

ピロン工法によるアーチ橋の張出し施工

— 新小倉橋 —

今井 義明*1・海部 知之*2・笠倉 和義*3・西川 伸之*4

1. はじめに

新小倉橋は、神奈川県北部に位置し、津久井湖の1.5km下流で相模川を横断する。中央の主橋梁はスパン150mのコンクリートアーチ橋である。2橋の同形状のアーチ橋が30cmのクリアランスをとって、平行に架設される。1橋は2車線の車道と3m幅の歩道からなり、幅員は11.25mである(写真-1)。現存する小倉橋の渋滞緩和対策とともに、すぐ近くに、さがみ縦貫道路(首都圏中央連絡自動車道)のインターチェンジが計画されていることから、その連絡道路としても期待されている。

本橋のアーチリブはピロン工法で施工した。ピロン工法は、アーチリブをピロン柱や橋脚から斜吊り材(フォアステイ材)で吊り上げながら、川の両岸から張出し施工をするものである。ピロン工法はコンクリートアーチ橋の代表的な構築法であるが、日本における実施例はまだ数橋で、開発途上の技術である。

工事全般の説明は他稿に譲り、本稿はほとんど終了したピロン工法によるアーチリブの施工に限定して記述する。さらに、3章でピロン工法の特徴である斜吊り材とピロンの架設、4章でバックステイ構造に関する検討結果を示す。また5章では、レベル管理について詳述する。

2. 新小倉橋工事概要

工事名称：一般県道長竹川尻線新小倉橋新設(本体部)工事
 発注者：神奈川県津久井土木事務所
 施工場所：神奈川県津久井郡城山町小倉・川尻
 工期：平成7年12月20日～平成12年3月15日
 橋格(活荷重)：第3種第2級(B活荷重)
 橋長：193m
 アーチスパン：150m
 幅員： $(0.40+3.00+7.25+0.60) \times 2 = 22.50\text{m}$
 架設工法：ピロン工法(斜吊り材を用いた張出し架設工法)

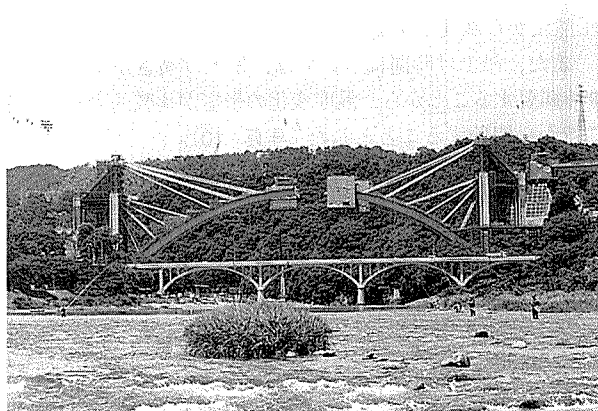


写真-1 全体写真

図-1に本橋の構造一般図を示す。

3. ピロン工法による張出し施工

3.1 ピロン工法

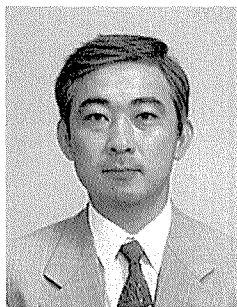
ピロン工法は、アーチスパンが100mを超える、大規模なコンクリートアーチ橋を張出し施工する場合の代表的な工法として知られている。ピロン(Pylon)は「塔」を意味するドイツ語である。

ピロン工法はすでに出来上がったアーチリブを、エンドポストまたは仮ピロンの頂部から斜吊り材で吊り上げながら、移動式作業車を使用してブロック単位で張出し施工する工法である。新小倉橋は、エンドポストや仮ピロン頂部が斜吊り材でスパン方向に引っ張られるのに抵抗して、反対側にバックステイと水平材を配置し、引張材になる橋脚にプレストレスを導入した。また全体が転倒しないように、アーチアバットをグラウンドアンカーで固定した。これらはすべて仮設材であり、アーチ閉合後、撤去するものである。グラウンドアンカーは緊張力を解放するが、橋脚のプレストレス力は完成系で利用するため残す設計となっ



*1 Yoshiaki IMAI

大成・住友・相模土建JV
新小倉橋作業所 所長



*2 Kazuyuki KAIFU

大成・住友・相模土建JV
新小倉橋作業所 課長



*3 Kazuyoshi KASAKURA

大成建設(株) 土木設計第一部
橋梁設計室 係長



*4 Nobuyuki NISHIKAWA

大成建設(株) 情報企画部
解析技術室 主任

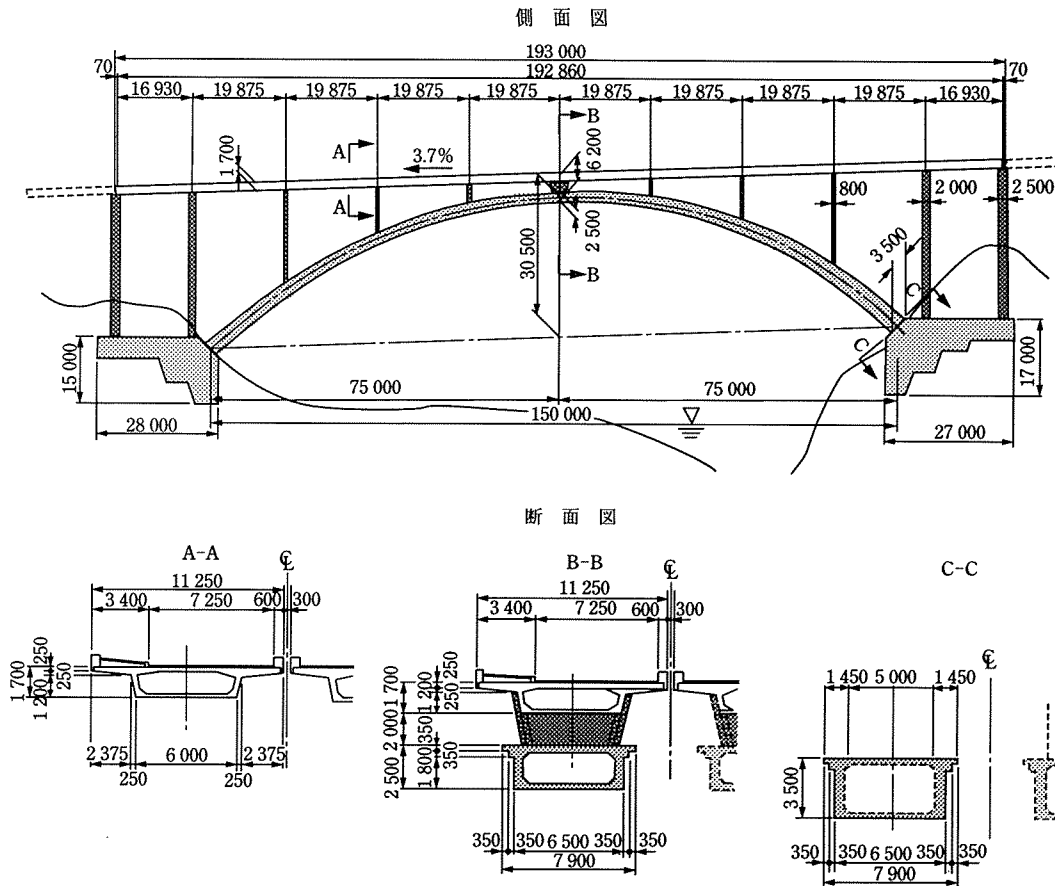


図-1 構造一般図

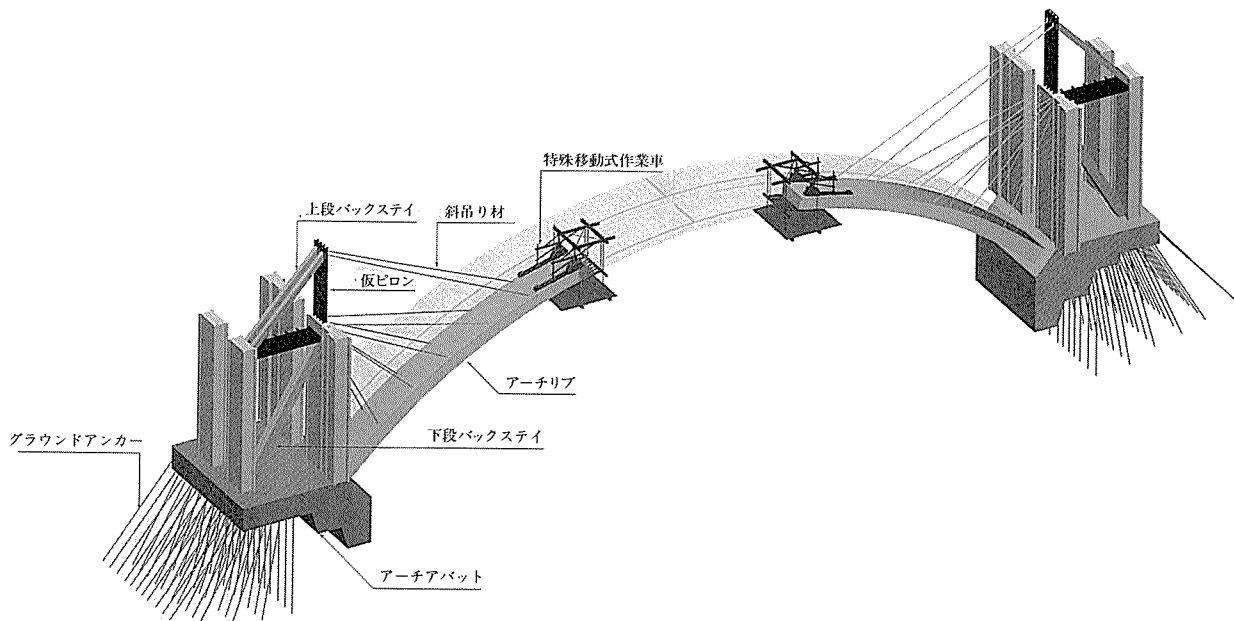


図-2 ピロン工法

ている (図-2)。

3.2 施工手順と工程

新小倉橋のアーチリブの施工手順を示す。

- ① アーチアバットをグラウンドアンカーで固定する。
- ② スプリング部 (アーチリブの基部8m区間) を支保工上で構築する。
- ③ スプリング上で特殊移動式作業車を組み立てる。

- ④ 特殊移動式作業車を使用して、長さ3.0m～3.5mのブロックで張出し施工する。
- ⑤ エンドポスト頂部と橋脚基部間に、支保工上でプレストレストコンクリート製の下段バックステイを製作する。
- ⑥ アーチリブは3ブロックごとに、エンドポスト頂部から斜吊り材で吊り上げる。エンドポスト頂部に定着

する斜吊り材は4段である。

- ⑦ アーチリブ 16ブロック打設前に、水平材、仮ピロン、上段バックステイを施工する。
- ⑧ 仮ピロン頂部から5段目斜吊り材でアーチリブを吊り上げる。
- ⑨ 16ブロックから24ブロック（左岸側は23ブロック）までの張出し施工と、6段目と7段目斜吊り材を架設緊張する。
- ⑩ アーチリブ先端で移動式作業車を解体する。
- ⑪ 中央閉合部4m区間を吊り支保工で施工する。
- ⑫ 斜吊り材の緊張力を解放して、撤去する。
- ⑬ 上段バックステイ、仮ピロン、水平材、下段バックステイの順に解体し、グラウンドアンカー張力を解放する。

スプリングの施工から斜吊り材撤去までの実工程を図-3に示す。

橋脚、エンドポストの施工は、下段バックステイ、上段バックステイとの結合部を一体に打設すること、水平材の架設を途中で挟むため、単独で工事を進めることができず、工事期間が長期にわたった。

スプリングは勾配が約45度あり、型枠工、鉄筋工などすべての作業で作業用足場と支保工が必要で、しかもそれをいく度も盛り替えねばならなかった。また上面には押さえ型枠を設置した。工事期間は、右岸、左岸それぞれ正月休み等の長期休暇を除いた暦日工程で約110日かかった。ただし、上流側橋と下流側橋のスプリングは一体構造のため、同時に施工している。

アーチリブのブロック施工は、勾配の急な1~4ブロックの1サイクルが、暦日工程で平均23日、残りのブロックが11日であった。

3.3 斜吊り材（フォアステイ）

斜吊り材は、アーチリブを3ブロック施工するごとに架設、緊張した。片側7段あり、1段目から4段目まではエンドポストの頂部に、5段目から7段目までは仮ピロンの頂部に定着する。構造は、径32mmの総ねじPC鋼棒をカップラー接続して必要な長さとし、温度による長さ変動を少なくするため発泡スチロールを被覆したものである。1段は、10~

14本の総ねじPC鋼棒から成っている。端部はアンカープレートとナットで固定するが、緊張端は上端、固定端は、アーチリブ箱形断面の腹部に埋設する。

緊張作業はセンターホールジャッキを使用した。1段片側5~7本のPC鋼棒のうち、最初に緊張するPC鋼棒にロードセルを取り付け、導入張力が他のPC鋼棒緊張力によって受ける影響を把握し、必要ならば再度ジャッキを取り付けて補正した。3段目と4段目の緊張時には、直後におのおの1段目と2段目の導入張力を調整した。

総ねじPC鋼棒は、定尺長が8mで、数本の定尺物と両端の端尺物を組み合わせる。最長の7段目は、長さが約74mで、8mの定尺物7本と4.00m~7.05mの端尺物3本で構成し、1本の重量は491kgであった。以下では斜吊り材の組立て・架設手順について詳述する（図-4）。

- ① ヤードで定尺物の鋼棒に断熱材を巻く。断熱材は発泡スチロール製で肉厚20mmのものを使用する。
- ② 移動式作業車の天井に作業用のヤードを作り、エンドポスト頂部または仮ピロン頂部と移動式作業車間にワイヤを張り渡す。
- ③ ワイヤに電動ホイスト（能力230kg）を吊り下げ、別のワイヤで各ホイストを約8m間隔につなぐ。先頭のホイストはエンドポスト頂部または仮ピロン頂部からウインチ（能力600kg）のワイヤに接続する。
- ④ まず移動式作業車上の作業用ヤードで、1本の定尺物のPC鋼棒を2基のホイストで吊り上げる。ウインチで8mだけ移動し、次のPC鋼棒をカップラーで接続する。使用するカップラーは、ねじ込み部がゆるまない特別構造のねじ付きカップラーを使用する。カップラー部はその場で断熱材を巻く。定尺物のPC鋼棒の本数分だけ、この作業を繰り返す。
- ⑤ すべてのホイストのスイッチは、移動式作業車上の作業用ヤードに置き、スイッチを操作して一番手前のホイストの吊り点を下げる。吊り下げたPC鋼棒の端部を、アーチリブに埋め込んで定着されているPC鋼棒に近づけて、両者をカップラーで接続する。
- ⑥ 次に吊り下げられたPC鋼棒の他端部と、エンドポスト頂部または仮ピロン頂部のPC鋼棒定着部を貫通して

アーチリブ工事(下流側)工程

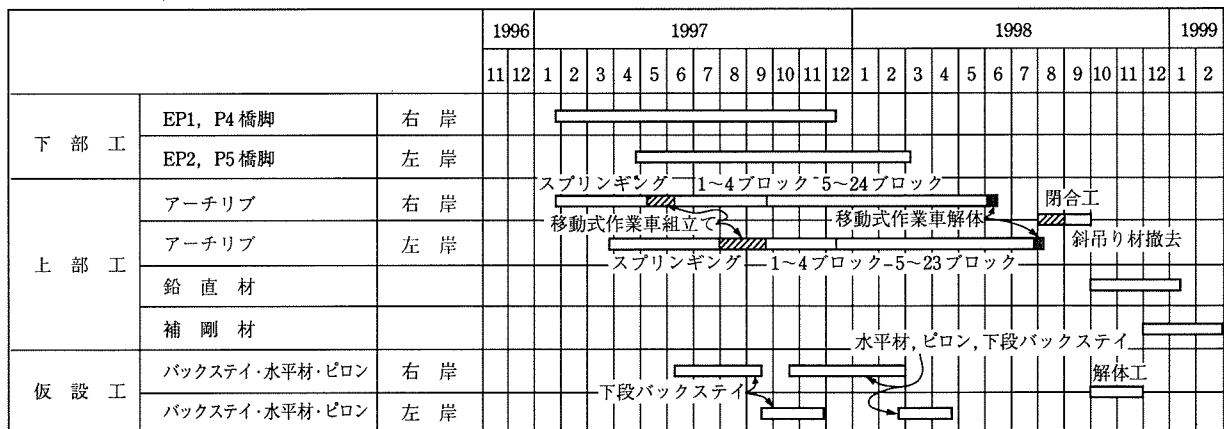


図-3 アーチリブ工程（下流側）

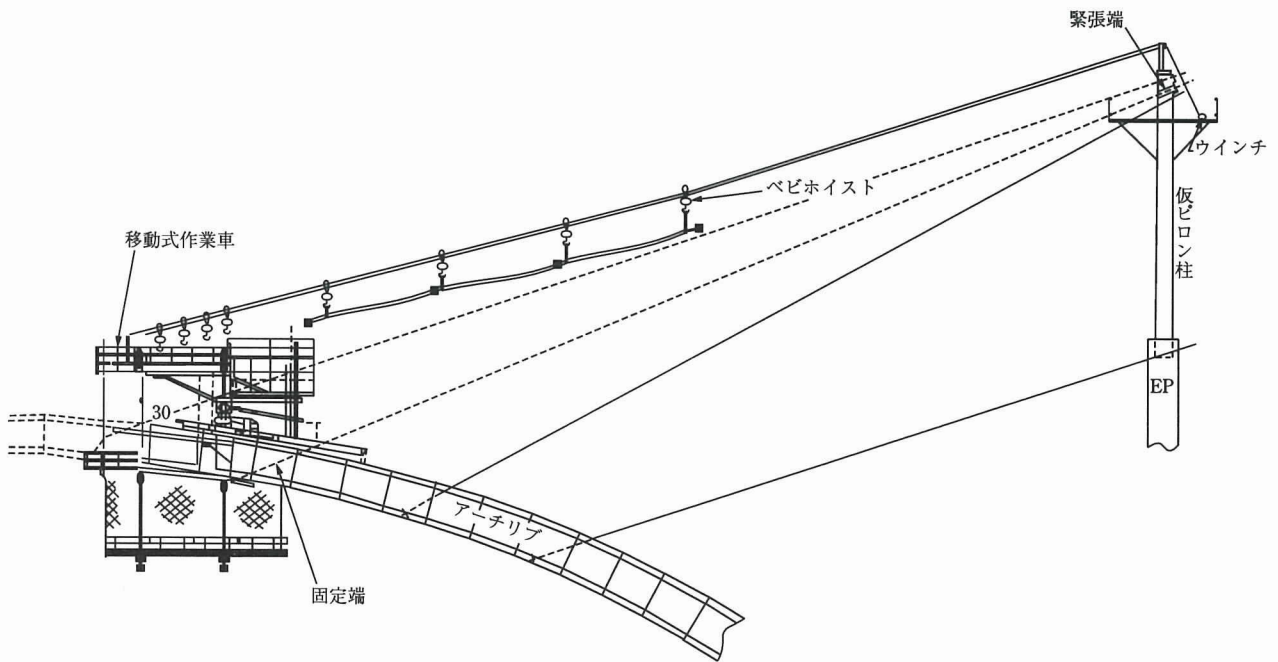


図-4 斜吊り材架設



写真-2 架 設

いるシース内のPC鋼棒を接続する。

⑦ ジャッキでサグ取りをする。

アーチリブ閉合後、斜吊り材の緊張力を解放する。作業はアーチリブへの影響を最小限にするため、中央の4段目から6段目、5段目、7段目、3段目、2段目、1段目の順番に、右岸左岸交互に行う。撤去は架設と反対の手順で実施する計画である(写真-2, 3)。

3.4 ピロン柱

仮ピロンの主部材は4本のH-900×300×16×28(SM490YA)

である。架設にケーブルクレーンを使用するため、仮ピロンは、1ピースの重量がケーブルクレーンの吊り能力以下になるように、地上ヤードで5分割して製作した。1ピースは、4本の主鋼材を、横構、ブレースで組み立て、作業床を取り付けた形状である。最上段の作業床は、ぐるりと3m幅で重量があるため、主鋼材と分離して現位置で取り付けた。ピース間は、添接板を当て高力ボルトで接続した。最下端のピースは、エンドポスト頂部に1m埋め込んでアンカーとした。

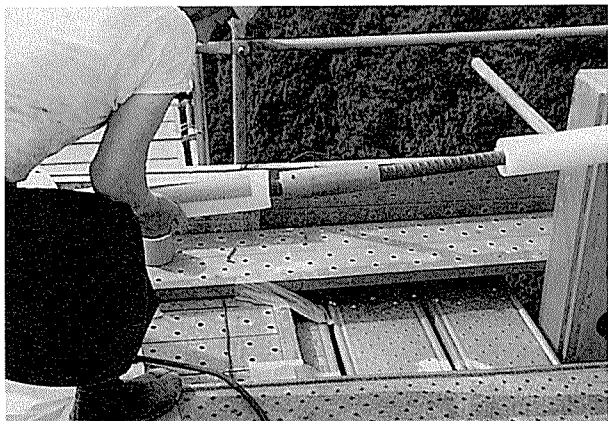


写真-3 カップラー接続

仮ピロン頂部は上段バックステイと斜吊り材のPC鋼材の定着部で、コンクリート部材である。仮ピロン頂部の製作は、上段バックステイ頂部と一体でコンクリートを場所打ちした。仮ピロン頂部と鋼材部は、24本のPC鋼棒で緊結した(写真-4、5)。

4. バックステイ構造に関する考察

4.1 概要

本橋の架設はピロン工法による張出し架設工法により行われる。ピロン工法において、張出し架設中の構造系全体の安定を保つうえで、バックステイ部材は最も重要な部材の一つである。

バックステイは、張出し中の転倒を防ぐための部材で、本橋ではアーチアバットに反力をとらせる構造としている。なお、本橋のバックステイは上下2段で構成され、いずれもPC構造で計画されている。

本検討では、バックステイ部材がPC構造であることの妥当性を検証するため、上段バックステイ部材のみを以下の2種類の構造に変更した場合の変形、断面力等他部材への影響を比較した。

① 鋼製案、② PC鋼材案

検討の結果、いずれのケースでも、構造的には成り立つことが確認できたが、本橋の場合、PC構造が最も適していることが検証できた。

4.2 検討方法および結果

上段バックステイを以下の2通りに変更し、構造的に問題のないことを確認したうえで、各部材への影響を検討する。

【ケース1】鋼製案

バックステイ部材を仮ピロン柱と同じ部材と仮定した。

4本-H900×300×16×28

$$EA = (2.1 \times 10^7 \text{ tf/m}^2) \times 0.306 \text{ m}^2 \times 4 \text{ 本}$$

$$= 2.57 \times 10^7 \text{ tf}$$

【ケース2】PC鋼材案

原案(PC部材)の構造のうち、PC鋼材のみを用いると仮定した。

12本-12S15.2mm

$$EA = (2.0 \times 10^7 \text{ tf/m}^2) \times (0.166 \times 10^{-2} \text{ m}^2) \times 12 \text{ 本}$$

$$= 3.98 \times 10^5 \text{ tf}$$

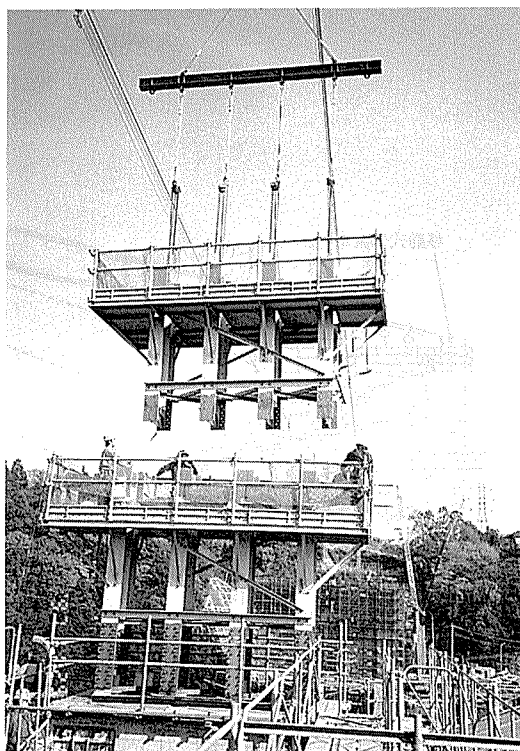


写真-4 ピロン柱組立て

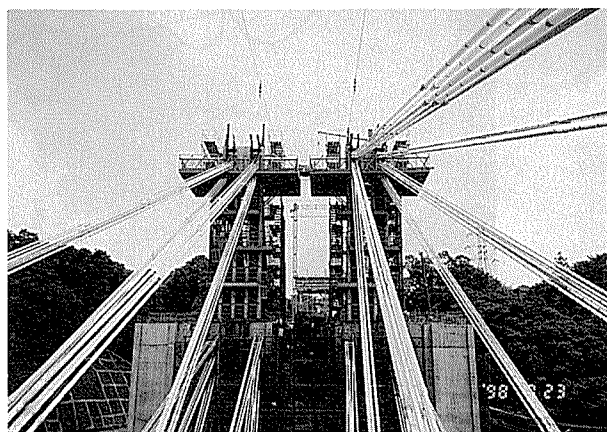


写真-5 ピロン柱

計算結果を表-1に示す。

ここで、応力変動量、変位、断面力等の各項目で原案との比較を行う。

アーチリブに発生する応力変動量は、鋼製案で最大約6kgf/cm²程度、PC鋼材案で最大約20kgf/cm²程度、原案に比べ変動幅が大きくなる。また、各施工ステップでの発生応力度を比較してみると、原案に比べ鋼製案で約7kgf/cm²程度、PC鋼材案で約30kgf/cm²程度大きくなる。これらは、バックステイ部材の剛性が小さくなるにつれて、アーチリブへの負担が大きくなるためである。

アーチリブの変位に関しては、さらにバックステイ部材の剛性が影響する。上越し量で原案に比べ鋼製案で約10mm程度、PC鋼材案で約41mm程度大きくなる。

また、1つの施工イベントに着目した場合、フォアステイ緊張では鋼製案で最大約1mm程度、PC鋼材案で約12mm程度大きくなり、コンクリート打設では鋼製案で最大約2mm

表-1 バックステイ構造の比較

応力変動量	PC部材案(原案)		鋼製案		PC鋼材案			
	上縁 (kgf/cm ²)	下縁 (kgf/cm ²)	上縁 (kgf/cm ²)	下縁 (kgf/cm ²)	上縁 (kgf/cm ²)	下縁 (kgf/cm ²)		
スプリング部	-16.0~53.9	-20.2~31.8	-16.0~51.0	-17.4~32.1	-16.0~44.7	-16.9~43.3		
1/8点(最大)	-5.5~49.9	-1.0~83.8	-5.5~47.8	-1.0~90.0	-5.5~45.2	-1.0~105.1		
1/4点	-4.6~54.1	-2.7~91.5	-6.4~54.1	-2.7~95.7	-14.6~54.1	-2.7~107.8		
クラウン部	-17.9~2.0	-2.2~69.4	-18.1~2.0	-2.2~69.3	-18.3~3.7	-3.4~69.2		
変位	最小 (mm)	最大 (mm)	最小 (mm)	最大 (mm)	最小 (mm)	最大 (mm)		
	ピロン頂部	-13.1	28.5	-0.1	54.3	-132.4	13.1	
アーチリブ上越し(最大値)	-	201.5	-	211.0	-	242.5		
断面力		N (tf)	M (tf·m)	N (tf)	M (tf·m)	N (tf)	M (tf·m)	
	ピロン付け根	Nmax	1 773	69	1 699	149	1 518	142
		Mmax	1 279	85	1 215	171	78	530
	バックステイ	引張力(tf)	1 657	*	1 752	-	1 497	-
	応力度	$\sigma_c=95\sim 19$ と変化 (kgf/cm ²)		1 203<1400×1.25=1 750 (kgf/cm ²)		75<0.4 σ_u ×1.25=95 (kgf/mm ²)		

* 初期導入プレストレス力は2 081tf(導入後、コンクリート部材には1 656tfの引張力が作用する)

程度、PC鋼材案で約16mm程度大きくなる。

断面力に着目した場合、ピロン柱への影響はバックステイ部材の剛性が小さくなるのに伴い、軸力の負担が小さくなり、逆に曲げモーメントの負担が大きくなる傾向である。バックステイ自体の挙動を見ると、原案と鋼製案が同程度なのに比べ、PC鋼材案は剛性が小さい分、負担軸力が小さくなる。

検討の結果、計算上は鋼製案・PC鋼材案いずれの案も実現可能である。

ただし、PC鋼材案の場合、張出し架設中にピロン柱とアーチリブに発生する断面力が大きくなり、適度な曲げ応力度以下に抑えるために作業手順が複雑となる。すなわち、バックステイPC鋼材は、3回に分けて緊張力を導入し、一方フォアステイも張力調整を行わなければならない。また、フォアステイの撤去時も同様に、バックステイ緊張力を数回に分けて解放する必要がある。

4.3 考 察

一般にピロン工法により張出し架設をする場合、構造系全体の剛性が低い場合、変形が大きく、たわみ管理が難しいと言われる。これはバックステイをPC鋼材のみとする場合が多いためである。一方、新小倉橋はバックステイをPC構造としているため、構造系全体の剛性が高く変形が小さい。

本検討では、上下2段あるバックステイのうち、上段バックステイのみの構造を変更した場合の影響を対象としているが、この場合、下段バックステイが依然PC構造であるため、ピロンの下側になるエンドポストの変形が小さく、構造系全体としての剛性がまだ高く、また上段バックステイの長さが短いことなどの理由により、予想されるほどたわみが大きくならなかった。下段バックステイもPC鋼材とした場合、かなり大きな変形が出ることは容易に想像できる。

今回の検討によれば、鋼製案は、H900×300×16×28の鋼材を4本使用すれば構造上成立する。しかし、ピロン柱や橋脚との接合部の構造、架設方法さらに経済性を考えると採用は難しい。

一方、PC鋼材案は、施工性、経済性では優れているが、

変形が大きく、たわみと応力の管理で、高い精度が要求される。また、不測の事態への対応が困難であると予想される。

5. レベル管理

5.1 計測管理システムの概要

ピロン工法によるアーチリブの張出し架設では、施工ステップごとに逐次構造系が変化していく。架設時の構造は、仮ピロン柱、水平材、斜吊り材の鋼部材とアーチリブ、バックステイ、橋脚、エンドポストのコンクリート部材から成る複合構造であり、高次の不静定構造となるため、その挙動は複雑である。施工ステップごとに随時計測を行い、実測値と設計値を照合しながら、安全かつ合理的な施工を行うため、計測システムを構築し、集中管理を行った。

主要部材の各所には、応力計、熱電対、ロードセル、傾斜計、ひずみ計が設置されており、これらの計測器により得られたデータは、両岸に設置された計測室内のデータ管理集中システム(コンピュータ)により、施工ステップごとに、あるいは自動計測機能として1時間ごとに一括処理され、現在の施工状況を迅速に把握することが可能となる。

以下では、計測管理のうち、とくにレベル管理に限定して述べる。

5.2 温度補正

アーチリブのレベルは、あらかじめ施工ステップごとに計算(上越し計算)され、これと実測値を比較することによって次のブロックの型枠高が決定される。しかしながら、レベルは各部材の温度変化の影響を受け、大きな変動を示すことがあるため、実測値と温度変化の影響を補正した設計値とを比較することがレベル管理を行っていくうえでの要点となる。

上越し計算によって得られたアーチリブのレベル値は、設計基準温度(20℃)を基準として計算されているため、これを測量時点での温度状況に換算して実際のレベル管理を行った。

当作業所では、次の温度補正方法を採用した。すなわち、5.1項で述べた計測管理システムにより一括処理された

各部の実測温度と設計基準温度 (20℃) からアーチリブのレベルの変動値を以下の9ケースによるものとしておのこの計算し、集計した。

① アーチリブの温度差, ② 橋脚の温度差, ③ エンドポットの温度差, ④ 下段バックステイの温度差, ⑤ 上段バックステイの温度差, ⑥ ピロン柱の温度差, ⑦ 水平材の温度差, ⑧ 斜吊り材の温度差, ⑨ アーチリブ上床版と下床版の温度差

表-2は、平成10年5月7日に実測したアーチリブ先端のレベルの日変化と計算値を示したものである。実測値10.0mm, 計算値12.8mmという結果になり、実測値と計算値には30%程度の誤差はあるものの、温度補正值として有効である、と判断して実際の型枠セットの際に用いた。

5.3 レベル計測方法

アーチ橋のレベル計測では、レベル (鉛直方向距離) の重

表-2 レベルの日変化と補正值の例

時間	実 測 値		差 (mm)	計算値
	5/7 15:00	5/8 8:00		
外気温	26.0℃	20.9℃		
35ブロック	115.208m	115.218m	10	12.8
36ブロック	114.360m	114.370m	10	11.3
37ブロック	113.448m	113.456m	8	9.8

要度はさることながら、水平方向の距離も重要になってくる。すなわち、コンクリート打設、斜吊り材緊張等の施工ステップごとにアーチリブ上にある測点のレベルが上下するが、アーチリブが角度をもって張り出しているために、その測点の水平距離もそのつど変化するからである。

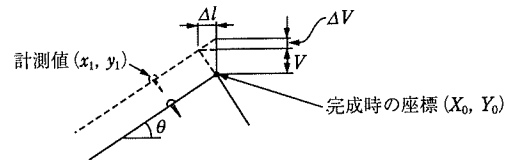
当作業所におけるアーチリブのレベル測量は、各ブロックの先端部に埋め込んだ測量釘頭部を視準して行った。上越し計算値は、完成系でのブロック先端部の値であり、測量釘の位置とは、通常、水平距離にして10cm~20cmほどずれているため、以下の方法で補正を行った。

- ① 最初の段階で光波測距儀を用いて測量釘頭部の座標を計測し、補正值 $(X_0 - x_1) \tan \theta$ を計算する。
- ② 以後は、レベル計測器で測量釘の高さのみを計測し、上記の一定値で補正して計算値を比較する。ただし、 X_0, x_1, θ は表-3に示した。

この方法では、上越し計算の対象としたブロック先端の

表-3 簡略化した計測法で生じるレベル誤差

対象ブロック	勾配 θ	先端部の最大上越し量 V	水平方向変形量 Δl	水平距離を固定した場合のレベル誤差 ΔV
7ブロック	30.9°	40mm	23.7mm	14.2mm
16ブロック	17.3°	137mm	42.6mm	13.3mm
24ブロック	4.1°	160mm	11.5mm	0.8mm



点の水平座標 X_0 が常に一定である、と仮定している。実際には、各施工ステップで水平方向に移動するため、上記の簡略化した補正計算では多少の誤差が生じる。表-3は、アーチリブ上の3点について、鉛直方向変形量を最大上越し値と仮定して、誤差を計算したものである。計算結果からレベルの誤差は、勾配の大きい7ブロックで14mm程度である。

6. あとがき

新小倉橋の工事は、ピロン工法によるアーチリブの施工が終了し、今後仮設材の撤去、鉛直材、補剛桁の施工と続く。

張出し工法によるコンクリートアーチ橋の設計では、施工法が全体構造に及ぼす影響が大きい。したがって早い段階で施工法を決定しなければならないのだが、最適な施工法の選定や仮設構造に関し、研究開発の余地がかなり残されていると考えている。今後これらの課題が、施工例の増加とともに明らかにされていくことを期待する。

参 考 文 献

- 1) 宮沢, 川崎: ピロン工法によるアーチ橋の施工-新小倉橋(仮称)-, 土木施工, Vol.38, No.13, pp.22~27, 1997.12
- 2) 宮内, 万仲: アーチリブ張出し施工用の移動式作業車(トラベラー)の開発, 建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp.164~167, 1997.10
- 3) 宮沢, 川崎, 今井, 笠倉: ピロン工法による新小倉橋(コンクリートアーチ橋)の施工, 橋梁と基礎, Vol.32, No.5, pp.2~7, 1998.5
- 4) 万仲, 宮内, 今井, 宇野: コンクリートアーチ橋張出し施工用の新型移動式作業車の開発, 第8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.667~670, 1998.10

【1998年7月29日受付】