

外ケーブル併用 PC 吊床版橋の施工 —白山ろくテーマパーク整備工事—

東京支店	土木工事部	河島淳一
東京支店	設計センター	渡辺浩良
東京支店	土木工事部	西本勝之
技術本部	技術部	中井聖棋

概要：本橋は、石川県白山市にある手取溪谷の右岸にて整備中の「白山ろくテーマパーク」と左岸にて既に運営を行っている「バードハミング鳥越」を結ぶために建設された外ケーブル併用 PC 吊床版橋である。景観および環境に配慮し、「自然の中で人工物が目立ち過ぎると環境のバランスを失う」という観点から、自然環境と調和するスレンダーな構造を持ち、外ケーブルの緊張によりサグ量調節が可能で、バリアフリー対策として、縦断勾配の緩和が可能な本構造が採用された。

Key Words：PC 吊床版橋，外ケーブル併用，張力調整

1. はじめに

白山ろく PC 吊床版橋(仮称)は、石川県白山市の手取川に架設された歩行者専用の外ケーブル併用 PC 吊床版橋である(図-1)。従来の直路式 PC 吊床版橋は、橋台の間に張り渡した PC ケーブルを、薄いコンクリートで包み込んで床版とした形式の橋梁である。その床版内に配置される PC ケーブルは、吊床版架設に先だって橋台間に張り渡される第1ケーブルと、吊床版にプレストレスを導入するための第2ケーブルに区別される。外ケーブル併用 PC 吊床版橋とは、床版断面内に配置していた第2ケーブルの一部を、鋼製の鉛直材を介して床版下部に外ケーブルとして偏心配置したものである。加えて本橋では、床版架設に用いる第1ケーブルも外ケーブルとし、床版断面外の床版直下に配置する構造となっている。そのため本橋の床版架設では、張り渡した第1外ケーブル上にプレキャスト版をスライドさせて行うこととなる。したがって、この架設工法は、懸垂架設工法ではなくスライド架設工法と呼ぶことが、より適当である。

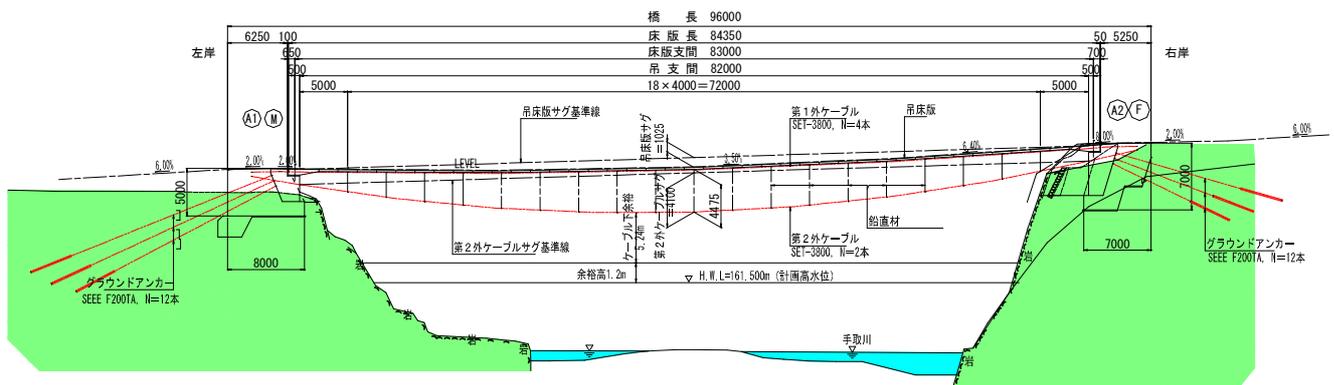


図-1 橋梁一般図



河島淳一



渡辺浩良



西本勝之



中井聖棋

従来の PC 吊床版橋は、吊床版端部において橋台に剛結されていた。この部分を端部分離構造とすることで、プレストレスの導入効率を改善し、同時に剛結部に発生する局所的な曲げモーメントにより発生するひび割れを防いでいる。また本構造は、プレキャスト版の架設に張り渡した第 1 外ケーブルを使用し、PC 吊橋のハンガーのハンガーケーブルの代わりに鋼製の鉛直材を圧縮材として使用した、変形 PC 吊橋とも言える。これは PC 吊橋に比べ、主塔やバックステーが不要となるなど有利な点も多い。

2. 工事概要

本橋の工事概要を以下に、および主要断面図を図-2に、主要材料表を表-1に、および施工ステップを図-3に示す。

工 事 名：白山ろくテーマパーク整備工事(吊橋上部工)(ゼロ国)

施 主：石川県土木部石川土木総合事務所

工事場所：石川県白山市上野町～吉野地内

工 期：平成 20 年 3 月 31 日～平成 20 年 12 月 25 日

構造形式：単径間外ケーブル併用 PC 吊床版橋

橋 長：96.0m

吊り支間：82.0m

有効幅員：2.0m

総幅員：3.4m

施工方法：懸垂架設(スライド架設)

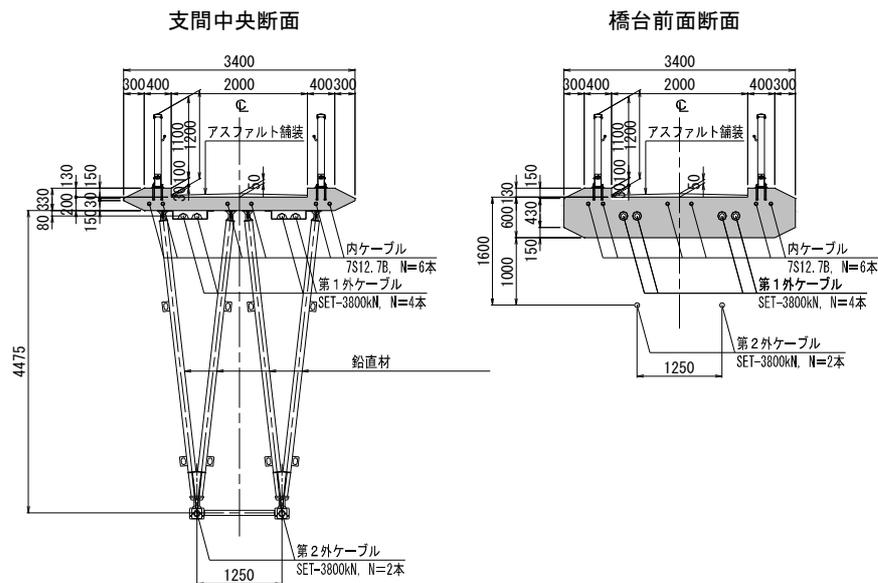
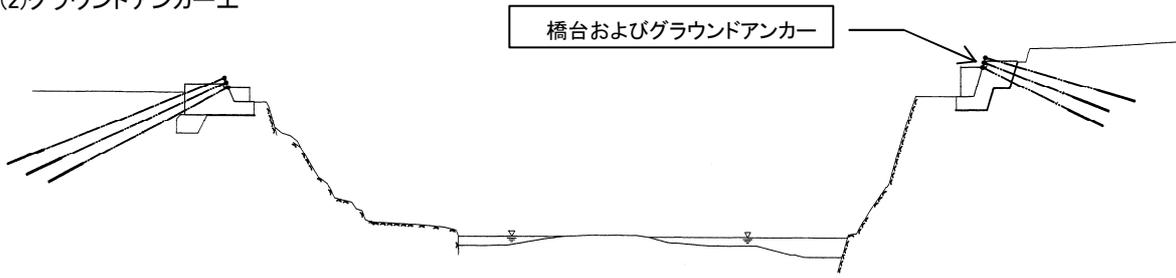


図-2 主要断面図

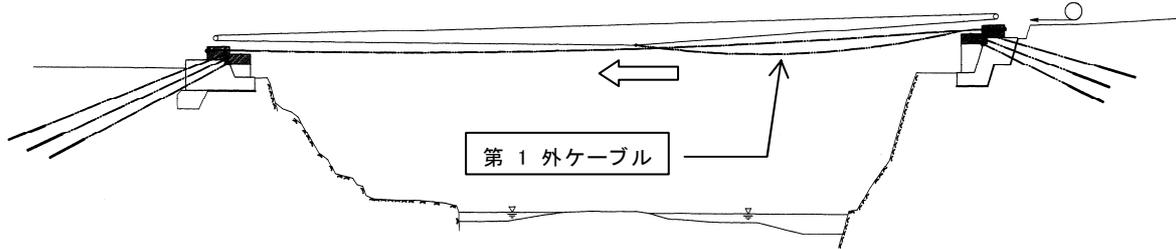
表-1 主要材料表

材料名	規格	単位	数量	備考
プレキャスト版	$\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$ 寸法: 3.4m×1.99m×0.2m	枚	39.0	合計 59.9m ³
場所打ちコンクリート	$\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$	m ³	11.2	
鉛直材	STK400, STKR400, SM490A 他	kg	7955	溶融亜鉛メッキ+外面塗装
第 1 外ケーブル	SWPR19 7S21.8	〃	6399.4	神鋼鋼線 SET ケーブル
第 2 外ケーブル	〃	〃	3224.1	〃
内ケーブル	7S12.7	kg	2729.6	FKK

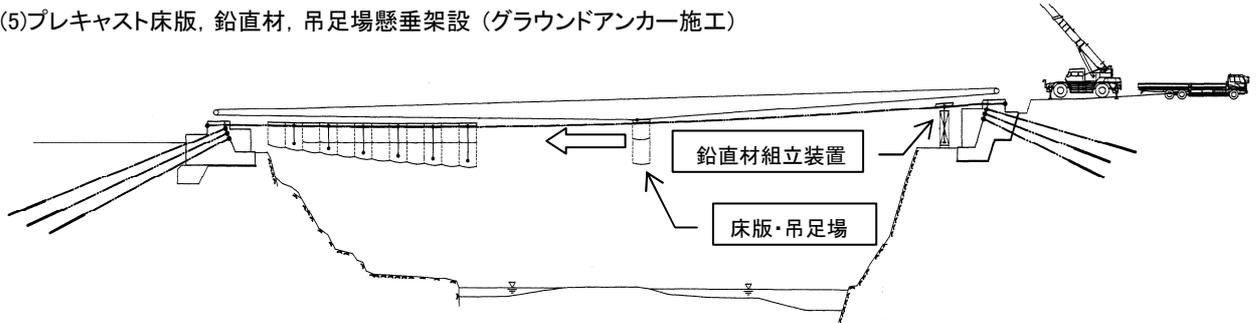
- (1)橋台工
- (2)グラウンドアンカー工



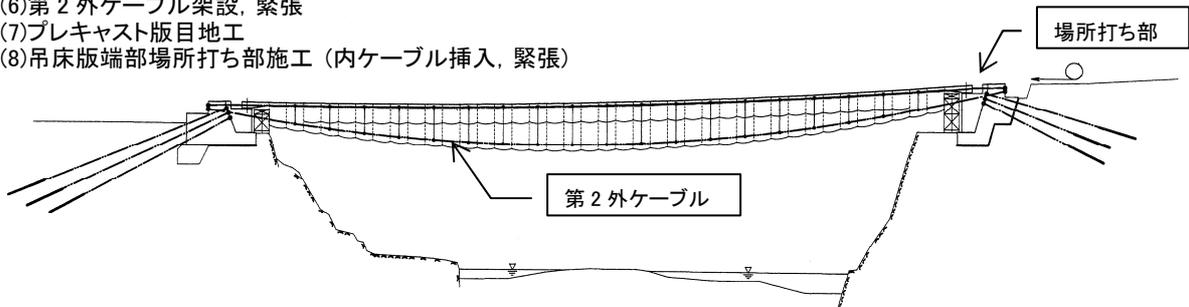
- (3)橋台頂部施工
- (4)第1外ケーブル架設, 緊張 (グラウンドアンカー緊張)



- (5)プレキャスト床版, 鉛直材, 吊足場懸垂架設 (グラウンドアンカー施工)



- (6)第2外ケーブル架設, 緊張
- (7)プレキャスト版目地工
- (8)吊床版端部場所打ち部施工 (内ケーブル挿入, 緊張)



- (9)定着部後埋め工
- (10)吊足場解体
- (11)橋面工 (舗装)

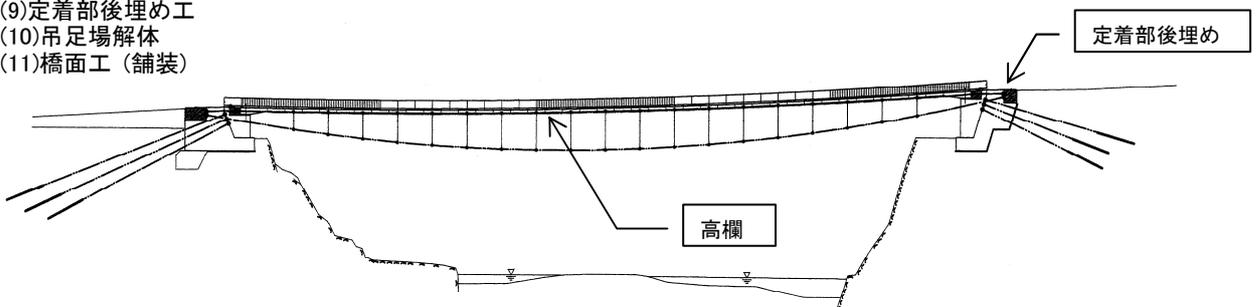


図-3 施工ステップ図

3. 施工

3.1 施工フロー

3.1.1 施工フローチャート

図-4に施工のフローチャートを示す。

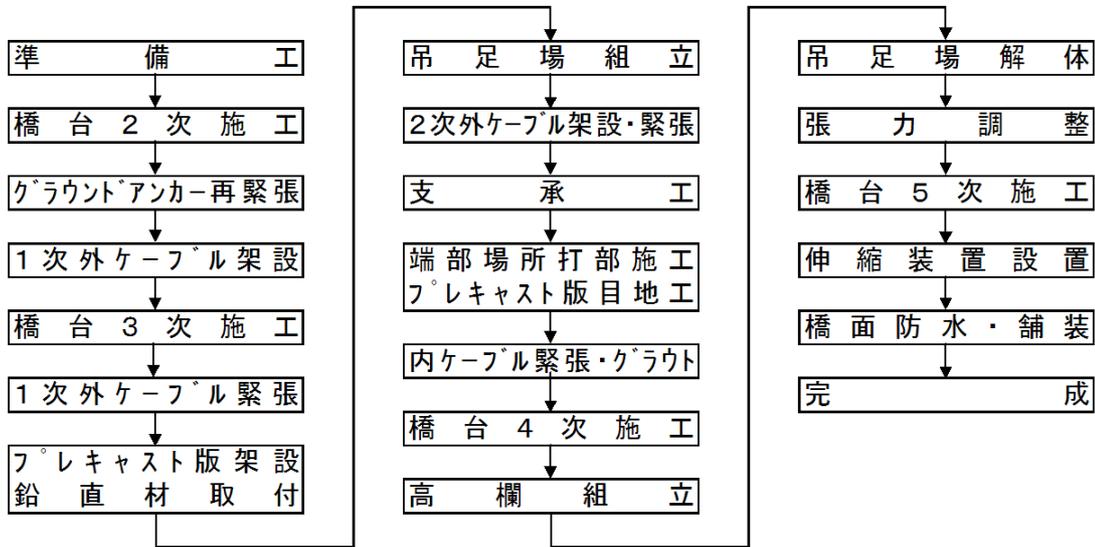
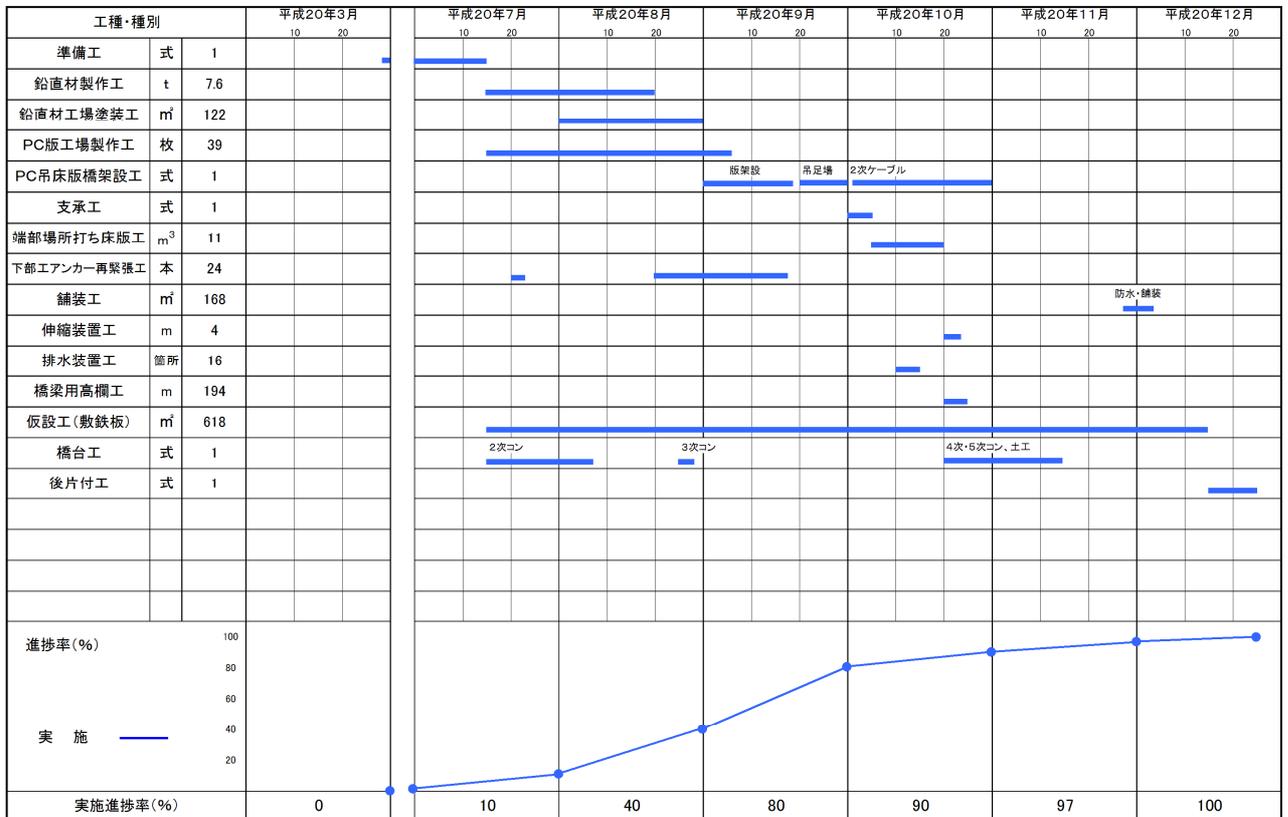


図-4 施工フローチャート

3.1.2 施工工程

表-2に実施工程表を示す。

表-2 実施工程表



上部工施工前には、グラウンドアンカーの試験緊張を行い健全性を確認すると共に一部を本緊張し、あらかじめ地盤の初期クリープを進行させて、地盤クリープによるグラウンドアンカー張力の減少を抑制を図った(写真-1)。

表-3 橋台の転倒・滑動・地盤反力度を考慮した施工順序

	A1側	A2側
STEP-1	グラウンドアンカー下段内側2本緊張	
STEP-2	第1外ケーブル4本1/2緊張	
STEP-3	グラウンドアンカー下段外側2本、中段内側2本緊張	
STEP-4	第1外ケーブル4本フル緊張	
STEP-5	グラウンドアンカー中段外側2本緊張	
STEP-6	PC板3/5枚架設	
STEP-7	グラウンドアンカー上段4本緊張	グラウンドアンカー上段内側2本緊張
STEP-8	PC板2/5枚架設	
STEP-9		グラウンドアンカー上段外側2本緊張
STEP-10	第2外ケーブル2本緊張	
STEP-11	内ケーブル緊張	
STEP-12	橋面工施工	
STEP-13	吊り足場撤去(死荷重作用時)	

3.2.4 第1外ケーブル架設および緊張工

本橋に用いられた第1外ケーブルは合計4本である。これらの外ケーブルは、橋台間に張り渡したφ21.8mmシングルストランドに5m間隔で滑車を介して取り付けられたワイヤーにより保持し、ウインチにて引き出し架設した(写真-2)。前項でも記した通り、第1外ケーブルの緊張作業はグラウンドアンカーとの関係応力を保ちながら各ステップ毎に行った。

緊張管理は、設計計算書に示された基準温度と実施工時の温度との差を考慮して補正した緊張力およびサグ量に基づいて行った。補正に用いる温度として部材温度であるケーブル温度が必要なため、内部に熱電対を設置したダミーを用意して測定した(写真-3)。

緊張後の支間中央部のサグ量測定は困難であった。そのため、あらかじめ4本のケーブル長を正確に測定し、緊張後のアンカープレート背面のネジ出代量が所定の値にほぼ等しくなることを確認し、ケーブル同士のサグ量差が小さくなるように管理を行った。その理由としては、張り渡し時の4本のケーブルにサグ量の差があると、プレキャスト版をスライド架設するとき、4本のケーブルに均等に荷重がかからなかったり、傾きながらスライドしていく危険性があるためである。写真-4に、第1外ケーブル架設完了後の鉛直偏向部付近の状況を示す。



写真-2 第1外ケーブルの架設



写真-3 温度測定用ダミーケーブル

3.2.5 プレキャスト版架設工

プレキャスト版(L=1.99m W=3.4m 重量 37.6kN)の取卸し・架設は、A2 橋台背面に設置した 50t 吊りクレーンを用いて行った。プレキャスト版は、その製作時に埋め込んでおいたインサートに吊金具を設置してクレーンにて吊り上げ、ケーブルサドル・吊り足場材・橋面手摺り材を取り付けた後、第1外ケーブル上に設置した(写真-5)。その後、予めプレキャスト版直下に仮置きしておいた鉛直材を、小型レバーブロックを用いて引き上げて取付けた後、複胴ウインチを用いて第1外ケーブル上をスライドさせて架設した。



写真-4 第1外ケーブルの鉛直偏向部



写真-5 鉛直材の設置



写真-6 目地幅調整用ボルト



写真-7 プレキャスト版縦ずれ防止用連結金具



写真-8 プレキャスト版架設状況



写真-9 プレキャスト版架設完了

プレキャスト版の橋軸直角方向位置は、第1外ケーブルとプレキャスト版に設置してある接合キーによっ

てほぼ決まるので調整の必要は無かったが、プレキャスト版の目地間隔(約 10 mm)はプレキャスト版に設置したボルトの突出量で微調整を行い、目地間隔を確保した(写真-6)。また、プレキャスト版架設後のずれ止めには、第2外ケーブル緊張時にプレキャスト版同士の力の伝達機能も兼ねた金具にて縦ずれ防止措置を行った(写真-7)。

また、写真-8にプレキャスト版架設状況を、写真-9にプレキャスト版架設完了の状態を示す。

3.2.6 吊り足場組立工

吊り足場の組立は、全プレキャスト版架設完了後に行い、プレキャスト版架設時に設置しておいた吊りチェーンと横方向単管パイプに縦方向単管パイプと足場板を敷設して行き、第2外ケーブル架設用の下段足場と、足場解体用の上段足場を組み立てた(写真-10)。施工時期が台風シーズンであり、吊足場下面からの吹き上げによる揺れ等も懸念されたので、足場板は全面敷きとせずに風通り抜けの隙間を確保した。



写真-10 吊り足場設置状況



写真-11 第2外ケーブルの緊張

3.2.7 第2外ケーブル架設および緊張工

第2外ケーブルの架設は、吊り足場内にケーブル被覆材保護のためのやわら材を設置してウインチにて引き出し、レバーブロックを使用して鉛直材下に設置したケーブルサドルに取り付けた。ケーブルサドルへの第2外ケーブル取付けは、設計サグ時に鉛直材が垂直になるように緊張時のケーブル伸び量を考慮したマーキングを第2外ケーブル表面に施し、その位置に合わせて鉛直材ケーブルサドルと第2外ケーブルを仮固定した。

第2外ケーブルの緊張は、橋体左右に偏心荷重が作用しないようにジャッキ4台を使用して同時に緊張作業を行った(写真-11)。緊張後に橋本体がスパン中央で1m程度上昇するため、緊張力の導入は段階に従って導入し、サグ量の計測、鉛直材や橋面の状態を観測しながら行った。緊張管理は、ケーブル張力の余裕が大きいため主にサグ量で管理した。サグ量設定時の温度計測には、第1外ケーブル緊張時同様、第2外ケーブル設置位置側面にダミー鋼材を取付け、そのダミー鋼材の温度を測定して補正した。

第2外ケーブル緊張後に、鉛直材ケーブルサドルのボルト本締付を行ったが、PE被覆されたケーブルをボルトで締め付けた場合、時間と共にボルト軸力が減少してしまうので、吊足場解体直前に再締付を行い有効軸力の確保を行った。サドルと締付ボルトの間の隙間に止水処理を行った。

3.2.8 端部場所打ち部の施工

本橋は、内ケーブル緊張力による弾性短縮とクリープ・乾燥収縮による床版の短縮量が大きいため、可動端であるA1側端部長を短縮量分考慮して施工した。支保工はプレキャスト版端部にセラミックインサートM12を設置して、ボルトにて吊下げた吊り支保工とし、日中の温度変化による床版高さの変化に対応するため、コンクリート打設直前に吊りボルトの締付けを行った。

3.2.9 プレキャスト版目地工

プレキャスト版目地は約 10mm と狭いため、流動性の良いプレミックスタイプの無収縮モルタルを使用し、施工を行った。

目地シール材にはコンプリフォーム(写真-12, 13)を使用した。コンプリフォームはプレキャスト版架設時にプレキャスト版に貼付けて架設し、無収縮モルタル打設時はプレキャスト版下からの漏れがないか確認しながら行った。



写真-12 目地シール材設置状況

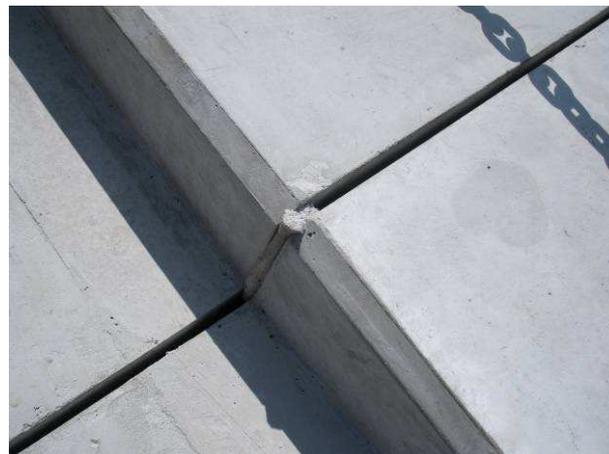


写真-13 目地シール材つぶれ状況

3.2.10 内ケーブル挿入・緊張工および PC グラウト工

内ケーブルはケーブル製作工場にて所定の長さに切断・先端加工した物を現場へ搬入し、ウインチにて引き出し、端部場所打ち部と目地無収縮モルタルの圧縮強度確認後緊張した。定着体は、セット量が 4mm と比較的小さい FKK7V13 を使用し、両引きにて緊張した。内ケーブル PC グラウトの注入は高さの低い A1 側より行い、ケーブル長が 83m と長いのでプレキャスト版中間付近に設置しておいた再注入口よりステップバイステップ方式にて行った。

3.2.11 張力調整工

張力調整工は、橋梁完成時での橋梁形状すなわちサグ量を、計画値に合わせるために行った。

第1・2外ケーブルともに、橋台5次施工(図-4参照)前まではジャッキの装着が可能であり、どちらも張力調整が可能であった。ケーブル張力の調整量に比例するサグ量の変化量は、第1外ケーブルに比べて偏心量の大きな第2外ケーブルが大きく、また供用時における張力の許容値に対する余裕量も大きいため、第2外ケーブルの張力調整を行うこととした。

張力調整時には、舗装荷重のみが未載荷の状態である。すなわち橋梁完成時でのサグ量の誤差に影響を与える主な荷重として、舗装荷重および温度変化のみを考慮することとなった。

目標サグ量の計算において、考慮する舗装荷重には設計時の値を用いた。温度補正計算では、コンクリート床版内部温度と、第1・2外ケーブルと同条件に設置したダミー鋼材温度の計測値を用いた。

張力調整工においては、第2外ケーブルの張力調整にともなうサグ量を計測し、目標サグ量に対する誤差が許容値内となることを確認し完了した。

なお張力調整は、日中の温度変化や日射による影響を避けるために、比較的 temperature 変化の少ない早朝に実施した。

3.2.12 橋面工

張力調整完了後、外ケーブル防錆材の注入、外ケーブル緊張スペースである橋台5次施工のコンクリート

打設後に橋面防水・舗装を施工した。外ケーブル防錆材にはポリブタジエン系防錆材(中国塗料サーモスルーM75)を使用した。

舗装工の施工は、プレキャスト版にかかる輪荷重をできるだけ少なくするように配慮し、2t ダンプで運搬してきたアスファルト合材を現場付近で積み替えて橋面上に搬入し、小型の施工機械にて敷き均し・転圧作業を行った。

4. 施工管理

4.1 出来形管理

出来形管理は、(社)プレストレストコンクリート技術協会「PC 吊床版橋設計施工基準(案)」に則り行った。吊床版の部材位置および部材寸法の施工精度は、表-4の値を採用した。サグ管理は通常の吊床版橋とは異なり、ほぼ橋梁が完成した地点で張力調整を行うことができるので、おおよそ設計通りのサグ量で施工完了する事ができた(表-5)。

表-4 吊床版の部材位置および部材寸法の施工精度

項目	許容誤差
平面位置	±30mm
計画高さ ^{注1)}	±50mm
吊床版のサグ ^{注2)}	設計サグの±3%
部材の長さ	設計寸法の±1%または±30mmのうち小さい方の値
断面寸法 ^{注3)}	設計寸法の±2%または-10~+20mmのうち小さい方の値
吊床版厚	±10mm

注1)橋台・橋脚位置

注2)測定時のクリープ・収縮の進行度および温度などにより補正する

注3)吊床版厚を除く

表-5 ダミー鋼材温度およびコンクリート床版温度変化毎のサグ量計算値と実測値

	ダミー鋼材 温度 (°C)	コンクリート 床版温度 (°C)	想定温度 (°C)	サグ量		
				計算値 (mm)	実測値(mm)	
					L側	R側
第2外ケーブル緊張後	30	-	30	1060	1056	1061
吊り足場解体後	15	14	15	1014	1004	1011
サグ量調整後(舗装施工前)	17	17	17	971	966	972
舗装完了後	外気温 8°C		8	1021	1022	1017

4.2 管理のためのサグ量計算

吊床版橋の出来形管理に用いるサグ量の計算では、管理の正確さを確保するために、応力検討のため設計時に考慮された荷重条件を、実際に作用する条件に合わせる必要が生じる。そのためには、より細かいステップでの温度変化の影響や、部材間の温度差の影響、および実際に載荷される橋面荷重等を考慮しなければならない。加えて、実際の挙動に近い材料特性の設定や構造系の再現が必要となる。

以下に、サグ量計算について説明する。

解析モデルとして、元設計と同様に、床版を梁要素、鉛直部材および外ケーブルをトラス要素とした2次元骨組みを用いた。算出には、有限変形解析を行うことができる、下記のソフトウェアを使用した。

- CTC ソリューションズ FANCY/BRIDGE
- JIP テクノサイエンス DIANA

前者は、第1外ケーブル緊張から第2外ケーブル緊張までの施工段階(図-3)での計算に用い、後者は、設計計算の再現を兼ねて、全ての施工段階における計算に用いた。複数のソフトウェアを用いた理由は、第1外ケーブル緊張から第2外ケーブル緊張までの施工段階における第1外ケーブル固定間距離を、元設計よりも正確に再現し、その影響を確認する必要があると考えられたからである。計算の結果、モデルの相違による第1外ケーブルの張力の差は5%程度であったため、問題とはならないことが確認された。

次に、元設計から変更した荷重を表-6に、材料特性を表-7に示す。

表-6 変更荷重

項目	元設計	本検討
吊足場	2000 N/m	1800 N/m
高欄	1000 N/m	305 N/m

表-7 変更材料特性

項目	元設計	本検討
外ケーブル弾性係数	2.00×10^{11} N/m	1.85×10^{11} N/m

以上の値を用いて、完成時に所定のサグ量となるように、各施工段階でのケーブル張力およびサグ量を定めた。

サグ量に与える温度10℃からの温度変化による変化の影響は、事前に温度変化量5℃きざみで算出し、現場における実測温度に対応するサグ量の算出では、直線補間を行った。なお、温度変化範囲については、施工時の温度変化域を考慮して行った。

また、部材間の温度差の影響について、日照の影響により、コンクリート床版等の部材に対して第2外ケーブルは、最大20℃程度の温度上昇を示すことが予想された。そのため、それらの部材間の温度差として+10℃および+20℃のケースについてサグ量の計算を行った(表-8)。

表-8 完成時における各気温のサグ量計算値

温度条件	設計サグ量(mm)
温度上昇 部材温度 25℃(基準温度+15℃)	1067
温度上昇 部材温度 20℃(基準温度+10℃)	1052
温度上昇 部材温度 15℃(基準温度+5℃)	1038
完成時(舗装施工後)基準温度 10℃+0℃	1025
温度低下 部材温度 5℃(基準温度-5℃)	1011
温度低下 部材温度 0℃(基準温度-10℃)	997
温度低下 部材温度 -5℃(基準温度-15℃)	984

なお、一次ケーブル緊張時における、ケーブルの温度変化がサグ量および張力に与える影響については、「5. ケーブル理論」に述べる手法により算出した。

4.3 FEMによる地盤解析

吊り床版橋では、床版からの大きな水平力を、橋台を通じてグラウンドアンカーで受け止めなければならない。下部工施工時には、グラウンドアンカーの施工と外ケーブルの施工を交互に行い、下部工に過大な地盤反力が生じないように施工する必要がある。本橋では、一般的な安定計算の他に地盤を弾塑性体と仮定してFEM解析を行い、各施工段階の地盤反力度や変形挙動を把握し、橋台の安定を確認した。

解析条件としては、原地盤が、左岸側が流紋岩 CL 級(R1)、右岸側が流紋岩 CH 級(R2)であり、地下水の関係がないことから全応力解析モデルでの解析を行った。解析手法は、3次元のFEM解析とし、アンカー要素を自由な位置に入れて解析することが可能なウェーブフロント法を採用した。解析モデルを、図-7に示す。橋台に作用する荷重は、表-3に示す順序で載荷した。

解析結果としては、A1橋台背面の地盤は盛土された地盤であり、支持地盤もA2橋台の地盤と比較し変形係数が小さかった。このため、グラウンドアンカーの緊張により、橋台が背面側に移動することが確認された。外ケーブルの施工により、前面に移動するが、最終的に変位は背面側に生じていて安定しているといえる。A2橋台の支持地盤は非常に固く、変形係数も大きい。このため、橋台の沈下も少なく、移動量が少ないことが確認された。支持地盤は安定しており、グラウンドアンカーの緊張や外ケーブルの施工による橋台上部の変形に支配されているといえる。

地盤反力度は、A1、A2橋台とも、橋台前面と背面の端部に大きく発生し、中央部にはあまり大きく発生していないことがわかった。グラウンドアンカーを緊張することで、橋台背面へ地盤反力度が集中し、外ケーブルの施工で、橋台前面側の反力度が増加する。フレーム計算や橋台の安定計算では、橋台底面は剛体であり、地盤に作用する荷重は台形分布や三角形分布で作用させている。しかし、今回のFEM解析の結果では、橋台中央部には、あまり大きな反力度が発生していないことが確認された。これは、橋台が実際には剛体ではなく、グラウンドアンカーと外ケーブルの作用力で、曲げにより変形し、地盤反力度に影響していると考えられる。しかし、FEM解析による地盤反力度の最大値は、許容地盤反力度以下であり、橋台は安定していることが確認された(図-8)。

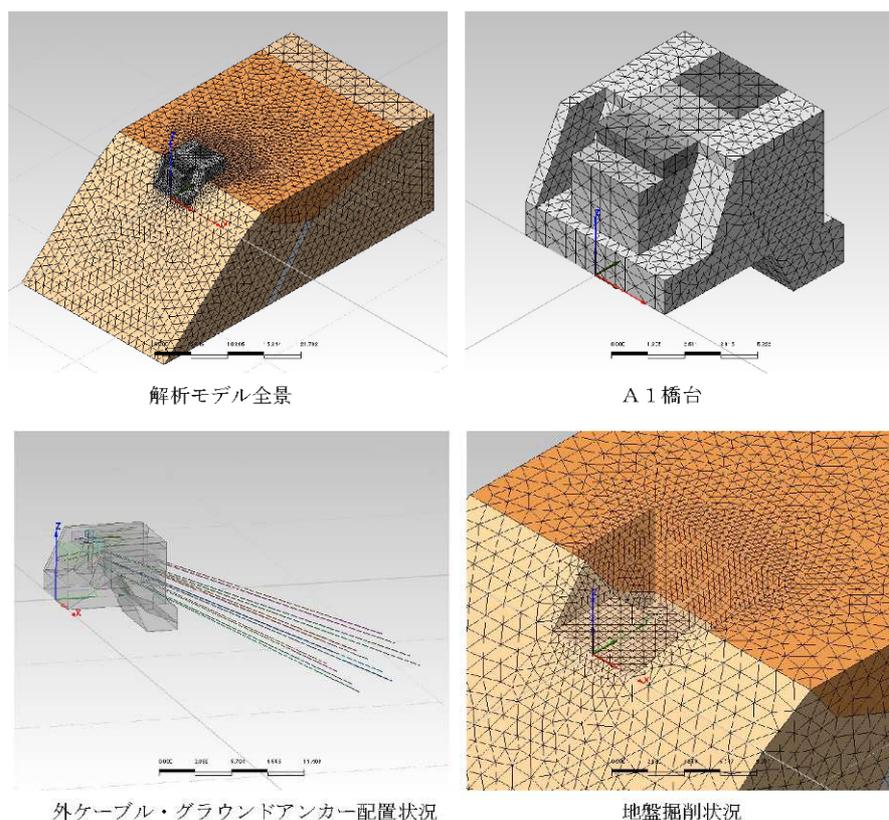
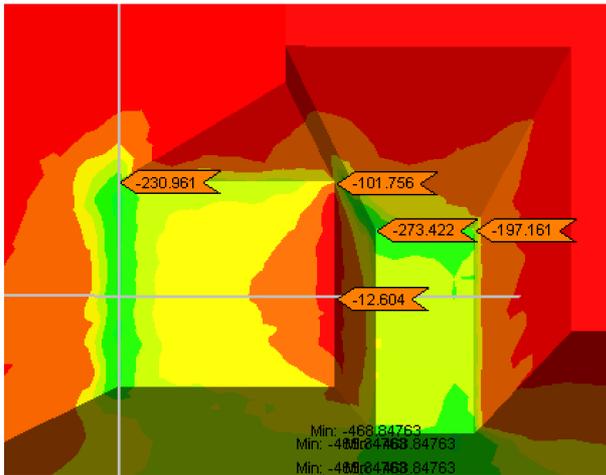
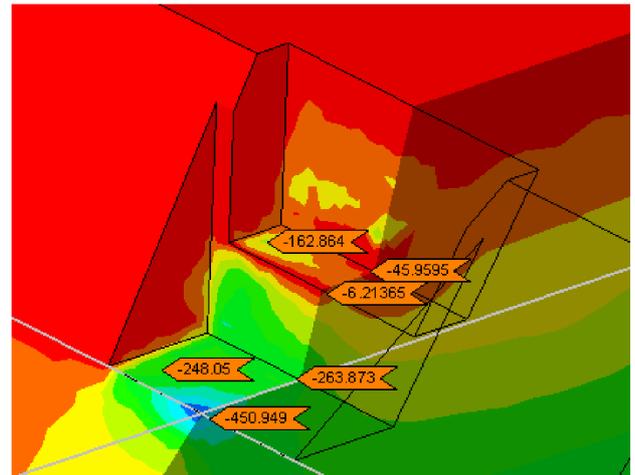


図-7 解析モデル



(a)A1 橋台 Z 方向(鉛直方向)



(b)A2 橋台 Z 方向(鉛直方向)

図-8 鉛直方向地盤反力度の解析結果(死荷重作用時 ステップ 13)

注) 圧縮が負, 単位は kN/m², 許容値 600 kN/m²

5. ケーブル理論

5.1 基本式

ここでは、吊支間に対して曲げ剛性を十分無視できる吊床版構造で、吊床版の伸び剛性が比較的大きく、吊り形状は放物線、自重分布を水平方向に等分布であると見なせる程度にサグ量 f が小さい場合の、吊床版橋の力学特性を表す基本式について説明する。

吊支間 L の場所に、単位長さ当たりの自重 q_0 の吊床版橋を、支間中央でのサグ量 f で張り渡すために必要な水平力 H_0 は、近似的に式(1)で表される。

$$H_0 = \frac{q_0 \cdot L^2}{8 \cdot f} \quad \text{式(1)}$$

ここに、

H_0 : 水平力(kN)

q_0 : 等分布荷重(kN/m)

L : 吊り支間(m)

f : サグ量(m)

このときの、吊床版の全長 L' (m)は、式(2)で表される。

$$L' = L \cdot \left[1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 - \frac{32}{5} \left(\frac{f}{L} \right)^4 + \frac{256}{7} \left(\frac{f}{L} \right)^6 \right] \quad \text{式(2)}$$

集中荷重 P が支間中央に作用するとき、作用位置の吊床版に発生する曲げモーメントは、F.Stüssi による曲げ剛性のあるケーブルとしての取り扱いから、式(3)で算出できる。

$$M = 0.50 \cdot P \cdot \sqrt{\frac{EI}{Z}} \quad \text{式(3)}$$

ここに、

P : 集中荷重(kN)

EI : 吊床版の曲げ剛性(kN・m²)

Z : 吊床版の引張力(kN)

次に、等分布荷重が q_0 から q_1 に変化し、部材温度が ΔT 変化したことにより、水平反力が H_0 から H_1 に変化する時、荷重変化による形状変化が小さい場合、式(4)の関係が導かれる。

$$\gamma^3 - \left[1 - \frac{E \cdot A}{2 \cdot L \cdot H_0} \int_0^L \left(\frac{\bar{Q}_0}{H_0} \right)^2 dx - \frac{\alpha \cdot E \cdot A}{L \cdot H_0} \Delta T \cdot L \right] \cdot \gamma^2 - \frac{E \cdot A}{2 \cdot L \cdot H_0} \int_0^L \left(\frac{\bar{Q}_1}{H_0} \right)^2 dx = 0 \quad \text{式(4)}$$

ここに、

- γ : $= H_1 / H_0$
- H_0 : 荷重変化前の水平反力(N)
- H_1 : 荷重変化後の水平反力(N)
- L : 吊支間(m)
- E : 吊床版のヤング係数(N/mm²)
- A : 吊床版の断面積(mm²)
- $E \cdot A$: 吊床版の伸び剛性(N)
- \bar{Q}_0 : Lを支間とした単純梁の荷重変化前のせん断力(kN)
- \bar{Q}_1 : Lを支間とした単純梁の荷重変化後のせん断力(kN)
- α : 吊床版の線膨張係数
- ΔT : 荷重変化前後の温度変化(°C)

等分布荷重 q_i により生じる、位置 x におけるせん断力は、次式で表される。

$$\bar{Q}_i(x) = \frac{q_i \cdot L}{2} - q_i \cdot x \quad \text{式(5)}$$

式(5)を用いて、ケーブル支間にわたり積分を行った結果を、式(6)に示す。

$$\begin{aligned} \int_0^L \left(\frac{\bar{Q}_i}{H_0} \right)^2 dx &= \frac{1}{H_0^2} \cdot \int_0^L [\bar{Q}_i(x)]^2 dx = \frac{1}{H_0^2} \cdot \int_0^L \left[\frac{q_i \cdot L}{2} - q_i \cdot x \right]^2 dx \\ &= \frac{1}{H_0^2} \cdot \int_0^L \left[\frac{q_i^2 \cdot L^2}{4} - q_i^2 \cdot L \cdot x + q_i^2 \cdot x^2 \right] dx \\ &= \frac{1}{H_0^2} \cdot \left[\frac{q_i^2 \cdot L^2}{4} \cdot x - \frac{1}{2} \cdot q_i^2 \cdot L \cdot x^2 + \frac{1}{3} \cdot q_i^2 \cdot x^3 \right]_0^L \\ &= \frac{1}{H_0^2} \cdot \left[\frac{q_i^2 \cdot L^3}{4} - \frac{1}{2} \cdot q_i^2 \cdot L^3 + \frac{1}{3} \cdot q_i^2 \cdot L^3 \right] \\ &= \frac{1}{H_0^2} \cdot \left[\frac{3 \cdot q_i^2 \cdot L^3}{12} - \frac{6 \cdot q_i^2 \cdot L^3}{12} + \frac{4 \cdot q_i^2 \cdot L^3}{12} \right] \\ &= \frac{q_i^2 \cdot L^3}{12 \cdot H_0^2} \end{aligned} \quad \text{式(6)}$$

5.2 計算例

5.2.1 荷重変化量がわかっていて、変化後のサグ量とケーブル張力が未知の場合の計算例

本橋では、基準温度(10°C)のときの死荷重時において L/2 点のサグ量を 1.025m になるように施工管理を行った。実際には、夏季に第1外ケーブルの緊張、プレキャスト版の架設を行うため、その時点での温度と荷重で、ケーブル張力とサグ量の設計値を求め管理しなければならない。したがって、死荷重作用時から第1外ケーブル張り渡しまで解体計算を実施し、それに温度の影響を加味して、その時点での設計値を求めた。

実際には、幾何学的非線形を考慮できる構造解析ソフトを利用して求めたが、ここでは、計算例の1例として、設計計算書に示されたプレキャスト版+吊足場載荷状態(ステップ3)からプレキャスト版+吊足場載荷前すなわち第1外ケーブル緊張時(ステップ2)を手計算で求める。これは、除荷計算となる。

計算に用いた各数値を以下に示す。なお、この着目ステップでは吊床版構造の剛性として考慮する部材はケーブルのみである。

$$\begin{aligned}
 \text{吊支間 } L &= 82.0 \text{ m} \\
 \text{ケーブルのヤング係数 } E &= 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{ケーブル断面積(4本) } A &= 8761.2 \text{ mm}^2 \\
 \text{ケーブルの伸び剛性 } E \cdot A &= 1752240 \text{ kN} \\
 \text{ケーブルの線膨張係数 } \alpha &= 12 \times 10^{-6} \\
 \text{荷重載荷前後の温度変化 } \Delta T &= 0 \text{ }^\circ\text{C} \\
 \text{初期荷重時のサグ量 } f &= 2.213 \text{ m} \\
 \text{初期においてケーブルに作用する荷重 } q_0 &= 22.7964 \text{ kN/m} \\
 \text{除荷後のケーブルに作用する荷重 } q_1 &= 0.75656 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

初期荷重時の水平力は、式(1)により計算できる。

$$H_0 = \frac{q_0 \cdot L^2}{8 \cdot f} = \frac{22.7964 \times 82.0^2}{8 \times 2.213} = 8658 \text{ kN}$$

また、式(4)の各項の値は、式(6)等を使用して計算できる。

$$\frac{E \cdot A}{2 \cdot L \cdot H_0} = \frac{1752240}{2 \times 82.0 \times 8658} = 1.234048$$

$$\int_0^L \left(\frac{\bar{Q}_0}{H_0} \right)^2 dx = \frac{q_0^2 \cdot L^3}{12 \cdot H_0^2} = \frac{22.7964^2 \times 82.0^3}{12 \times 8658^2} = 0.318535$$

$$\int_0^L \left(\frac{\bar{Q}_1}{H_0} \right)^2 dx = \frac{q_1^2 \cdot L^3}{12 \cdot H_0^2} = \frac{0.75656^2 \times 82.0^3}{12 \times 8658^2} = 0.000351$$

$$\frac{\alpha \cdot E \cdot A}{L \cdot H_0} \cdot \Delta T \cdot L = 0$$

上記の値を式(4)に代入し、 γ を求める。

$$\begin{aligned}
 \gamma^3 - \left[1 - \frac{E \cdot A}{2 \cdot L \cdot H_0} \int_0^L \left(\frac{\bar{Q}_0}{H_0} \right)^2 dx - \frac{\alpha \cdot E \cdot A}{L \cdot H_0} \Delta T \cdot L \right] \cdot \gamma^2 - \frac{E \cdot A}{2 \cdot L \cdot H_0} \int_0^L \left(\frac{\bar{Q}_1}{H_0} \right)^2 dx &= 0 \\
 \gamma^3 - [1 - 1.234048 \times 0.318535 - 0] \cdot \gamma^2 - 1.234048 \times 0.000351 &= 0 \\
 \gamma &= 0.608
 \end{aligned}$$

γ は水平力の比であるから、除荷後の水平力は下記の要領で計算できる。

$$H_1 = \gamma \cdot H_0 = 0.608 \times 8658 = 5264 \text{ kN} \quad (\text{設計値 } 5250 \text{ kN に対し } 1.003)$$

式(1)より、除荷後のサグ量は以下の値となる。

$$f = \frac{q_1 \cdot L^2}{8 \cdot H_1} = \frac{0.75656 \times 82.0^2}{8 \times 5264} = 0.121 \text{ m} = 121 \text{ mm} \quad (\text{設計値 } 121 \text{ mm に対し } 1.000)$$

5.2.2 荷重変化がなく、温度の変化がある場合の計算例

一次外ケーブル緊張時の状態で、すなわち荷重一定の下でケーブル温度が変化する場合の、水平力およびサグ量の変化を計算する。

ここで計算に用いる各数値を以下に示す。なお以下に示していない値は、前項に挙げた数値を用いた。

$$\text{初期においてケーブルに作用する荷重 } q_0 = 0.75656 \text{ kN/m}$$

$$\text{除荷後のケーブルに作用する荷重 } q_1 = 0.75656 \text{ kN/m}$$

$$\text{水平力 } H_0 = 5250 \text{ kN/m(設計値)}$$

ここで、式(4)の温度変化の項を除く部分は、以下の値となる。

$$\frac{E \cdot A}{2 \cdot L \cdot H_0} = \frac{1752240}{2 \times 82.0 \times 5250} = 2.03512$$

$$\int_0^L \left(\frac{\bar{Q}_0}{H_0} \right)^2 dx = \int_0^L \left(\frac{\bar{Q}_1}{H_0} \right)^2 dx = \frac{q_1^2 \cdot L^3}{12 \cdot H_0^2} = \frac{0.75656^2 \times 82.0^3}{12 \times 5250^2} = 0.00095418$$

一次外ケーブル緊張時の、基準温度からの温度変化量に対する、それぞれの水平力とサグ量を表-9に示す。これより、ケーブル温度が5°C上がるごとに、張力は約100kN減少し、サグ量は2~3mm増加することがわかった。実施工では、緊張時のケーブル温度を測定し、表-9の値を用いて補正を行った。なお計測温度が、計算を行った温度変化量の間接値の場合には、直線補間により補正量を求めた。

表-9 一次外ケーブル緊張時の各温度の水平力およびサグ量

温度変化 ΔT	基準温度 (10°C)	+5°C (15°C)	+10°C (20°C)	+15°C (25°C)	+20°C (30°C)
$\frac{\alpha \cdot E \cdot A}{L \cdot H_0} \cdot \Delta T \cdot L$	-	0.02003	0.04005	0.06008	0.08010
γ	-	0.980	0.960	0.940	0.920
水平力 H_1 (kN) $H_1 = \gamma \cdot H_0$	5250	5145	5040	4935	4830
サグ量 f (mm) $f = \frac{q_1 \cdot L^2}{8 \cdot H_1}$	121	124	126	129	131

()内の数字はケーブル温度

6. おわりに

本工事は、平成20年12月に無事完成した(写真-14~17)、自然環境と調和するスレンダーな外観と、バリアフリー対策である緩和された縦断勾配を可能とする構造を有した本橋は、地元の方々を含め、この橋を利用する人々から、末永く愛されると思われる。



写真-14 完成状況(1)



写真-15 完成状況(2)



写真-16 完成状況(3)



写真-17 完成状況(4)

謝辞

本橋の施工では、石川県土木部石川土木総合事務所ならびにアルスコンサルタンツ(株)の皆様には多大なご支援をいただいている。また、大阪支店土木工事部の荒井信章工事長(当時本社基礎部)には、FEMによる地盤解析をしていただいたが、共同執筆者の人数の関係で載せられなかった。この場を借りて、これら関係各位に心より感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 熊谷, 小嶋, 星野, 柳内, 二階堂, 町: 外ケーブル併用吊床版橋(森のわくわく橋)の設計と施工, 橋梁と基礎, 2002.9
- 2) 小川, 神谷, 吉川, 中村: のぞみ橋の設計と施工-移築再利用を考慮した端部分離型上路式 PC 吊床版橋-, 橋梁と基礎, 2004.5
- 3) F.Stüssi, Baustatik I., 中島: 吊床版橋について, 道路, 昭和36年8月号