

# 霊山道路 月館高架橋の設計

## — 中山間地の橋梁計画とPC ラーメン箱桁橋の設計 —

篠原 修二\*1・清田 裕司\*2・山本 晃弘\*3

霊山道路の月館高架橋は、福島県伊達市月館町に位置する中山間地に計画される橋梁である。霊山道路は復興支援道路「相馬福島道路」の一部を構成する自動車専用道路で、現在、早期供用を目指し事業が展開されている。設計においては、地形地質条件や交差条件、施工条件などを基に橋梁形式を検討し、橋長462mのPC6径間連続ラーメン箱桁橋を選定した。また、支承構造や橋脚断面など各構造部材について経済性や耐久性を考慮した検討を実施し、詳細設計を実施した。

本稿では、「月館高架橋詳細設計業務」（東北地方整備局 福島河川国道事務所発注）にて実施した月館高架橋の橋梁計画からPCラーメン箱桁橋の詳細設計について、設計の経緯を説明するとともに工夫した点を報告する。

キーワード：橋梁計画、張出し架設、PC ラーメン橋

### 1. はじめに

霊山道路月館高架橋は、福島県伊達市月館町の中山間地に位置する連続高架橋である（図-1）。国道115号の信頼性、速達性の向上と、東西軸構築による復興支援、高規格道路ネットワークによる交通の円滑化を目的に、早急な整備が求められている。

架橋地は開析の進んだ比較的緩やかな山地である。山間の沖積低地に1級河川広瀬川が流れ、周辺は道路、宅地、

果樹園などに利用されている。

本設計では、地形地質条件、交差条件、施工条件などの各種の制約条件に基づき、経済性、施工性、維持管理性、環境性などに配慮した最適な橋梁形式を検討し、PC6径間連続ラーメン箱桁橋を選定した。また、支点部の支持構造、箱桁断面の形状、PC鋼材、橋脚柱の形式、基礎形式などの比較検討により、各部材を最適化した。詳細設計では施工ステップに基づく解析により構造諸元を決定した。また、PC橋の乾燥収縮やクリープによる不静定力に起因する橋脚断面の大型化に対応するため、張出し架設閉合部への反力調整工を計画した。

本稿では、「月館高架橋詳細設計業務」（東北地方整備局 福島河川国道事務所発注）にて実施した月館高架橋の橋梁計画から詳細設計について、設計の経緯と工夫した点などを報告する。

### 2. 構造形式の検討

#### 2.1 橋梁の設計条件

道路規格は第1種第3級であり、片側1車線の全幅12.8mの幅員構成である。橋梁付近は緩やかなS字カーブを描き、P2橋脚上に非常駐車帯を有する（図-2）。

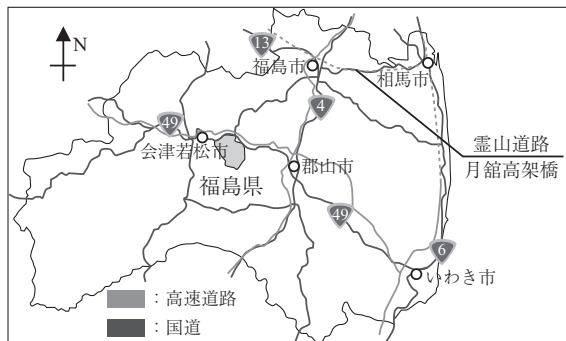


図-1 位置図



\*1 Syuji SHINOHARA

(株) 総合技術コンサルタント  
東北支店



\*2 Yuuji KIYOTA

(株) 総合技術コンサルタント  
東北支店



\*3 Akihiro YAMAMOTO

(株) 総合技術コンサルタント  
東北支店

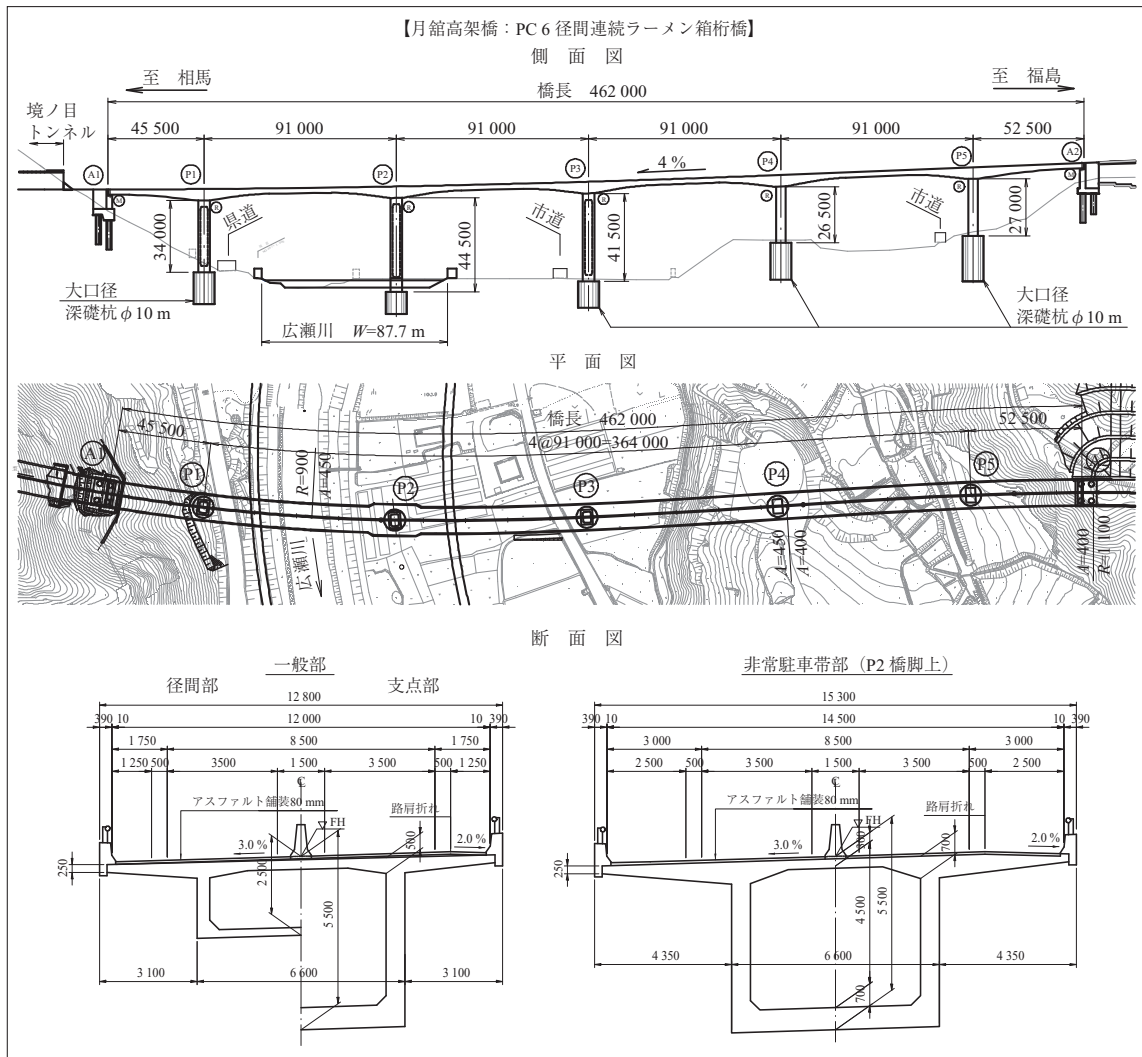


図 - 2 月館高架橋一般図

交差物件として一級河川広瀬川，県道月館霊山線，市道などがあり，広瀬川は川幅 87.7 m（計画断面）である。周辺は果樹園として利用されており，直近に民家も存在する。

起点側（相馬市：太平洋側）は比較的急峻な地形であり，花崗閃緑岩が分布する。終点側（福島市：内陸側）は崖錐地形であり，一部に耕地を有する山林の尾根地形となっている。これに挟まれた沖積低地に広瀬川が流れる。

## 2.2 橋梁形式の1次比較

広瀬川右岸（A1 橋台側）は県道を挟んで斜面が迫り，橋脚を設置するスペースが少なく，支間割りのコントロールポイントである。広瀬川の川幅は 87.7 m だが，隣接する県道と合せて横過すると 100 m 以上の長支間となるため，河川内に橋脚を設置する方針とした。

橋台は斜面上に位置するため，トンネル坑口との近接施工への配慮とともに，橋台高と橋長をパラメータにした比較検討を実施し，最適橋台位置を決定した。河川条件，地形条件などから適用可能な支間割り，橋梁形式を複数案立案して，形式1次選定を行った。

支間割りは4径間～11径間まで立案し，それぞれ鋼橋

案，PC 橋案を抽出した。

鋼橋案は5径間から11径間で立案し，5径間（最大支間長 106 m）は合理化トラス橋，6～8径間（最大支間長 89 m）を箱桁橋，9～11径間（最大支間長 59 m）を鈹桁橋として検討した。

PC 橋案は4径間から10径間で立案し，4径間（最大支間長 161 m）はPCエクストラドーズド橋，5～8径間（最大支間長 114 m）をPC箱桁橋，9～10径間（最大支間長 76 m）はPC箱桁橋とPCコンポ橋の2連構造として検討した。既往実績などをもとに各案の概算工事費を算出し，総合的に比較検討を行い，予備設計対象となる3案を選定した（表 - 1）。

表 - 1 1次選定案

選定案	橋梁形式	工費比率 (初期コスト)
第1案	PC 6径間連続ラーメン箱桁橋	1.05
第2案	鋼 8径間連続箱桁橋	1.06
第3案	鋼 10径間連続鈹桁橋	1.00

## 2.3 橋梁形式の2次比較

1次比較で選定した全3案の概略設計を行い，数量，工

費を算出したうえで、構造的、耐久性、維持管理性、施工性、環境性などの面から比較検討し、最適橋種を選定した。

a) 経済性 (概算工事費)

概略設計による工費算出の結果、維持管理費を含めたライフサイクルコスト (LCC) で第1案がもっとも経済的となった。

b) 構 造 性

実績、耐震性などを評価した。各案ともに施工実績が多く大きな差はない。第1案はラーメン構造を採用して耐震性に優れる。第2案、第3案は軽量であることから地震時の下部、基礎工に対する影響が少ない。

c) 施 工 性

第1案は現場打ちコンクリートを多用するため工期が長い、張出し架設のため河川などの施工制約がない。第2案はクレーンベント架設であり現場工期は短い、河川内にベントを設置するために施工時期の制約を受けるほか、ベント高が40m程度と高く、施工の難易度が高い。第3案は第2案と同じだが、斜面部の橋脚が多く、土留(竹割り構造)が必要のため施工性に劣る。

d) 環 境 性

橋脚数が周辺景観や地形改変に影響するため、フォトモンタージュやパースを用い、これを評価した。

e) 維 持 管 理

維持管理性は塗装の塗替えがなく、支承をもたないラーメン橋の第1案を優位に評価した。

以上の結果を表-2に示す。総合評価により、第1案のPC6径間連続ラーメン箱桁橋を採用した。

表 - 2 2次選定結果

比較案 (略称)	a 工費 比率 (LCC)	b 構 造 性	c 施 工 性	d 環 境 性	e 維 持 管 理	採否
第1案 PC6径間	1.00	◎	○	◎	○	○
第2案 鋼8径間	1.18	◎	△	○	△	
第3案 鋼10径間	1.15	◎	△	△	△	

2.4 支承条件の検討

本橋は6径間連続のPCラーメン橋であり、橋脚により固定される固定間距離は364mにおよぶ。PC橋はコンクリートの乾燥収縮や、プレストレスの持続荷重によるクリープ変形によって不静定力が発生する。このため、端橋脚に大きな水平力と曲げモーメントが発生する。また、5基の橋脚は高さが大きく変化(最大/最小=1.6倍)することから、地震時の上部工慣性力が高さの低い橋脚に偏るなどが課題であった。

以上の状況から、中間橋脚の5基をすべて剛結とした場合(第1案:5点固定構造)と、橋脚高の低いP5橋脚を弾性支持した場合(第2案:4点固定構造)について、橋梁全体系モデルによる温度解析・地震解析(動的解析)を実施してこれらの荷重状態における応答・影響を把握・評価して構造的に優れる支承条件を選定した。

第1案は不静定力が大きい、地震時の慣性力を5基で

分担できる。第2案は固定間距離が短いために不静定力が小さいが、地震時の慣性力を4基で分担する必要がある。全体解析の結果、第1案:5点固定構造とした場合でも反力調整工(4.2に詳述)により構造が成立することを確認できたことから、支承数が少なく、耐震性、維持管理性に優れる第1案の5点固定構造を採用した。

3. 部材の検討

3.1 桁 断 面

近年、PC箱桁の断面は配筋作業の簡略化や桁の軽量化、床版支間の長大化など、さまざまな要求性能に対応するため、桁の形状、型式が多様化している。

全幅12.8mの本橋は、1室箱桁を基本に、ウェブに波形鋼板を使用した断面、張出し床版部に鋼管ストラットを配した断面、上床版にリブを配した断面などを比較し、経済性、施工性、維持管理性などから通常のコンクリート断面を採用した。

波形鋼板は塗装の経年劣化による維持管理が必要となり、上部工の本体質量が軽減されることによるコストダウンを考慮しても、通常のコンクリートウェブに対してトータルコストで不利であった。また、ストラットやリブを配する形状は、施工性や経済性からメリットが少なく、優位性が見いだせなかった。一方、通常のPC床版として計画した場合、太径シングルストランド(SWPR19 1S28.6)を使用することで成立するため、施工の確実性や耐久性、維持管理性などを含めた検討の結果、ウェブ、床版ともに通常のコンクリート断面が優位と判断した。

非常駐車帯が設けられるP2橋脚上は、床板横締め鋼材の配置ピッチを密にするとともに、一般部より床版厚を大きくする(付け根厚500mm→700mm)ことで対応した。

3.2 PC 鋼 材

張出し架設工法のPC箱桁のため、架設ケーブルと閉合ケーブルが配置される。本橋は架設ケーブルに内ケーブル(SWPR7BL 12S15.2)を使用し、閉合ケーブルには内ケーブル(SWPR7BL 12S15.2)と外ケーブル(SWPR7B 19S15.2)を使用した。

外ケーブルの防錆はシースを使用してグラウト充填する方法と、被覆鋼材を使用する方法を比較し、施工性、経済性から樹脂被覆PC鋼材によるノングラウト方式を採用した。

横締め鋼材は床版支間が長いことから太径(SWPR19S28.6)とし、施工性に優れるプレグラウト鋼材を採用した。

3.3 橋 脚 構 造

橋脚は高さが40m程度と高く、柱自重による地震時慣性力の増大、基礎への影響が懸念されたことから、柱断面には中空構造を適用した。その構造には、一般的なRC中空断面に加え、高橋脚の施工(工期短縮)に有利な、鋼管・コンクリート複合構造橋脚、SRC構造(3H工法、REED工法)の4案について経済性・施工性を比較検討した。経済性と施工性(工期)はトレードオフの関係(表-3)となり、両者のバランス(効果)を勘案しRC中空断面橋脚

表 - 3 橋脚断面の比較

比較構造	経済性 (比率)		施工日数 (ヵ月)		採否
RC 中空断面	1.000	小	6.3	大	○
3H 工法	1.104		5.2		
鋼管複合法	1.110		3.3		
REED 工法	1.807		1.7		

を採用した。

なお、2014年に下部工の工事が実施されており、工期の短縮が求められたことからP4、P5橋脚にCF工法(型枠作業の省力化)が採用されている。

RC中空断面橋脚では、コンクリート、鉄筋における高強度材料の適用について効果を検証した(表-4)。概略設計による工費の算出結果から、コンクリートの強度アップによるコストダウンが見込めたことから、コンクリートは $\sigma_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$ を採用した。一方、高強度鉄筋は工費の差が少ないことから、施工実績を優先してSD345を採用した。

表 - 4 使用材料の比較

コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋	主筋配置		工事費 (比率)	採否
		橋軸	直角		
$\sigma_{ck} = 24$	SD345	D51×3段	D35×1.5段	1.11	○
		D51×2段	D35×1.5段	1.02	
$\sigma_{ck} = 30$	SD390	D51×2段	D32×1.5段	1.01	
	SD490	D51×1.5段	D29×1.5段	1.00	

### 3.4 基礎構造

比較的浅い深度より良質な岩盤が出現する地盤条件に対して、地形状況・施工性を比較検討し基礎形式を選定した。

斜面に設置する橋台基礎は、地形改変・施工性より組杭深礎を採用した。

橋脚基礎は、傾斜地形に設置されるもの、交差条件(道路)の制約条件を受けるもの、地下水位の影響など、個々の条件に応じて大口径深礎、直接基礎を比較検討し、大口径深礎を採用した。

河川に近接する平地部では地下水位が高く、周辺では井戸水を使用している環境下であったことから、基礎周辺を遮水矢板で取り囲み、基礎施工部への地下水の流入を防ぐとともに、周辺井戸などへの影響防止対策を立案した。

### 3.5 支 承

端支点の支承について、弾性固定方式と固定可動方式を比較した。弾性固定方式は地震時水平反力分散型ゴム支承を用いる。地震時の水平力を橋台に分配できるが、中間脚が剛構造のため、分担比率は少ない。一方、固定可動方式(中間橋脚で固定されるため、橋台は可動のみ)は、すべり型ゴム支承を用いるものであり、水平力を受けないことから、分散型ゴム支承に比べて支承寸法を縮小できる。工費比較の結果、本設計ではすべり型ゴム支承(ディスク型高面圧ゴム支承)を採用した。

### 3.6 伸縮装置

道路橋の損傷は伸縮装置からの漏水による桁端部や支承

部などで多く発生する。また、本橋は冬期間において路面に凍結抑制剤が散布される地域であることから、塩分を含んだ橋面水は適切に排水することが求められる。このため、伸縮装置本体の耐久性はもとより、止水部材の耐久性にも配慮する必要がある。伸縮装置の選定では、維持管理コスト、耐久性、止水性などに配慮し、アルミ製ジョイントを採用した。

### 3.7 維持管理性と耐久性向上策

東北地方の橋梁は、冬季における凍結融解作用や、凍結抑制剤の散布など、厳しい環境におかれる。とくに、塩化ナトリウムを主成分とする凍結抑制剤は、雨水に混ざり各部材に進入、浸透することで鋼材の腐食を促進させる。この影響による橋梁の損傷原因の多くが桁端部や支承部に認められる。このため、橋面水の適切な排水と、桁端部の耐久性向上に向けた対策として、次の①～④を実施した。

- ① 橋台部沓座の排水勾配の確保 (3.0%)
- ② 橋梁端部の上下部工へのコンクリート塗装
- ③ 樹脂被覆 PC 鋼材の採用
- ④ 耐久性の高い伸縮装置の採用

また、維持管理の容易さ、確実さ(設計段階からの維持管理性への配慮)に留意し、桁端部における点検スペースを確保した。

## 4. 詳細設計

### 4.1 設計手法

張出し架設工法を用いた PC 橋のため、施工ステップごと(全60ステップ)の構造系の変化を反映した全体解析モデルにより断面力を算出した。また、平面曲線( $R = 900 \text{ m}$ )を有するため、立体格子解析によりねじりモーメントを算出し、設計に反映した。

地震に対しては、レベル1地震は全体骨組モデルを用いて静的解析で断面力を算出し、許容応力度法で設計した。レベル2地震は下部工、上部工ともに非線形部材を考慮した動的解析を実施し、各部材の耐力や変形性能を確認した。上部工は弾性域にとどまることを確認し、耐力が不足する場合は補強筋の追加により対応した。

### 4.2 反力調整工による不静定力の低減

2.4で述べたとおり、本橋は橋脚で固定される固定間距離が364mにおよぶことから、乾燥収縮やクリープ変形による不静定力が発生する。とくに、端橋脚(P1、P5)の基部における曲げモーメントが大きい(図-3)。このため、これを打ち消すための上部工施工ステップの設定と、反力調整工を計画した。

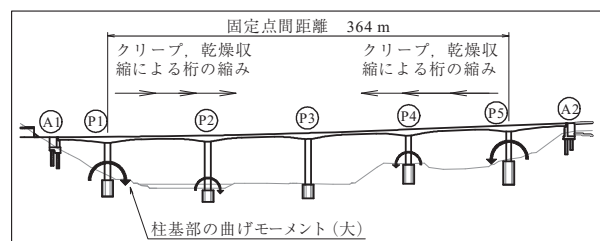


図 - 3 乾燥収縮やクリープによる不静定力

施工ステップの設定では、中央閉合部の施工前に側径間を施工することにより、側径間施工時の荷重を P1 橋脚への偶力として与え、乾燥収縮等による断面力をキャンセルする方向に作用させる (図 - 4: 側径間先行施工)。

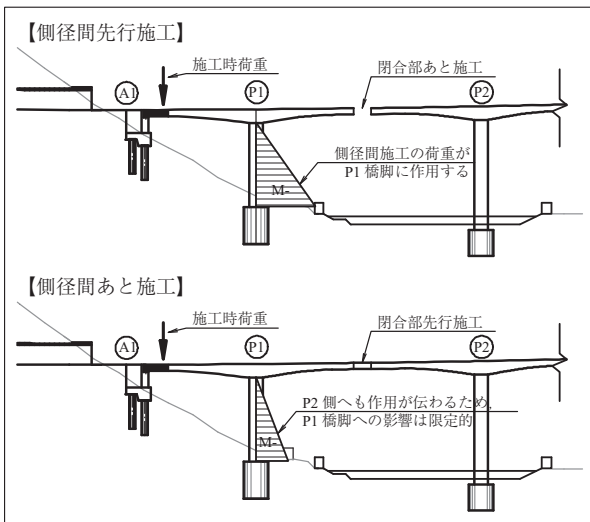


図 - 4 施工ステップの設定

反力調整工は中央閉合部の施工に先立ち、上床版に仮留めしたブラケットを水平ジャッキで押すことで、端橋脚における乾燥収縮やクリープによる断面力の逆の荷重を加えるものである (図 - 5, 6)。

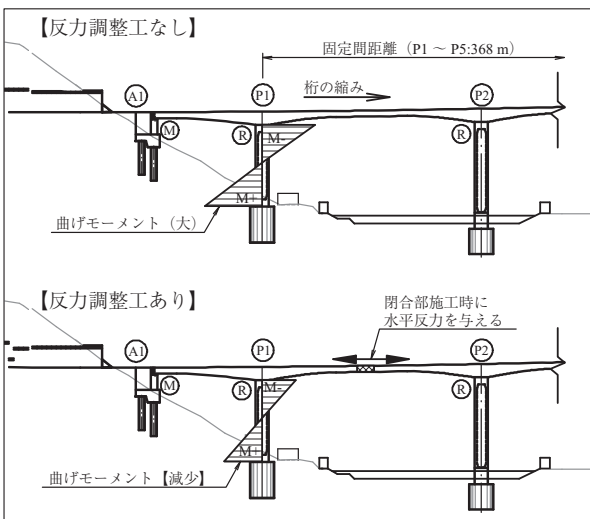


図 - 5 反力調整工の概要

水平ジャッキによる荷重を維持したまま中央閉合部を施工し、端橋脚の常時の断面力を低減する。本橋は、第 2 径間の閉合部に 200 t、第 5 径間の閉合部に 150 t の水平力を導入する計画である。

P1、P5 橋脚の基部の曲げモーメントの内訳を (表 - 5) に示す。施工ステップの設定による影響は表のうちの自重による断面力に含まれる。これには左右の張出し長さや横桁などの位置の影響もあるため、簡易に説明するこ

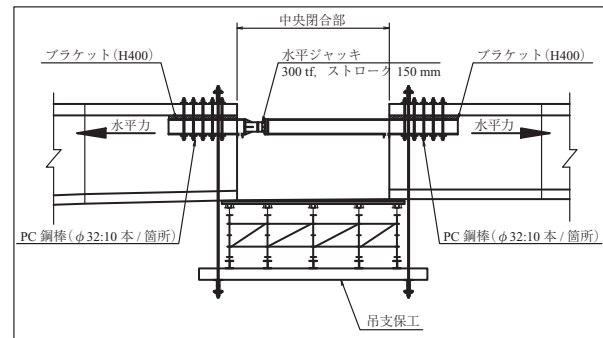


図 - 6 水平ジャッキの概要

表 - 5 橋脚基部曲げモーメントの内訳 (kN・m)

	P1 橋脚 (基部)	P5 橋脚 (基部)
自重	-59 800	91 100
乾燥収縮	104 200	-87 500
プレストレス 2 次力 (クリープ含む)	211 800	-131 700
小計	256 200 (1.00)	-128 100
反力調整工	-53 700	31 300
合計	202 500 (0.79)	96 800 (0.76)

とはできないが、乾燥収縮などによる断面力を打ち消す方向に働いていることがわかる。また、反力調整工も同様に乾燥収縮などによる断面力を打ち消す方向に働いており、合計では発生曲げモーメントを 21% ~ 24% 程度低減している。

## 5. おわりに

2015 年 1 月現在、月館高架橋は下部工の施工が完了し、上部工の施工に着手されたところである。耐久性や維持管理性、施工性の向上など、PC 橋に求められる性能は多様化、高度化している。設計者はこれらの要求に答えつつ、経済性とのバランスのとれた計画を立案することが重要だと考えている。



写真 - 1 施工状況写真

(2014.12.2 時点 福島河川国道事務所より提供)

最後に、本設計の実施にあたりご指導をいただいた国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所の方々に、ここに記して謝意を表します。

【2015 年 1 月 17 日受付】