長大 PC 斜張橋の建設

——上信越自動車道 碓氷橋——

大谷 祥三^{*1}・緒方 辰男^{*2}

概要 碓氷橋 (PC 2 径間連続斜張橋, $L=222$ m) は、日本の高速道路としては初の一面吊り構造の PC 斜張橋で、上信越自動車道の碓氷峠に位置する橋りょうである。逆 Y 字形の主塔、コーベル構造を有する主塔受けばり部および 3 室箱げた構造の主げたが、特徴ある橋りょう構造を表わしており、とくにファン形 (9 段ダブルケーブル) の斜材ケーブルにはロングラウトタイプの工場製作された大容量ケーブル (引張強度 1 500 tf 級) を用い、現場架設作業を簡略化した。本稿では、長大 PC 斜張橋・碓氷橋の施工概要について報告する。

キーワード : 斜張橋, PC, ケーブル, 施工

1. まえがき

日本道路公団が建設する上信越自動車道は、首都圏と上信越地方を結ぶ高速道路であり、群馬県関越自動車道藤岡 JCT から長野県を経て、新潟県上越市に至る全長 205 km の路線として計画されている。このうち藤岡 JCT から佐久 IC に至る区間が平成 5 年 3 月 27 日開通した。

碓氷橋は、関東平野北西部から一気に信州軽井沢へ駆

けのぼる碓氷峠に位置し、JR 信越線、霧積川、旧国道 18 号および碓氷川等を横過する延長 1 267 m の長大橋りょうである。このうち JR 信越線、霧積川を横過する区間は、2 径間連続 PC 斜張橋であり、松井田妙義 IC から横川 SA を過ぎるとすぐ、優美な「人」の形をデザインしたコンクリートの塔が眼に飛び込む。これが碓氷橋 PC 斜張橋である。

本稿では、その設計および施工、また、これらを進めたなかでの留意点について報告する。

写真-1 碓氷橋完成

*1 おおたに・しょうぞう／日本道路公団 東京第一管理局 技術部 調査役 構造技術課長

*2 おがた・たつお／ 同 上 東京第二建設局 構造技術課

2. 碓氷橋橋りょう概要

碓氷橋 PC 斜張橋部について一般図を図-1 に、完成写真を写真-1 に示す。

本橋は、全延長が PC 連続中空床版、PC 斜張橋、RC 連続中空床版、PC 連続箱げたラーメンの橋りょう型式からなっており、このうち PC 2 径間連続斜張橋については、高速道路としてわが国初の本格的な吊り斜材ケーブルを採用し、逆 Y 字形状コンクリート構造の主塔を有する橋りょうである。

以下に、斜張橋の一般設計条件および構造概要を示

す。

路線名：関越自動車道上越線
位置：群馬県碓氷郡松井田町
構造型式：PC 2 径間連続斜張橋
橋格：一等橋 (TL-20, TT-43)
橋長：222.0 m (2×110.2 m)
総幅員：21.4 m (有効幅員 8.5 m×2)
平面線形：R=1 600 m (斜角 90°)
縦断勾配： $i=2.039\%$
横断勾配： $i=2.000\%$
横げた：逆台形 3 室箱げた断面 (PC 構造)

表-1 主要工事数量

区 分	種 別	仕 様	単位	数 量	備 考
下部工	コンクリート	$\sigma_{ck}=300 \text{ kgf/cm}^2$	m ³	2 405	橋脚
		$\sigma_{ck}=350 \text{ kgf/cm}^2$	m ³	997	主塔受けばり部
		$\sigma_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$	m ³	435	主塔受けばり部
	鉄 筋	SD 345	tf	652	
	PC 鋼 材	SBPR 95/120 ϕ 32	tf	10	主塔受けばり部 (鉛直締め)
		SWPR 7 A 19 T 15.2	tf	29	主塔受けばり部 (横締め)
	鉄 骨	SM 490 Y, SS 400 ほか	tf	229	
上部工	コンクリート	$\sigma_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$	m ³	3 725	
	鉄 筋	SD 345	tf	696	
	PC 鋼 材	SBPR 95/120 ϕ 32	tf	223	縦締め, 鉛直締め
		SWPR 1 12 ϕ 7	tf	34	床版横締め
		SWPR 7 A 12 T 12.4	tf	2	横げた横締め
		SWPR 7 A 19 T 15.2	tf	16	横げた横締め
	コンクリート	$\sigma_{ck}=350 \text{ kgf/cm}^2$	m ³	1 257	
	鉄 筋	SD 345	tf	177	
	PC 鋼 材	SBPR 95/120 ϕ 32	tf	1	
	鉄 骨	SM 490 Y, SS 400 ほか	tf	106	
主 塔	斜材ケーブル	NEW-PWS (ϕ 7)	tf	192	ポリエチレン被覆

The Construction of the Usui Bridge

By Shôzô Ôtani and Tatsuo Ogata

Concrete Journal, Vol. 31, No. 10, pp. 50~64, Oct. 1993

Synopsis The Usui Bridge(two-span continuous prestressed concrete cable-stayed, 222 m in length) is the first PC cable-stayed bridge with one central cable plane ever constructed as a highway bridge in Japan, located in the Usui pass as a part of Josin-Etsu Expressway. The bridge is characterized by an inverse Y-shaped tower, PC corbel that supports force from the tower and a main girder designed as a tri-ecellar box type. Particularly, the erection work with 9 steps fan-shaped double cable system was reduced by using shop assembled non-grout type large-capacity cable(tensile strength of max 1 500 tf). This paper reports the outline of the construction of the long span prestressed concrete cable-stayed bridge.

Keywords : cable stayed bridge, prestressed concrete, cable, construction

図-1 碓氷橋構造一般図

支持型式：中間橋脚剛結ラーメン構造
 主 塔：逆 Y 形中実断面 (SRC 構造)
 斜 材：ファン形一面吊り 9 段
 橋 脚：2 室中空断面 (SRC 構造)

基 礎：ニューマチックケーソン
 舗 装：アスファルトコンクリート $t=75$ mm
 設計震度： $k_h=0.18$ (橋軸方向)
 $k_h=0.23$ (橋軸直角方向)

主要工事数量を表-1に示す。

3. 型式決定

碓氷橋は、碓氷峠に発する霧積川、碓氷川および旧中山道坂本宿跡、旧信越本線等、自然環境および歴史的に交通の要所を成した地域に計画される橋りょうとして、全延長約 1 267 m のすべてをコンクリート構造で統一し、景観上からもその橋りょう型式の決定を行った。

PC 斜張橋部は、近接並行する JR 信越線および霧積川との交差計画および施工条件から決定されたものである。ほかに T 形ラーメン橋も考えられたが、経済性、施工性に有利であること、また、上信越自動車道のシンボル、当地域の新しいモニュメントの創出等も考慮して、PC 斜張橋を採用した。

4. 構造計画

ここでは、本橋を構成する斜材、主塔、主げたおよび主塔受けばり部について、それぞれの基本構造の特徴を述べる。

4.1 斜材・一面吊り構造

斜材の吊り面数は、中央分離帯部を斜材定着部に利用した一面吊り構造である。写真-2に示す。

これは二面吊り構造とした場合より経済性に優れていること、施工の集中化を意図しその容易性に優れていること、また、高速走行上の開放空間の確保を図っている。

斜材配置については、逆 Y 形の主塔形状と主げた側の吊り支点間隔を張出し施工時の発生応力から標準 10 m とし、また、斜材形状は、ファン形とした。

斜材ケーブルは、ダブルケーブル方式を採用しており、硬質ポリエチレンで被覆されたノングラウトタイプの工場製作ケーブル (NEW-PWS 工法) を選定、使用している。

4.2 主塔

主塔形状は、中央分離帯幅の拡幅に大きく影響しない

こと、その構造が耐震性に優れた条件を満たすものとして、逆 Y 形を選定した。

また、SRC 構造 (鉄筋鉄骨コンクリート構造) を採用し、斜材定着体、斜め構造部材等の施工精度の向上を図った。

なお、主塔は橋脚を含め、地上から約 113 m の高さを有し、航空障害灯、避雷針等の施設を必要とするほか、これらの維持管理のための管理用通路 (ϕ = 約 800 mm) の設置を必要とするものとなっている。

ところで当地域は、上信越高原国立公園と妙義荒船佐久高原国定公園に隣接し、とくに妙義山塊は日本三奇勝のひとつである。本橋はこれらの周囲景観との調和を図るため、一般的にはスレンダー性の強い斜張橋の外観に加え、主塔形状には緩やかな曲線を生かし、分岐部にも円カーブを配して、美観性を高めた。

4.3 主げた構造

主げたは、PC 3 室箱げた等断面構造である。これは、一面吊り斜張橋であるため、ねじりモーメントに対して抵抗できる断面としたものであり、けた高は完成系、架設系の応力度を検討し、高さ 2.5 m とした。また、斜材ケーブルを主げた内定着方式としているため、中間横げた内に斜材定着用横げたを設けている。

斜材ケーブルの定着は、主塔側は図-2 に示すように片側の斜材が反対側の斜材を挟み込むように配置定着しており、主げた側の定着部構造は図-3 に示すとおりである。

主げた内定着については、とくに斜材吊り点部は大きな力が作用する箇所であり、当該定着部横げたの破壊モードや破壊耐力については不明な事項も多かったので、実橋の 1/4 縮尺で全断面をモデル化した模型実験を行って詳細な検討を行った。

4.4 主げた受けばり部・コーベル構造

主塔からの反力を橋脚に伝達する主げた受けばり部はマッシュパなコーベル構造となっており、基本的には PC 構造として設計した。

4.5 橋脚・基礎

主塔部橋脚は、施工性、経済性を考慮し、2 室中空断面構造とした。また、基礎型式は、支持地盤が玉石混じり砂礫層と比較的強度の小さい泥岩層から構成されていることから、ニューマチックケーソン基礎とした。

5. 設計

5.1 荷重

① 活荷重: TL-20, TT-43

TT-43 荷重については、橋軸方向は軸重を実載荷し影響線解析を行った。

② 衝撃: $i=10/(25+L)$

写真-2 一面吊り構造の碓氷橋

図-2 主塔部定着

支間長 L としては、主げたの支承間距離と斜材の吊り点間隔が考えられるが、本橋はマルチケーブルタイプの斜張橋であり、等分布荷重を載荷した場合の曲げモーメントが2径間連続げたにおける分布に近いことから、主げたの支承間距離を採用した。

- ③ 温度変化：全体系温度変化 $\pm 15^{\circ}\text{C}$
 コンクリートと斜材との温度差 $\pm 15^{\circ}\text{C}$
 主塔左右の温度差 5°C
 床版温度上昇 $+5^{\circ}\text{C}$
- コンクリートと斜材との温度差については、斜材がノングラウトタイプであり、コンクリート部材よりも外気温に強く影響されるので $\pm 15^{\circ}\text{C}$ とした。
- ④ 線膨張係数：鉄筋およびコンクリート 10×10^{-6}
 斜材 12×10^{-6}
- ⑤ クリーブ係数：基本クリープ係数 $\varphi = 2.0$
- ⑥ 乾燥収縮度：基本乾燥収縮度 $\varepsilon = 25 \times 10^{-6}$
- ⑦ 終局荷重時の荷重組合せ

終局荷重作用時における斜材調整力の荷重係数については、最終緊張力調整を行うことによりバラツキが小さくなること、また、終局荷重作用時における曲げ破壊モーメントと斜材調整力による曲げモーメントが異符号であり、斜材調整力の荷重係数を大きくとることは、破

図-3 主げた部定着

壊安全度が大きくなる方向であるので 1.0 を採用した。

5.2 使用材料

使用材料の規格を表-2 に示す。

5.3 許容応力度

許容応力度は道路橋示方書による。とくに、主げたコンクリートの施工時の引張応力度の目標値については、張出し施工時にひびわれを生じさせないこと、および張出し施工時に以下①～③に示す荷重が作用した場合においても、発生する引張応力度が、 25 kgf/cm^2 以下となるように考え、柱頭部で 0 kgf/cm^2 、標準部で 10 kgf/cm^2 程度とした。

- ① 温度変化
 ② 施工中の PC 鋼材応力度の減少
 ③ 上げ越し管理用斜材調整力（斜材張力の 5 % 程度）

また、斜材ケーブルの許容応力度 P_a は、以下に示すとおりである。

$$\text{引張強度 } P_u = 160 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{降伏強度 } P_y = 118 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{常 時 } P_u = 0.4 P_u$$

$$\text{施 工 時 } P_a = 0.6 P_a$$

$$\text{地 震 時 } P_a = 0.6 P_u$$

斜材ケーブルの常時の安全率は、過去の実績において

表-2 使用材料

材 料	規 格	適 用
コンクリート	$\sigma_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$	主げた
	$\sigma_{ck}=350 \text{ kgf/cm}^2$	主塔・主塔受けばり部
	$\sigma_{ck}=300 \text{ kgf/cm}^2$	橋脚
鉄 筋	SD 35	—
P C 鋼 材	SBPR 95/120 $\phi 32$	縦締め・鉛直締め
	SWPR 1 12 $\phi 7$	床版横締め
	SWPR 7 A 19 T 15.2	主塔受けばり部・斜材定着部横げた横締め
	SWPR 7 A 12 T 12.4	端支点横げた横締め
斜材ケーブル	$P_u=160 \text{ kgf/mm}^2, \phi 7$	JIS G 3502, 亜鉛メッキ

2.5を採用しているケースが多いこと、本四架橋等の長大鋼斜張橋においても2.5が採用されていること、また、本橋では活荷重による斜材の応力振幅が 6 kgf/cm^2 程度と鋼斜張橋に比べて小さいこと等を考慮して、2.5を採用している。

6. 施工概要

碓氷橋は、まずニューマチックケーソン基礎の施工ののち、約50 mの2室中空断面の高橋脚を建ち上げる下部構造の施工を実施した。

上部構造の施工としては、まず主塔受けばり部ブラケット支保工を組み立て、コーベル構造の受けばり部を施工し、次に橋脚頭部、主げたを施工する。

主げたの張出しは、主塔の建上げと併行して行うもので、4車線分の大型特殊ワゲン（主げた幅員 $W=21.4 \text{ m}$ ）の使用により、主げた延長 $L=222 \text{ m}$ を42ブロックに分割したうちの片側21ブロックを、9吊り点の斜材ケーブルとインナーケーブルで順次張り出していくPC箱げたの現場打ち張出し工法で、写真-3に示す施工である。

図-4に、当初計画された全体工事工程を示すとともに、その施工順序を図-5により示す。

6.1 主塔の施工

主塔は、ニューマチックケーソン基礎の上に、橋脚、主塔受けばり部および主塔で構成された高さ $h=113 \text{ m}$ のコンクリート構造物として施工された。写真-4に施工状況を示す。

(1) 主塔受けばり部

主塔受けばり部は、主塔のコンクリート重量のほか、主げた重量、活荷重等の斜材ケーブルを通して主塔に入る荷重等を橋脚に伝達する構造部であり、張出し長 8.6 m 、高さ 10.0 m で、張出し方向にPCストランド(19 T 15.2)、鉛直方向にPC鋼棒($\phi 32$)を配置したPCコーベル部材である。

写真-3 張出し施工状況

当該箇所は、橋脚、柱頭部および主塔受けばり部において鉄筋、PC鋼材が複雑に交差して配置されているため、使用コンクリートについては、ワーカビリティを確保する必要があったこと、および耐久性の確保を図る

写真-4 主塔の施工

図-4 碓氷橋全体工事工程

① 橋脚・主塔受けばり部、橋げた柱頭部の施工

② 主塔傾斜部の施工、ワーゲン組立て

③ 主塔鉛直部の施工、橋げた両側張出し施工

④ 橋げた、主塔、斜材の併行施行

⑤ 支保工による橋げた閉合、斜材最終緊張

⑥ 橋面工施工、完成

図-5 碓氷橋施工順序

ことを目的として、流動化コンクリートとした。

スランプはペースで 7 ± 1.5 cm であったものを、 12 ± 2.5 cm としている。なお、流動化剤を添加する方法としては現場添加としており、添加量は流量管理である。

ベースコンクリートの示方配合を表-3に示す。

主塔受けばり部のコンクリートは、1リフト当たりの打設量が約 500 m^3 であることから、セメントの水和熱に起因する温度ひびわれの発生の可能性が考えられた。

このため、事前に温度応力解析を実施し、ひびわれの発生の可能性や対策について検討したが、構造上問題となるひびわれの発生の可能性が少ないこと、また、それ以上の大幅なひびわれ指数の改善を図る対策はないと判断されたので、ポンプ車2台による配管打設方法で、約10時間、打設速度 $25 \text{ m}^3/\text{台} \cdot \text{h}$ のコンクリート打設を実施した。

(2) 主塔

主塔は、主塔の傾斜部、閉合部、鉛直部および塔頂部

の各部から構成される。

傾斜部は、コンクリート自重等による主塔の内側への倒れを防止するため、H-250を主体とした鋼製ストラットを2段設置しており、閉合部は、主塔内側に鋼製ブラケットを取り付けた支保工による施工である。また、鉛直部は、斜材定着鋼管の設置、斜材緊張用箱抜き部の施工および箱抜き部の跡埋めコンクリートの施工等、複雑な構造形状の施工であった。

型わくは、コンクリートの耐久性の向上と、景観上から透水性材料(2層の繊維)を型わく表面に貼付したものを使用した。

これは、コンクリート表面部の余剰水を繊維層で脱水させることにより、表面密度の高いコンクリートをつくり、ひびわれ発生の抑制を図るものである。また、斜張橋の主塔が走行中の視野に入るため、そのコンクリート面の美観性を考慮したものである。

コンクリートは、主塔受けばり部と同様に流動化剤を現場投入して、スランプ7.5 cm から12.5 cm 程度とし

表-3 コーベル部のコンクリート配合

コンクリートの種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
					W	C	s	G
P 2-1 B	7	4	39.3	37	169	430	642	1 115

たものを使用し、ポンプ車による配管打設方法で施工した。

なお、1 リフト当たりの打設量は、傾斜部 35~50 m³、閉合部 115 m³、鉛直部 20~90 m³ 程度である。

ベースコンクリートの示方配合を表-4に示す。

鉄骨は主塔の曲線形状を考慮し、各施工リフトで継手を設けたものであり、地上でブロックごとに地組みし、タワークレーンで吊り建て込みし、調整後、固定した。

また、斜材定着鋼管工は、主塔鉛直部に 36 組を据え付けるものであるが、据付けは斜材ケーブルの架設の良否を決定する重要な作業であり、高度な据付け精度を要した。

鉄筋については、施工性、品質管理および工程上から、当初ガス圧接継手であったものを機械継手（ネジ・グラウト式）に変更している。

6.2 主げたの施工

主げたは、主げた長 222.0 m、けた高 2.5 m の逆台形 3 室箱げた断面の PC 構造である。

主げたの施工ブロック割を図-6に示す。これらは施工方法により、柱頭部、張出し施工部および側径間支保工部に区分される。

柱頭部は主げた受けばり部と一体化した構造であるた

め、主げた受けばり部施工時に同時に施工しており、主げた受けばり部より張出した 3.0 m 区間（ワーゲン設置用）については、ブラケット支保工を組み立て施工した。

図-7に示した大型特殊フォルバウワーゲンにより、主げたブロック（延長約 5 m）を現場打ち施工し、2 ブロック約 10 m の吊り支点間隔に PC 斜材ケーブルを設置し、緊張作業を行った。

側径間支保工部は、張出し架設が終了し、ワーゲン解体後、温度変化あるいは風等による主げたの変位を拘束するための制振工を兼ねたブラケットを橋脚上に取り付

図-7 大型特殊フォルバウワーゲン

表-4 主塔のコンクリート配合

コンクリートの種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	s	G
P 3-1	7	4	45.1	41	158	350	751	1 102

図-6 主げたの施工ブロック割

け、ブラケット上で施工した。

張出し部 1 ブロック当たりの施工サイクルは、図-8 に示すようにワーゲン移動後、型わく、鉄筋、PC 鋼材を組み立て、コンクリートを打設し、所定のコンクリート強度の確認ののち、PC 鋼材（インナーケーブル）を緊張し、ワーゲンを移動する作業である。

1 ブロック当たりの平均施工日は、斜材定着ブロックで 16 日、一般ブロックは、設計上、前ブロックの斜材を架設し、一次緊張後にコンクリートを打設するもので

図-8 張出し部の施工フロー

あるが、実働 12 日程度であった。

とくに、吊り支点部横げたの施工は、写真-5 に示すように複雑な構造で、一般的な PC 箱げたに比して、約 10 m 間隔に位置する横げたの型わく、鉄筋、PC 鋼材等の施工は非常に手間を要した。

現場打ち張出し主げたおよび斜材ケーブルの施工の標準施工サイクルを図-9 に示す。

本橋では、斜材ケーブルにノングラウトタイプの工場製作ケーブルを使用したので、これが後述するケーブルの架設作業を、当初、計画のとおり比較的容易なものにしたが、逆に主げたの施工方法の簡略化をより図る必要があると考えられた。

6.3 ケーブルの架設

ケーブルの架設の揚重設備は、180 t・m タワークレーンを用いるが、このほかにけた側へのケーブル挿入に橋上クレーン（5 t ラフタークレーン）とウィンチ（7.5 kW）、フォークリフト（20 t）、主塔側へのケーブル引寄せ等に引込み緊張装置（1 000 t ジャッキとストランド用の 15 t ジャッキ）、ウィンチ（15 kW）等を使用している。

また、斜材ケーブル架設後、緊張作業の足場は、主塔鉛直部施工用の足場を利用して、作業に支障となるもの

写真-5 吊り支点横げた部

図-9 主げた・斜材ケーブルの標準施工サイクル

写真-6 碓氷橋橋面上施工状況

はそのつど解体組立てとなる施工である。写真-6 に現場状況を示す。

斜材ケーブル NEW-PWS は、直径 $\phi=7$ mm の亜鉛メッキした PC 鋼線を平行に集束したもので、フィラメントテープで巻き込み、高密度ポリエチレンの被覆により防食加工を施した PC 鋼材である。また、定着体部となるケーブル両端は、高疲労強度のソケットを加工したものであり、これらが工場で製作され、ノングラウトタイプの斜材ケーブルとして現場搬入される。

図-10 にケーブルおよびソケットの詳細を示す。

斜材ケーブル架設は、主げた定着ブロックを施工し、ワーゲン移動後、次ブロックのコンクリート打設までの間に架設し、一次緊張を終える施工サイクルである。

なお、本橋は斜材ケーブルが9段のダブルケーブル構造であること、また、主塔の両側への架設が同サイクル時で進行するため、1 サイクルで、4 本のケーブルの架設を行う。

まず、ケーブル架設開始にあたり、所定の長さで工場

図-10 ケーブルおよびソケット

写真-7 工場製作ケーブルの現地搬入

製作されたケーブルを、写真-7 に示すようにリールで巻いた状態で搬入する。

主塔側の準備工としては、主塔施工の足場、安全ネットを解体したのち、斜材を引き込むための装置、緊張ジャッキ (1 000 t, 15 t)、ラムチェアー等を地組みし、主塔に取り付ける。また、斜材を主塔側に引き寄せるためウィンチとワイヤーをセットする。

橋面上および主げた側での準備工としては、アンリーラーを所定の位置に移動するとともに、テンションロッド取付け架台を組み立てる。そして、斜材引き出し用ローラーを設置し、養生マットを用意する。また、主げた定着鋼管内への引き込みのため、斜材受けローラー、ウィンチの設置およびけた内空場所にレバブロック、チェンブロック等を準備する。

斜材ケーブルの架設は、橋面上に展開したケーブルをまずけた側定着部へ引き込み、固定したのち、主塔側定着部への引込みを行う作業から始まる。

斜材ケーブルの架設要領を図-11 に示す。

写真-8～11 に現場状況を示す。

とくに、主塔側ソケットの定着鋼管への引込みについて説明すると、タワークレーンで主塔側ソケットを定着鋼管付近まで吊り上げ、引き寄せる。引込み装置、定着鋼管を通したテンションロッドにアダプターを利用して接続し、緊張ジャッキ (15 t) で引き込み始める。次にテンションロッドが、1 000 t ジャッキを通過した時点でストランド用緊張ジャッキ、支柱筒、ストランドを取りはずし、テンションロッドに緊張ナットを取り付け、1 000 t ジャッキで 200 mm 程度、ケーブルを引き込む。このような作業工程により 1 本の斜材ケーブルの架

図-11 斜材ケーブルの架設要領

写真-8 主塔側ソケットの吊上げ・展開

写真-9 けた側ソケットをリールより取りはずし展開終了

設を終了する。

以上の手順で2本、1サイクル4本のケーブルが架設されたら、一次緊張を行う。

二次緊張は、張出し架設中に既設斜材最上段の斜材を設計で定められた張力で緊張する作業である。また、最終緊張は、主げた閉合後に全斜材を設計で定められた張力で緊張する作業であり、これらを順次進めた。

写真-10 けた側ソケットの斜材定着鋼管への引込み

写真-11 主塔側ソケットの定着鋼管への引込み

7. 付属設備の施工

7.1 角折れ緩衝装置

『道路橋示方書 コンクリート編』では、「斜張橋の斜材定着部の構造は、風や走行車両による斜材の振動を十分吸収できるものでなければならない」と規定している。

本橋においても角折れ緩衝装置を設置した。材料はケーブルの偏芯吸収性が高く、バネ定数の調整も容易で、耐久性に優れ、実績も多い注入型緩衝材を用いた。

写真-12に角折れ緩衝装置の外観を示す。

7.2 制振装置

多くの長大斜張橋において、ケーブル表面に発生する雨露が原因で生じると考えられているレインバイブレーションや、並列ケーブルで生じるウエイクギャロッピングと呼ばれるケーブル振動が観測され、問題になっている。

写真-12 角折れ緩衝装置部

写真-13 制振装置

本橋においては、ファン形のケーブル配置で、各々のケーブルの長さが異なるため、短ケーブル、中ケーブル、長ケーブルを代表させ風応答観測（斜材振動測定）を行い、その可能性を検討した。

その観測値を他の斜張橋の実績および研究データを参考に解析した結果、本橋では上側3段にレインバイブレーションの発生が想定されたため、制振装置を設置した。

制振装置は、景観やメンテナンス等を考慮し、ケーブル端部にダンパを取り付ける方法で、粘性せん断型ダンパとしている。写真-13に制振装置を示す。

7.3 ケーブル防火構造

本橋の斜材ケーブルは、ポリエチレン被覆されたケーブルであるため、自動車火災時の損傷の可能性が考えられる。また、これによる補修、架け替えはきわめて困難であるため、ケーブルの鉛直高さ15 mまでを防火構造とし対処している。

防火構造材料は、斜材表面のポリエチレン材が火災温度130～250度に20分間、その材料性能を保持できる断熱材料としてセラミックウール($t=0.3$ mm)を選定した。また、融点800度以上、防食性に優れているステンレス鋼板($t=0.3$ mm)を外装材としている。

8. 施工管理

斜張橋はけた橋に比べて、主げたの剛性が小さく、斜材で吊られた構造であるため、各施工段階で主げたのたわみ量は大きく変化する。また、温度変化や設計計算で用いた仮定値と実際の値との差に対しても微妙に変化する構造である。

* (主げた全たわみ誤差) = (実測誤差) + (予測誤差)

図-12 施工管理フロー

本橋では、これらたわみ管理（上げ越しおよび形状管理）、斜材緊張管理および各部応力管理を迅速かつ合理的に行うため、マイクロコンピュータを利用した施工管理システムを採用した。図-12に施工管理システムの概念図を示す。

また、施工中および完成系での風に対する安全性を確認するため、斜材ケーブル、主げたおよび主塔の風応答を観測した。

8.1 施工管理システムの基本方針

施工管理システムの基本方針は以下のとおりであり、通常施工時と点検時に区分して行った。

通常施工時は、コンクリート打設および斜材調整前後に毎回測定を実施するもので、おもな管理ポイントである主げたのたわみ測定および斜材張力の調整を管理した。

測定したたわみデータを基に、計算値と実測値とを比較して補正係数（剛性、荷重、クリープ等の誤差を考慮してみかけの剛性、荷重を補正する係数）を求め、管理

用数値として蓄積した。また、実測値が所定の管理基準を超える場合は、下記の点検時レベルの追加検討、予備解析等を行い、主げたのたわみ修正の必要性を検討した。

点検時の管理は、通常施工時の一連の測定のほか、すでに設置されている全斜材の張力を測定するもので、斜材ケーブルを3段、6段および9段架設した時点および、けた完成時の4回実施した。

8.2 施工管理結果

(1) たわみ管理結果

実施工において、9段目の点検時には、最大35mm程度の誤差が確認され、将来予測計算でも最大45mm程度の誤差が生じる可能性があると判断されたため、このケーブルにおいて調整緊張を実施した。

また、主げた施工終了後の点検時においても、規定値（±25mm）を10mm程度超えたので調整緊張を実施している。

温度変化による一日のたわみ変化量は、実測値で最大

張出し時には 10 mm 程度確認されている。

なお、本橋のたわみ測定は、ケーブル温度が日射の影響で上昇する前に行うことを原則としたため、作業荷重の影響もなく、測定精度は確保できていると判断する。

(2) 斜材張力測定結果

斜材の緊張管理は、ロードセルとデジタル表示器を用いて行っており、緊張前には斜材ケーブルの温度計測を行い、緊張力の温度補正を行った。

また、構造系の変化ごとに、全斜材ケーブルの張力を振動法により測定しており、とくに斜材張力測定結果は、設計で確保した 5 % の張力の余裕量内の誤差におさまっている。

(3) その他の静的計測結果

本橋では上記のほかに、主げたと主塔の応力・温度測定、主塔の傾斜測定および斜材ケーブルの温度測定を行った。

斜材ケーブルは、ノングラウトタイプであるため温度に敏感であり、測定結果では、ケーブル温度は夏場 45 度程度、冬場は 25 度程度まで上昇した。また、斜材とコンクリートとの温度差は夏場の +13 度に対して、冬場は +17 度となり、冬場のほうが設計上厳しいことが判明した。なお、設計上 +15 度としているが、とくに問題となるものでなかった。

また、本橋の主塔は地上から 130 m と高く、主塔の傾斜測定は安全管理上とくに重要であったが、傾斜計による測定では比較的精度よく各施工段階の傾斜特性をとらえることができたと判断している。

(4) 風応答観測結果

施工時および現在も、ウエイクギャロッピングやレインバイブレーション等の振動は、観測されていない。

観測結果からは、120 m のケーブルで、最大で片振り 24 mm の振動が発生している。この振動は 10 分間の平均風速が 7.5 m/s の状態であり、ケーブル端部の曲げ角度が 0.05 度程度に相当し、ケーブルの曲げ角度許容値 0.6 度より十分小さく、安全であると考えた。

9. あとがき

現在上信越自動車道（藤岡～佐久）は、予想をはるかに上回る交通量であり、また、横川サービスエリアをはじめとする休憩施設も非常に好評である。

平成元年の基礎工工事からあしかけ 4 年、本橋の完成については、上信越自動車道碓氷橋（PC 斜張橋）上部工施工検討委員会（委員長：國島正彦 東京大学教授）をはじめ、施工業者また沿線地域の皆様の多大なご協力を得た。ここに厚く御礼を申しあげる。

現代の最新技術を駆使した長大 PC 斜張橋・碓氷橋が、多くの人々に親しまれ、また、今後計画される橋

りょうの設計・施工において、少しでも参考となれば幸いである。

なお、本橋は碓氷三橋のひとつとして土木学会田中賞（作品部門）およびプレストレストコンクリート技術協会賞受賞の榮譽に浴したことを報告する。