アーチ閉合部

・閉合位置における最終高さが、0 ~ + 150 mm 以内 (JV ではこれを達成するため、目標値を + 100 mm とした。)

#### ② アーチ架設時 (図 - 4)

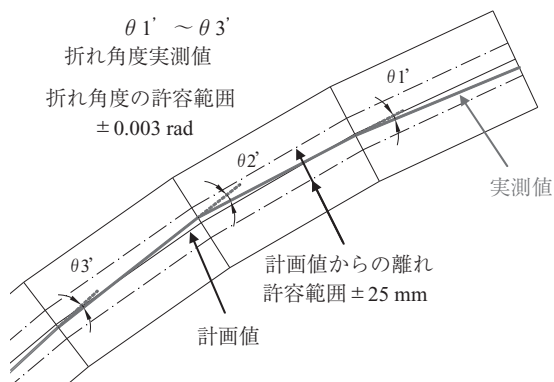


図 - 4 アーチ架設時の管理項目

- ・各セグメントでの計画高さとの誤差が  $\pm 25 \text{ mm}$  以下
- ・各セグメント間の折れ角度誤差が、0.003 ラジアン以下

アーチ部の測量は、トータルステーションにて行った。非常に急峻な現場地形のため、測量機械を設置できる場所は限定されていたが、丘陵上に設置した数箇所のポイントとあわせて、アプローチ橋脚上に設置した測量架台にて対応した。これらの各座標は GPS を用いて設定した。

温度の影響を最小限とするため、基本的な測量は日の出から 1 時間以内に行った。また、アーチの挙動を把握するため、自動計測システムにより常時計測を行った。

基本的な測量は日の出から 1 時間以内に行うが、型枠設置は現場の状況に応じて、早朝以外でもその都度行わなければならない。そこで、温度の影響を排除するため、型枠設置は、セグメント間の折れ角度を元にセットすることとした。具体的には、型枠設置を行う直前に既設部 2 セグメントの打継部高さを測量し、そのデータを元に設計で示された折れ角度を用いて、次セグメントの型枠設置高さを決定した (図 - 5)。ただし、コンクリート打設前には必ず早朝の測量を行い、最終的な型枠設置高さに問題がないことを確認した。

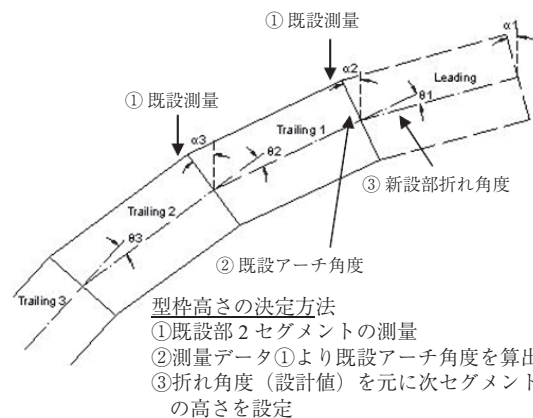


図 - 5 型枠高さの設定

### 3.4 温度の影響

アーチ挙動に対する温度の影響を検討するため、挙動の自動計測とあわせて、サーモセンサーにて温度データの収集を行った。温度計測は、外気温、コンクリート温度、斜材ケーブル温度と 3 種類のデータを収集した。

図 - 6 は、アーチセグメントの張出しが最終に差し掛かった 25 番目のセグメント施工中 (全 26 セグメント) のデータである。当該日は休日のため、現場は稼働しておらず、得られたデータは純粋に温度の影響のみを反映している。外気温は、朝 30℃、最高温度は夕方 4 時ごろの 45℃であった。日中の温度変化によるアーチ挙動は、鉛直方向下向き 75 mm、橋軸方向 30 mm、直角方向 15 mm であった。モニタリングの結果、日射の方向により直角方向にも変位があることがわかり、型枠セット時には時間にあわせて補正を行うこととした。また、このデータを用いて、閉合部固定工の設計条件を検討した。

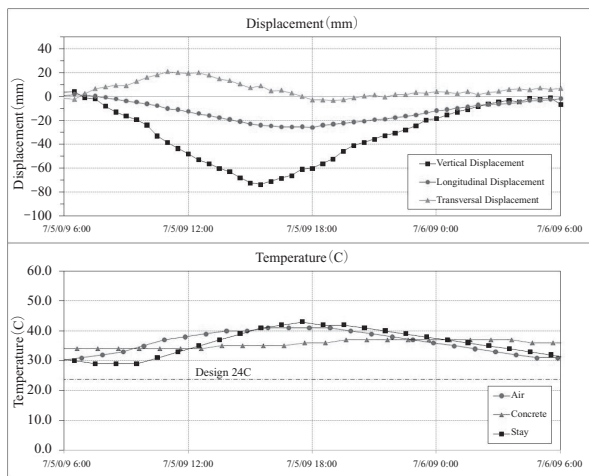


図 - 6 アーチ挙動と温度の推移

### 3.5 斜材ケーブル張力の調整

斜材ケーブルの緊張作業状況を写真 - 7 に示す。斜材ケーブルについては、主目的であるアーチリブモーメントの改善とともに、形状補正でも活用することを考え、施工計画検討段階からできるかぎり応力に余裕をもたせておくよう配慮した。施工段階では、斜材ケーブルの緊張に先駆け、斜材ケーブルごとに3次元解析による検討を行い、アーチリブのモーメント、各ケーブルの余裕量と形状補正可能量の算出を行った。このデータをもとに、現場での実測にあわせて、各ケーブルの張力を調整し、アーチ形状の補正を行った。とくに、鋼製ストラットが配置されるセグメントでは、非常に厳密な管理精度が求められた。重量 60 t の鋼製ストラットは、片側のアーチリブで1箇所あたり 12 本、合計 48 本の PC 鋼棒にて緊張固定されることから、左右のはストラット設置前には同じ高さとする必要があり、アーチリブ高さの調整には細心の注意を払った。このようなアーチリブの高さ調整にはフォアステイを使用した。



写真 - 7 斜材ケーブル緊張作業

バックステイ緊張時は仮設ピロン柱の変位に着目しながら緊張力の調整を行った。とくにネバダ州側では、レイアウト上、ケーブル長が 230 m と長く、角度も水平に近い

め、設計緊張力はアリゾナ州側と比べて小さく、ケーブルサグも大きかった。実施工ではネバダ州側ピロン柱は計画値より前方へ傾く傾向にあったため、斜材ケーブル応力の許容値内で、増し引きを行い、ピロン変位を計画値に近づける調整を行った。

全体的に、アーチリブやピロン柱の挙動は3次元解析で算出した結果と大きなずれはなく、プロジェクトを通して解析上の大きな見直しを行うに至らなかった。

### 3.6 閉合部の施工

閉合部施工には吊支保工を採用し、仮固定工として、上面のビーム (H500 × 2 本) とともに、上下床版とウェブにストラットを、下床版上面に PC 鋼棒を配置した (写真 - 8)。これらの部材の設計条件は前述したモニタリングデータより設定した。仮固定後の自動計測により、張出し架設時の挙動から連結されたアーチの挙動に変わったことを確認し、仮固定が適切に行われたものと判断した。

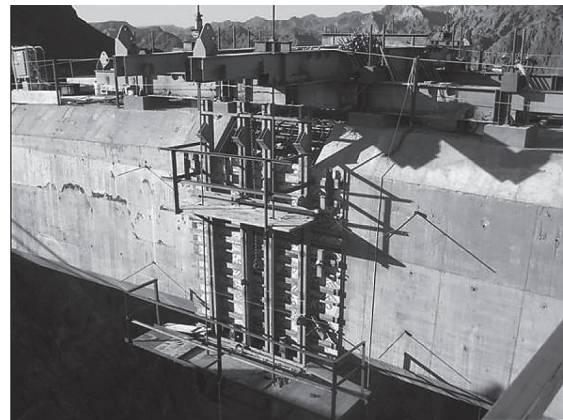


写真 - 8 閉合型枠支保工

### 3.7 斜材ケーブル、仮設ピロン柱撤去

アーチ閉合後、直ちに斜材ケーブルの撤去を開始した。斜材ケーブルと仮設ピロン柱の撤去手順を以下に示す。

- ① バックステイ緊張力開放：ピロン基部がピン構造であることを利用し、バックステイ張力を一部開放、ピロンを前方へ倒すことで、フォアステイの張力も同時に開放した。ピロン頂部の変位は最大 750 mm まで許容した。
- ② 斜材ケーブル撤去：バックステイの張力開放後、ストランドを切断・撤去した。HDPE 保護管を切断に先駆けて撤去し、ストランドを1本ずつ切断した。この際、仮設ピロン柱保持のため、フォアステイ、バックステイとも各1段ずつケーブルを残置した。また、ピロンの安定性確保のため、バックステイ側にはガイケーブルを追加した。
- ③ 仮設ピロン調整：残置したフォアステイ、バックステイを用いて、仮設ピロンの立ちを鉛直に戻した。
- ④ 仮設ピロン固定とケーブル撤去：ピロン基部をジャッキと PC 鋼棒にて仮固定し、全ケーブルを撤去した。
- ⑤ ピロンセグメント撤去：仮設ピロンセグメントをクレーンにて撤去した。

## ○ 工事報告 ○

このような手順で斜材ケーブルと仮設ピロン柱撤去を行ったが、作業開始前後および作業中も自動計測システムを用いてリアルタイムにピロン柱の位置確認を行った。

### 4. アーチ上での施工について

#### 4.1 プレキャスト製橋脚柱

橋脚は、プレキャストセグメント製であり、コンクリートの設計基準強度は  $40 \text{ N/mm}^2$  である。セグメント寸法は、標準高さ  $3 \text{ m}$ 、横幅  $4.6 \text{ m}$ 、縦幅  $1.5 \text{ m} \sim 3.6 \text{ m}$ 、重量は最大  $40 \text{ t}$  である。プレキャストヤード（敷地面積  $4 \text{ 万 m}^2$ ）は、現場から  $20 \text{ km}$  の距離に位置し、ヤード内に3つのセグメント製作ラインと養生ヤード、仮置きヤードを併設した。このヤードで橋脚用全  $440$  個と仮設ピロン柱用  $68$  個のセグメント製作を行った。最盛期には1日につき1ライン1セグメント、合計3セグメントの製作を行った。現場でのプレキャストセグメント架設は、ケーブルクレーンにて行い（写真 - 9）、個々のセグメントは、各接合面にエポキシ樹脂を塗布し、PC 鋼棒にて連結・緊張固定した。



写真 - 9 橋脚プレキャストセグメント架設状況

アーチ上に架設するプレキャストセグメントの形状管理は、アーチ施工と同様に、3次元解析にて算出したデータを元に管理を行った。アーチ上での架設では、鉛直方向のたわみだけでなく、橋軸方向への変位にも注意が必要であった。特記仕様書によるプレキャストセグメント架設時の許容値は、①天端での設計値との誤差が、橋脚高さ  $H/1200$  以内、かつ、②セグメントの折れ角度  $0.003$  ラジアン以下、である。施工管理に用いたグラフを図 - 7 に示す。架設時には、既設のセグメントにプリズムを設置し、トータルステーションにて、その挙動を確認した。プレキャストセグメントのため、基本的にはヤードで製作管理したとおりの直線となったが、場合によっては鋼製シムを使用し、形状を補正する必要が生じた。鋼製シムは、 $1.5 \text{ mm}$  と  $3.0 \text{ mm}$  のメッシュ製で、最大  $6 \text{ mm}$  までの使用とした。

#### 4.2 上部工施工

上部工は、鋼とコンクリートの複合構造である。U型の鋼製ガーダーを橋脚間に配置する構造であり、橋軸直角方向には4連の桁が配置される。ケーブルクレーンで所定の

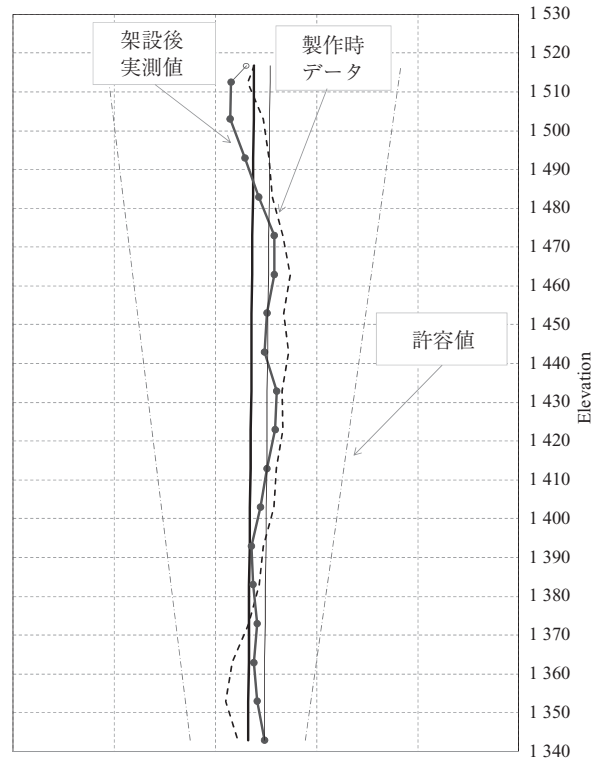


図 - 7 橋脚セグメント架設管理図

位置に架設後、1ガーダーあたり16本のPC鋼棒にて柱頭部に連結した。ガーダー重量は最大  $45 \text{ t}$ 、長さは約  $35 \text{ m}$  である。写真 - 10 にケーブルクレーンによるガーダー架設状況を示す。床版は厚さ  $240 \text{ mm}$  の場所打ちコンクリート（設計基準強度  $30 \text{ N/mm}^2$ ）で、初期収縮ひび割れ防止のため、ポリプロピレン繊維を混入した。現場は、砂漠性気候の乾燥地帯であるため、式1にて定義されるコンクリート打設時の水分蒸発速度を  $0.49 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  以下と制限する必要があった。たとえば、風速  $10 \text{ km/h}$ 、相対湿度  $10\%$ 、気温  $25^\circ\text{C}$  の場合（床版の施工時期は夏期ではなく4～5月）、コンクリート温度を  $17^\circ\text{C}$  以下とする必要がある。そこで、コンクリート打設箇所にドライミストを設置し、相対湿度を高めることで、制限を満足させる対策をとった。また、本橋では、床版コンクリート天端が車両走行



写真 - 10 上部工鋼製ガーダー架設状況

$$EVAP = \frac{1 + 0.2374 WV}{2906} * \left[ CT^2 - 4.762 CT + 220.8 - RH * \left( \frac{AT^3 + 127.8 AT^2 + 665.6 AT + 34283}{20415} \right) \right]$$

WV: 風速 (km/h)  
 RH: 相対湿度 (%)  
 AT: 気温 (°C)  
 CT: コンクリート温度 (°C)

### 式 1 水分蒸発速度計算式

面となるため、橋面の平坦性の確保が重要であった。そこで、打設時には床版仕上げ機械による表面仕上げを行い(写真 - 11)、床版施工完了後、Profilograph と呼ばれる平坦性試験を実施し、基準に適合していることを確認した(写真 - 12)。



写真 - 11 床版コンクリート打設状況



写真 - 12 床版コンクリート平坦性試験

## 5. おわりに

2010年8月コロラドリバー橋が完成、同年10月には、フーバーダムバイパスが開通した。コロラド川の水面から270m上空の橋面には、ダム側に歩道が整備されており、フーバーダムの雄姿を間近に眺めることができる。橋上には終日多くの人々が訪れており、本橋はすでに新しい観光名所となっている。

最後に困難をきわめた本プロジェクトを遂行するにあたり、多大なご支援、ご指導をいただいた Federal Highway Administration (連邦高速道路局) および関係各位に厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) Dave Zanetell et al: Construction of the Hoover Dam Bypass Colorado River Bridge, 19th Annual ASBI Convention, 2007.11
- 2) Yuhei Takatoku: CONSTRUCTION OF THE HOOVER DAM BYPASS ARCH BRIDGE, 3rd fib International Congress, 2010.05
- 3) 小野崎寛和他: フーバーダムバイパスコロラドリバー橋の施工、橋梁と基礎, 2010.03
- 4) 新倉一郎他: アメリカ・コロラドリバー橋におけるコンクリートの品質確保, セメントコンクリート, 2011.01

【2011年2月17日受付】