

# コロラドリバー橋と施工設備

定松 道也

コロラドリバー橋は、米国を代表する土木構造物フーバーダム目の眼前に建設されたコンクリートアーチ道路橋である。ユニークな構造形式と厳しい自然環境への対応から、施工には様々な技術が求められた。重機が寄り付けない施工場所への資機材運搬手段、生コンの材料と施工の品質確保、アーチのサイクルタイム短縮は現場管理の上で最重要課題であり、その解決には適切な施工設備の採用が必須であった。

キーワード：フーバーダム、コンクリートアーチ橋、ピロン工法、3次元解析、ケーブルクレーン

## 1. はじめに

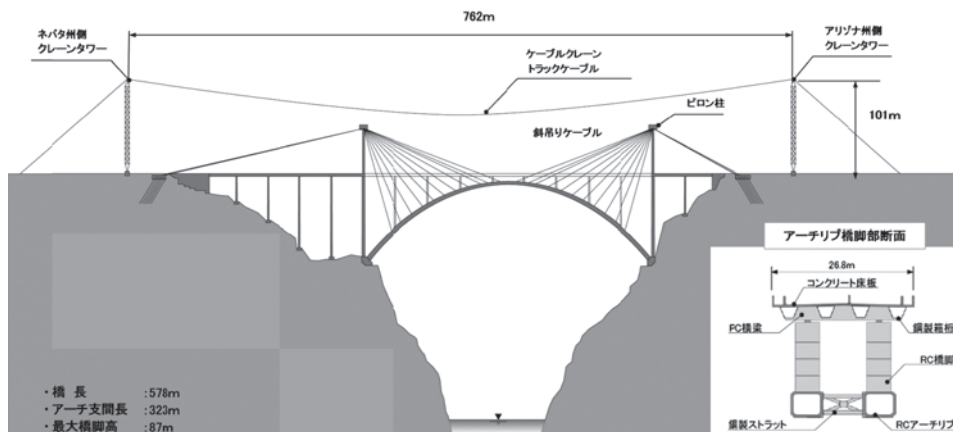
主要幹線道路である US93 号線はネバダとアリゾナの州境を流れるコロラド河を横断するに当たり、フーバーダムの堤体上を通過していた。この交通ボトルネックに発生する渋滞の解消とダムのセキュリティ向上を目的とし、ダム上を通過しない迂回道路を建設するフーバーダムバイパスプロジェクトが実施された。このプロジェクトのハイライトがフーバーダム下流わずか数百メートルの地点にてコロラド河を跨ぐコロラドリバー橋（正式名称：Mike O'Callaghan-Pat Tillman Memorial Bridge）の建設である（写真—1）。

本稿で報告する施工区間は、全長 578 m の橋梁であり、支間 323 m のアーチ部とその両側に接続するネバダ州側 5 径間、アリゾナ州側 2 径間のアプローチ部によって構成される。アーチ支間 323 m は北米最長で、ピロン工法を採用したアーチ橋としては世界最長である。

並列したアーチリブを鋼製ストラットにて結合する構造は一本のアーチリブと比較して、挙動が複雑になり、3次元解析を駆使した管理が求められた。断崖絶壁と深い渓谷、夏季の高温／乾燥、強風地域といった厳しい自然条件は施工をさらに困難なものにした（図—1）。



写真—1 フーバーダムと施工中の本橋



図—1 本橋梁とケーブルクレーン

## 2. アプローチ部施工

### (1) 基礎工

本工事施工区域の岩質は、その大半が凝灰岩（Tuff of Hoover Dam）であり、基礎構築に必要な総量 52,000 m<sup>3</sup> の掘削は主に発破にて行った。掘削に先駆け、コロラド河への落石防止のため、防護工（ネット等）を行うとともに、落石量のモニタリングを行った。

橋脚／アーチリブの基部となるアーチアバットは幅 24 m × 高さ 8.5 m × 奥行き 9.1 m のマッシブな躯体である。その内部には構造鉄筋に加え、橋脚セグメント緊結用 PC 鋼棒を高い精度で設置し、タイバックアンカーや U-テンドン用のケーブルダクト、マスコン対策クーリングパイプやコンクリート打設作業ステージも配置され、相互干渉の回避が必要であった。アリゾナ州側アーチアバットのコンクリート打設では地上にセットされた圧送ポンプから約 100 m の鉛直配管となり、バンド管やシャッターゲートを適所に配置し、圧送管内でのコンクリート閉塞を防いだ。橋脚基礎であるフーチングは直接基礎で、一部はケーブルクレーンが設置されるまでの期間、タワークレーンの基礎としても使用された（写真—2）。



写真—2 アリゾナ側アプローチ掘削

### (2) 橋脚

本橋の橋脚は、標準高さ 3 m × 横幅 4.6 m × 縦幅 1.5 m ~ 3.6 m、最大 40 トンのプレキャストセグメント（ $\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ ）が現場架設された。最も高い橋脚は 87 m である。

セグメントの製作にはショートラインマッチキャスト工法を採用した。プレキャストヤードは、現場から 20 km に位置し、製作ラインと養生エリア、仮置きエリアから成る 40,000 m<sup>2</sup> の敷地で橋脚用セグメント 440 個とピロン柱用セグメント 68 個が製作された（写真—3）。

ケーブルクレーンを使用してプレキャストセグメン



写真—3 プレキャストヤード全景



写真—4 橋脚セグメント架設

トは架設された。個々のセグメントは、接合面にエポキシ樹脂を塗布し、PC 鋼棒にて連結・緊張固定された（写真—4）。

### (3) 上部工

橋脚柱頭部へのアクセスに制約があるため、施工足場や型枠などは地上で地組みしてからケーブルクレーンによる一括架設とした。バケットによるコンクリート（ $\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ ）打設後、PC 鋼材（19s15.2、全 6 本）にて横締め緊張を行った。

鋼製ガーダーは柱頭部間に 4 連の桁が挟まれる構造



写真—5 鋼製桁運搬架設

である。重量45トン、長さ35mの鋼製ガーダーをケーブルクレーンで所定の位置に架設／仮固定後、PC鋼棒にて柱頭部コンクリートを介して隣接スパンのガーダーと緊結した（写真—5）。

床版はポリプロピレン繊維を混入したコンクリート（ $\sigma_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$ ）による舗装のため、仕上げ面に高い精度が求められた（写真—6）。幅員は26.8mで、上下各2車線、計4車線の車道、橋面ダム側には幅2mの歩道が整備されており、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。



写真—6 床版作業全景

### 3. アーチリブ施工

#### (1) アーチ部概要

- ・スパン323m、アーチライズ84mのアーチリブが2本並列するツインリブ構造の上路式固定アーチで、8か所で鋼製ストラットにて相互連結される。
- ・アーチリブは52の標準セグメントと閉合セグメントの合計53セグメントから構成される。セグメント形状は中空箱形で、長さ（最大）7.9m×高さ4.2m×幅6.0mで、第1セグメントは48度の傾斜がある。
- ・両岸のアーチアバットから4台の移動式型枠（フォームトラベラー）により同時張り出し施工を行った。1フォームトラベラー当たり26セグメントを施工した。
- ・斜吊りケーブルは第6セグメントから使用された。第5セグメントまではアーチアバットを反力に取り、U-テンドンを使用したカンチレバー張り出し施工とした。

#### (2) ピロン工法

ピロン工法とは、アーチアバット上部に仮設のピロン柱を設置し、その頭部から斜吊りケーブルによってアーチを吊りながら、順次張り出し施工していくものである。本橋の斜吊りケーブルは、アーチ側に配置す

る11段のフォアステイト、アプローチ側のアンカーに接続する7段のバックステイトから構成された。ケーブルは温度変化による影響を軽減するため白色の高密度ポリエチレン管で保護された。ピロン柱の基部はピン結合となっており、アーチ架設中の施工荷重の変化により前後に傾斜する構造となっている（写真—7）。



写真—7 ピロン柱と斜吊りケーブル

#### (3) 3次元逐次解析

アーチリブの張り出しは施工を追う毎に構造系や荷重条件が逐次変化する。また、並列するアーチリブを結合する鋼製ストラットを介して相互に影響を及ぼしあうため、アーチリブは3次元的な挙動を示す。約1,800の施工ステップを正確に反映した3次元解析を実施し、アーチリブに発生するモーメントやケーブルの応力及びアーチリブやピロン柱の変位を算出し、応力管理や形状管理に活用した。

### 4. 施工設備

適切な工事機械／設備の採用が、プロジェクト成功の鍵を握っていた。3つの事例を、ここに紹介する。

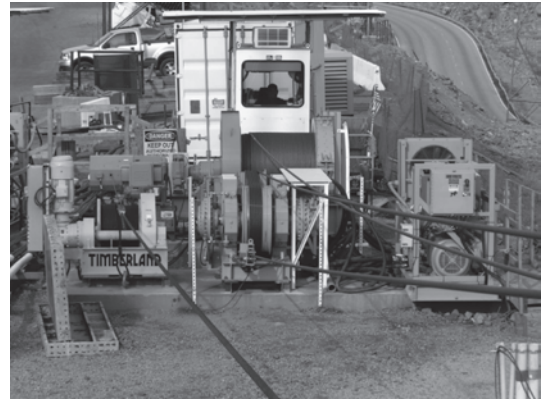
#### (1) ケーブルクレーン

深い渓谷上に位置する当現場では、荷役運搬用機械としてケーブルクレーンの使用は必然の選択であった。橋脚プレキャストセグメントの架設やアーチリブ張り出し施工、鋼製ガーダー架設に加え、アクセスが困難な施工場所への作業員の運搬など、あらゆる局面で必要とされた。まさに工事の生命線となる重要な設備であった（写真—8）。

約14m間隔で平行に配置された橋脚やアーチリブと同じ橋軸線上にそれぞれ独立したケーブルクレーンを設置した。前述したピロン柱にトラックケーブルが干渉するのを回避する十分な高さを確保するため、鋼製タワーは高さ101mとした。吊り荷を橋軸直角方



写真一 8 ケーブルクレーン全容



写真一 9 ケーブルクレーン運転席と各種ウィンチ

向へ移動できるよう、タワーを左右へ振る機能（ラッピング）を持たせた。

9ピースの鋼製トラスで構成されるタワーの組み立ては狭隘なアプローチに300トン級クローラークレーンを配置し、やらすワイヤーを4方向に張りながら行われた。タワー支間762mにおいてケーブルの設置を行う工程では、ヘリコプターを使用して細いパイロットワイヤーを渓谷間に渡すことから始まり、ウィンチを使用して両岸を往来させながら徐々にケーブル径を大きくした。最も太いものは径75mmのトラックケーブルであった。

トラックケーブル張力を調整することで吊能力を変化させた。プレキャスト橋脚や鋼製桁架設期間は50トン吊りとしたが、アーチ施工期間は25トン吊りとして、ケーブルサグとピロン柱の干渉を回避すると同時に揚重スピードを上げ、サイクルタイム短縮に寄与した。支間中央におけるトラックケーブルのサグは50トン吊り時に56.4メートル、25トン吊り時で42.7mであった。タワー周辺とフォームトラベラーに風速計を設置し、常に風速を監視しながら作業を実施した。瞬間風速（3秒平均）が毎時20マイル（8.9m/秒）を超えると、ケーブルクレーンによる人の運搬を、毎時30マイル（13.4m/秒）を超えると、全ケーブルクレーン作業を中止した。風速が毎時30マイル以上を記録した割合が夏期（4月～9月）で16%、冬期（10月～3月）で10%で、強風による工程への影響は甚大であった。

大半の作業においてケーブルクレーンを必要とするため、クリティカルアクティビティに優先的な使用権を与えることが、工程管理の上で必須であった。作業前打ち合わせで、ケーブルクレーンの作業内容と時間割りを取り決め、クレーンオペはこのスケジュール表に沿って作業した。作業スケジュールの変更は、決められた職長のみ無線でケーブルクレーンオペレータ

に指示や許可を出させ、ケーブルクレーンの効率的な使用を徹底した（写真一9）。

## (2) コンクリート関連設備

### (a) 既設生コンプラントと直営プラント

現場に供給可能な立地条件にある既存の商業生コンプラントは1箇所のみで、需要があるときだけ稼働する開店休業状態であった。ミキサーは定置式ではなく、トラミキ車へ直接材料を投入し、練り混ぜる方式であった。橋脚用プレキャストセグメントの製作は作業のサイクル化により生コン打設が毎日、ほぼ決まった時間に行われること、トラミキによる練混ぜでも要求品質が達成可能な生コン仕様であったこと、製作ヤードと隣接していることから、この既存プラントが使用された。一方、アーチで使用する高流度/高強度コンクリートは非常に鋭敏で、トラミキ車による練混ぜでは品質にばらつきがあり、練混ぜ不良によるサンドボールがしばしば形成された。また、プラントから現場までの道中はしばしば突発的な渋滞に見舞われ、時間内の運搬に懸念があった。アーチリブコンクリートの不具合は致命的で、要求品質の安定供給が不可欠であることから、現場近傍にバッチャーを設営し、直営で製造管理することとした。可搬式バッチャープラントに5立方ヤード（約3.8M<sup>3</sup>）のパン型強制練りミキサーを組み合わせ使用した。

### (b) 生コン打込み温度対策

打設後のコンクリート発熱温度は、155F（約68℃）以下とすることがスペックで規定されていた。計画サイクルタイムを満足する初期強度発現が得られる範囲で低発熱タイプの配合とし、打設はすべて夜間、スペースが許す限りクーリングパイプを配置し、発熱を抑制する方策をとったが、それでも、夏季にはコンクリート打込温度を16℃以下にする必要があった。遮蔽により日射を和らげ、散水による気化熱を利用して骨材

のプレクーリングを行い、冷水の使用により打込温度を下げる方策をとったが、目標打込温度には達せず、やむをえず、液体窒素を使用した。氷チップの融解熱による減温効果も検討したが、対象コンクリートボリュームが少ないため固定費の負担が大きく、断念した。打設後のコンクリート温度のモニタリングを行い、液体窒素使用量の経済化を図った（写真—10）。



写真—10 液体窒素による生コン冷却

### (c) アーチコンクリート打設

アーチリブのコンクリートは全面を型枠で覆われ、コンクリートの投入は各所に設けられた小さな開口部に限られた。任意の場所へ速やか、かつ正確に筒先を動かす必要性から、アーチ上に打設用ブームを設置した。アーチ張り出しが進むにつれて、打設用ブームも前方へ移設し、この施工荷重の変化は3次元解析に反映された。地上に設置されたコンクリート圧送ポンプとはアーチ上に敷設された5インチ圧送管で接続した（写真—11）。



写真—11 コンクリート打設用ブーム

### (3) フォームトラベラー

アーチセグメントのサイクルタイムの短縮を実現するため、施工に使用するフォームトラベラーの製作には以下の点が考慮された。

・急勾配での施工となるので、各種作業の安全確保を

第一とすること。

- ・外型枠／内型枠の簡易かつ迅速なラウンディング（前進）と後方への落下防止対策。
- ・鉄筋かごや伏せ型枠大型パネルなどケーブルクレーンによる材料の吊り込みが支障しないよう、上部開放型とすること。
- ・アーチ角度の変化に応じて作業足場や昇降階段の角度調整が可能なこと。
- ・設計時に想定したトラベラー重量から大きく逸脱しないこと。
- ・全面を覆われた型枠内のコンクリート充填が確実に行われること。
- ・コンクリートは一回打設とし、側圧に十分耐える型枠構造とすること。
- ・交互にあるプリスターセグメントと標準セグメントの内型枠の調整手間を最小限にすること。
- ・米国から遠隔の中国での製作であるため、日本から技術者を現地へ派遣し、品質保証／管理の徹底を行うこと。

長いラーニングカーブを経て、アーチ勾配が緩やかになるにつれて、サイクルタイムは飛躍的に向上し、最短で6日を達成した（写真—12）。



写真—12 フォームトラベラー

## 5. おわりに

現地に乗り込み、断崖絶壁を目の当たりにして、途方に暮れたことが昨日のことにように思い出される。“挑戦”という言葉では表現しきれない七難八苦の工事であった。2010年10月の完成以来、1年間に700万台以上の車両がコロラドリバー橋を通行し、約100万人の観光客が現地を訪れた。世界の土木史に残るフーバーダム の偉業の眼前でコロラドリバー橋は新しいランドマークとして人々に認識されつつある。



写真—13 完成写真

## 謝 辞

本プロジェクトは土木学会から土木学会田中賞を、ASCE（米国土木学会）からその年度を代表する工事に与えられる OCEA（Outstanding Civil Engineering Achievement）Award という日米の荣誉ある賞を受賞した。これらは、我々と一丸となって取り組んだ発注者（Federal Highway Administration：連邦高速道

路局）の強いリーダーシップと各方面から頂いた多大なご支援、ご指導の賜物である。この場を借りて、関係各位に改めて謝辞を申し上げます。

J C M A

### 《参考文献》

- 1) 小野崎他：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
- 2) 高德裕平：フーバーダムバイパスコロラドリバー橋の建設，土木学会誌，2011.02
- 3) 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・コンクリート誌，2011.01

### 〔筆者紹介〕

定松 道也（さだまつ みちや）  
 (株)大林組  
 海外支店 土木営業部  
 副部長



## 「建設機械施工ハンドブック」改訂4版

建設機械及び施工の基礎知識，最新の技術動向，排出ガス規制・地球温暖化とその対応，情報化施工などを，最新情報も織り込み収録。

建設機械を用いた施工現場における監理・主任技術者，監督，世話役，オペレータなどの現場技術者，建設機械メーカー，輸入商社，リース・レンタル業，サービス業などの建設機械技術者や，大学・高等専門学校・高等学校において建設機械と施工法を勉強する学生などに必携です。

建設機械施工技術の修得，また1・2級建設機械施工技士などの国家資格取得のためにも大変有効です。

### 〔構成〕

1. 概要
2. 土工学一般
3. 建設機械一般
4. 安全対策・環境保全
5. 関係法令

6. トラクタ系機械
7. ショベル系機械
8. 運搬機械
9. 基礎工事機械
10. モータグレーダ
11. 締固め機械
12. 舗装機械

●A4判／約800ページ

### ●定 価

非 会 員：6,300円（本体6,000円）

会 員：5,350円（本体5,095円）

特別会員：4,800円（本体4,570円）

【ただし，特別価格は学校教材販売（学校等教育機関で20冊以上を一括購入申込みされる場合）】

※送料は会員・非会員とも沖縄県以外700円，沖縄県1,050円

※官公庁（学校関係を含む）は会員と同等の取扱いとします。

●発刊 平成23年4月

## 一般社団法人 日本建設機械施工協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>