

(21) 碓氷橋 (PC斜張橋) の設計

日本道路公団東京第二建設局富岡工事事務所
㈱ピーエス・鹿島建設㈱共同企業体
㈱ピーエス・鹿島建設㈱共同企業体
鹿島建設㈱ 土木設計本部

城戸 正行
正会員 ○大塚 一雄
正会員 小林 道弘
北国 秀一

1. はじめに

碓氷橋は、日本道路公団東京第二建設局管内の上信越自動車道のうち松井田インターチェンジ～碓氷インターチェンジ間に建設される橋長 1267mの橋梁である。本橋は上信越高原国立公園と妙義荒船佐久高原国立公園に隣接し、JR信越本線、一級河川霧積川、一般国道18号および一級河川碓氷川を横過するが、このうちJR信越本線および霧積川を跨ぐ部分が橋長 222mの2径間連続PC斜張橋となっている。

本橋は、高速道路橋として建設される我が国初めての本格的な一面吊りのPC斜張橋であり、構造上多くの特徴がある。本論文ではPC斜張橋の構造とその設計について述べる。

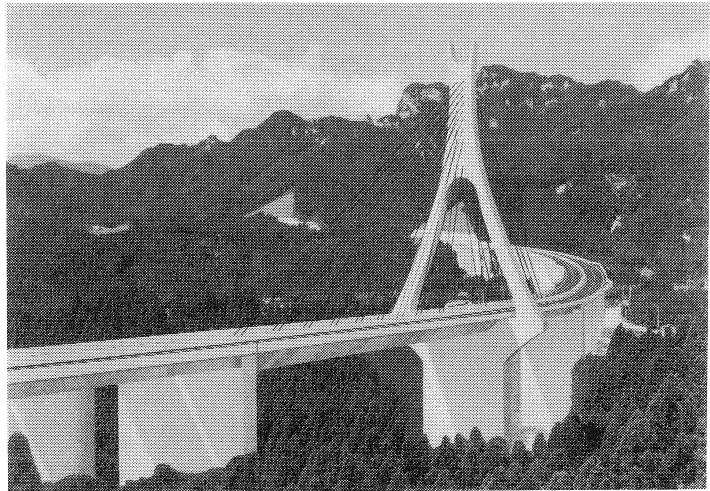


写真-1 完成予想写真

2. 工事概要

本橋の工事概要は次のとおりである。

工 事 名：上信越自動車道
碓氷橋東(PC上部工)工事

工 事 場 所：群馬県碓氷郡松井田町

橋 種：プレストレストコンクリート道路橋

橋 格：第1種3級B(1等橋TL-20、TT-43)

橋 梁 形 式：2径間連続PC斜張橋

橋長・支間割：222 m(2×110.2 m)

有効幅員：2 × 8.5 m

平面線形：R=1600 m

勾 配：縦断2.039%、横断2.0%

基礎形式：主塔部 ニューマチックケーソン基礎、両端部 直接基礎及び深礎ぐい基礎

橋 脚：2室中空断面(SRC構造)

主 塔：逆Y形(SRC構造)、主塔高 113m

主 桁：3室箱桁断面(PC構造)、桁高 2.5m

斜 材：ファン形、一面吊り

発 注 者：日本道路公団東京第二建設局

施 工 者：㈱ピーエス・鹿島建設㈱共同企業体

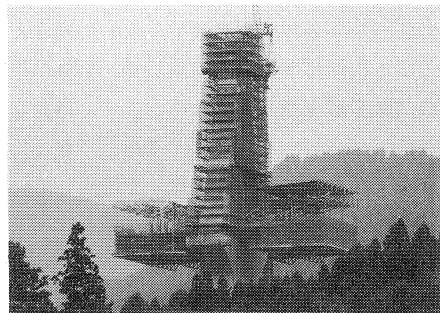


写真-2 施工写真

工 期：平成元年6月～平成4年6月

主要工事数量：表-1に示す。

表-1 主要工事数量

箇所	種別	仕様	単位	数量	備考
主桁	コンクリート	$\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$	m ³	3730	橋体工
		$\sigma_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$	m ³	360	橋面工
	PC鋼材	SBPR95/120他	t	280	
	鉄筋	SD35	t	760	
主塔	コンクリート	$\sigma_{ck}=350\text{kgf/cm}^2$	m ³	1260	
	PC鋼材	SBPR95/120	t	1	
	鉄筋	SD35	t	180	
	鉄骨	SM50Y, SS41他	t	90	
斜材ケーブル		New PWS $\phi 7$	t	192	
橋脚	コンクリート	$\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$	m ³	440	主塔受梁部
		$\sigma_{ck}=350\text{kgf/cm}^2$	m ³	1000	主塔受梁部
		$\sigma_{ck}=300\text{kgf/cm}^2$	m ³	1760	橋脚
主塔 受梁部	PC鋼材	SWPR7A 19T15.2他	t	40	
	鉄筋	SD35	t	480	
	鉄骨	SM50Y, SS41他	t	170	

3. 構造概要

図-1に碓氷橋の全体一般図を示す。本斜張橋は斜材・主塔・主桁・主塔受梁部の4つの構造部材から構成されているが、以下にそれぞれの基本構造の選定経緯及び特徴について述べる。

3.1 斜材

斜材の吊り面数は、2面吊りとした場合より経済性に優れかつケーブルが交差せず景観性にも優れていることから1面吊り形式を採用した。斜材の吊点間隔は経済性と施工時応力度から10mを標準とし、また配置形状は逆Y形主塔であるため、ファン形とした。

斜材はダブルケーブル方式を採用しており、ポリエチレン管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)を使用している。ケーブル1本当りの容量は7 ϕ 163(Pu=1003tf)~7 ϕ 241(Pu=1484tf)であり、緊張作業は桁高2.5mであるため主桁内の緊張スペースを確保できないこと及び作業性から塔側で行うこととした。

3.2 主塔

主塔形状としては斜材が1面吊りであることから、逆Y形、独立1本柱が考えられたが、中央分離帯を小さくでき耐震性にも優れている逆Y形とした。橋脚を含む主塔高さは113mであり、景観性に配慮し各部に曲線形状を採用している。主塔内には航空障害灯・避雷針等の維持管理のための管理用通路(直径800mm)が設けられている。斜材定着体、型枠、鉄筋を精度良く配置するため、鉄骨を埋設することとしたが、これを有効活用するため本体利用することとしSRC構造を採用した。

3.3 主桁

主桁の支持形式は、対称2径間連続PC斜張橋の特性が生かせること及び支承が必要ないことから中間支点部では剛結方式を採用した。主桁断面形状は、桁自重の軽減、幅員、ねじり剛性の確保を考慮し3室箱桁断面とし、桁高は完成系・施工系の応力度を検討し2.5m(等桁高)とした。斜材は一面吊り形式であるため、

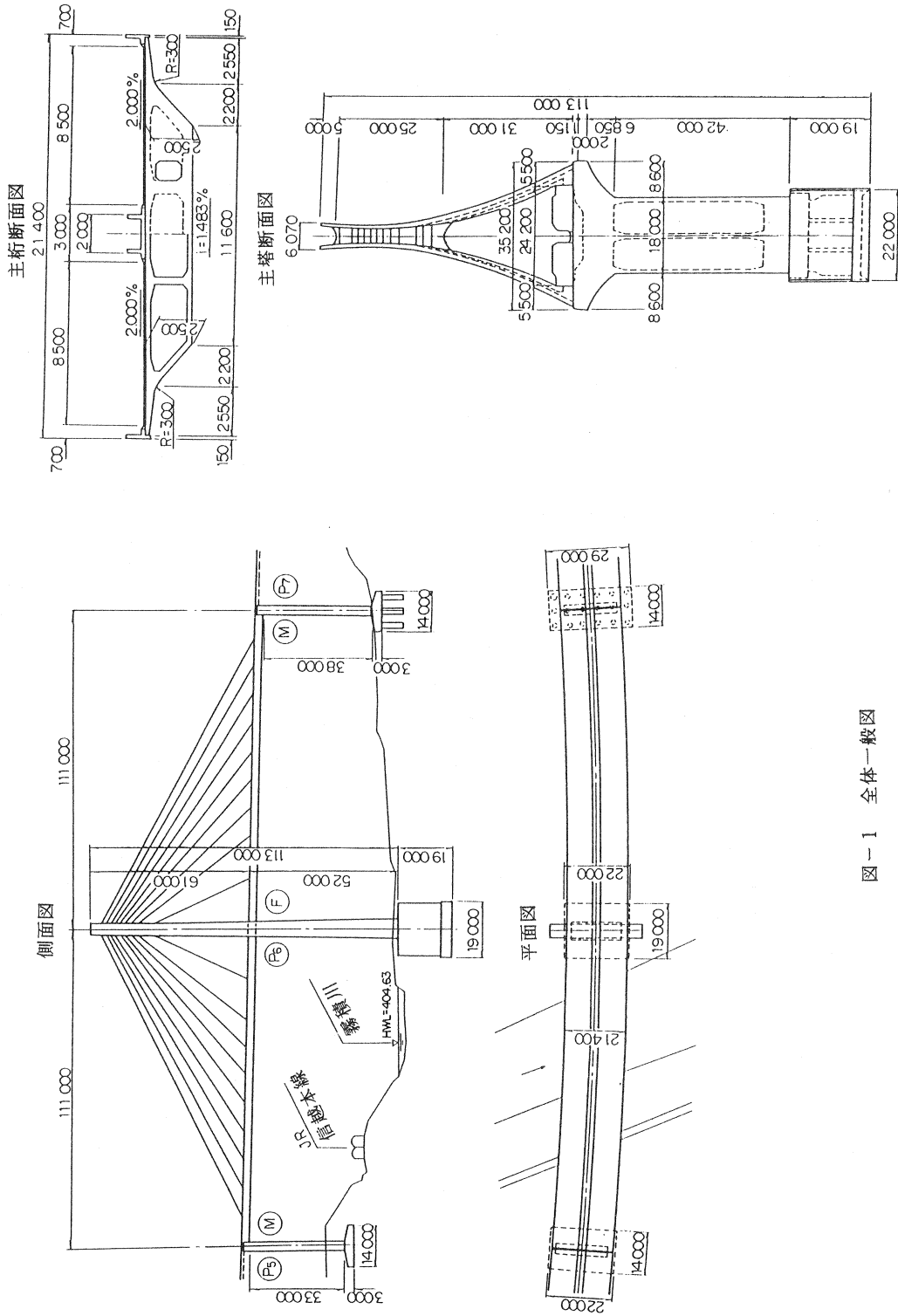


図-1 全体一般図

ケーブル定着は主桁内に斜材定着部横桁を設け中間ボックス内で行っている。

3. 4 主塔受梁部

主塔からの応力を橋脚に伝達する主塔受梁部はマッシュなコーベル構造となっており、基本的にはPC構造として設計している。なお受梁部下面形状は景観上の配慮から円曲線が採用されている。

4. 設計

4. 1 設計条件

荷重及び許容応力度は『道路橋示方書・コンクリート橋編(昭和55年)』に従うことを基本とし、規定がない事項に関しては別途定めた。これに関しては次節において説明する。

4. 2 設計の基本方針

本橋の設計に際し配慮した点をまとめると以下のとおりである。

- (1) コンクリートのクリープ・乾燥収縮による断面力は各部材毎の材令差を考慮して算出した。また応力度の照査はクリープ・乾燥収縮による移行が1/2終了した時点と全て終了した時点で行った。
- (2) コンクリートの弾性係数は現地での実績を調査し、『土木学会コンクリート標準示方書』の値とした。
- (3) 活荷重のうちTT-43荷重については、軸重を実載荷し影響線解折により断面力を算出した。
- (4) コンクリートと斜材の温度差は、斜材ケーブルがロングラウトタイプであり外気温の影響を強く受けるので、過去の施工例での実績及び現地付近の気象観測データをもとに $\pm 15^{\circ}\text{C}$ と設定した。
- (5) 斜材張力の許容値は施工時 0.6Pu (従荷重時含む)、設計荷重作用時 0.4Pu とした。なお 0.6Pu の状態、定着部の補強に関する実験、ぬじ定着部の静的引張試験、曲げ疲労試験が実施されており、ケーブル及び定着体の安全性が確認されている。
- (6) 主塔等のRC部材の鉄筋引張応力度の目標値は有害なひびわれが生じないよう死荷重時 $1000\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度とした。特に健全性を確保する必要がある斜材定着部付近については活荷重時で $1000\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度を目標とした。
- (7) 施工時の主桁応力度は、温度変化、施工中のPC鋼材応力度減少、施工管理用斜材調整(斜材張力の5%程度)を考慮した荷重状態で許容引張応力度 $=25\text{kgf}/\text{cm}^2$ におさめるものとした。また斜材張力は施工管理用の斜材調整に対応できるように5%程度の張力の余裕を確保した。

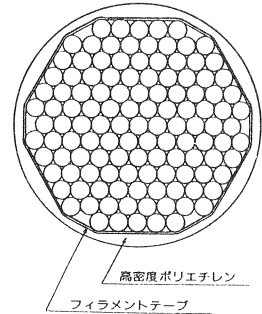


図-2 斜材ケーブル断面図

4. 3 設計の概要

本橋の設計は一般的な簡易法の他に構造上問題となる事項についてはFEM解折を実施し、設計法の妥当性の確認及び構造物の安全性の検討を行っている。ここでは特徴のある事項について報告する。

(1) 主桁の設計

本橋は広幅員の一面吊りPC斜張橋であるため斜材張力の主桁への伝達状況、各ウェブのせん断力の分担割合の把握、および桁高が2.5mと低く斜ウェブであり、かつ大型特殊ワーゲンを使用していることから施工時のウェブの斜引張応力度の照査が課題であった。FEM解折によりこれらを検討した結果は以下のとおりであった。

- 1) 斜材張力のうち鉛直分力は定着部横桁付近で直ちに有効となり、水平分力は手前側の斜材吊り点付近で均一に分布することがわかった。
- 2) 外ウェブと内ウェブのせん断力の分担は活荷重時、死荷重時共外ウェブ約125%、内ウェブ約75%であった。
- 3) 外ウェブと内ウェブ共、斜引張応力度に対するせん断鋼棒配置は施工時にて決定した。

(2) 主塔の設計

主塔は逆Y形であるため架設中の曲げ応力を低減する目的で2段のストラット(横つなぎ材)を用いて施工している。また主塔における斜材定着は、図-3に示すように片側の斜材が逆側の斜材をはさみこむようになされており、これに伴う曲げ引張応力をFEM解析により検討し、鋼材配置上の理由からプレストレスで対処することにした。主塔分岐部については骨組構造解析では応力の流れが把握できないため塔下端までをモデル化した平面FEM解析を実施したが、各荷重時共分岐部は圧縮状態となっており、景観性から定まった曲線形状が構造的にもアーチ効果により理想的であることがわかった。この他主塔に関しては、斜材定着部近傍の局部応力、管理用通路設置に伴う局部応力、主塔基部管理用通路入口設置に伴う局部応力についてソリッド要素による三次元FEM解析を実施し、局部的な鉄筋補強を行った。

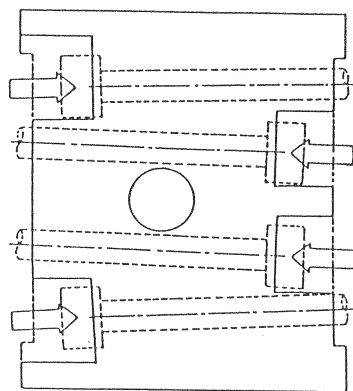


図-3 主塔斜材定着部平面図

(3) 主塔受梁部の設計

主塔受梁部は道路橋示方書コンクリート橋編によりPC棒部材ならびにコーベル部材としての設計を実施した。コーベル部材としての設計では設計荷重作用時に生ずる水平材の引張力はプレストレス力によりとらせるものとし、PC鋼材はSWPR7A19T15.2を40本配置した。

コーベル部材のせん断力に対する検討は道路橋示方書に規定されていないので、土木学会「コンクリート標準示方書」により行った。しかし本示方書はRCコーベルを対象としているため、既往の実験成果¹⁾等を参考に以下の項目をせん断耐力の検討の際に考慮した。

- 1) 軸方向緊張材の有効引張力のせん断力に平行な成分 V_{ped} を考慮する。
- 2) 鉄筋比 P_w はPC鋼材量を含めた値とする。
- 3) 軸方向プレストレス力によるデコンプレッション効果は棒部材における場合の1/2を考慮する。

(4) 斜材の設計

斜材容量は一般に施工時で決定しているが、施工中の斜材張力は、温度変化と地震が同時に作用した場合にも許容張力以内となること、また施工管理用の斜材調整にも対応できるよう5%程度の張力の余裕を確保することに留意した。

活荷重による斜材の変動応力は、最大で6.3kgf/mm²であり、鋼橋でのNew PWSケーブルでの実績と比較してもかなり小さい値であり、疲労耐力は、十分確保されていると考えられた。

(5) 斜材定着部横桁の設計

簡易法による設計では、斜材張力の鉛直方向分力に対し鉛直補強鋼材の検討、水平方向分力に対しては四辺固定版としての検討をそれぞれ行った。また横桁の曲げモーメント及びせん断力に対しては、斜材張力の鉛直方向分力が斜材定着部横桁の有効幅内に等分布荷重が作用するとして、斜材吊点を固定端とした片持ち梁で検討した。横桁の曲げモーメントに対する補強はSWPR7A19T15.2によるものとし、横桁一箇所当たり2~6本配置した。押し抜きせん断力に対する検討は、土木学会「コンクリート標準示方書」及び参考文献²⁾に基づいて行った。押し抜きせん断力 (P_{yd}) は、斜材が降伏する

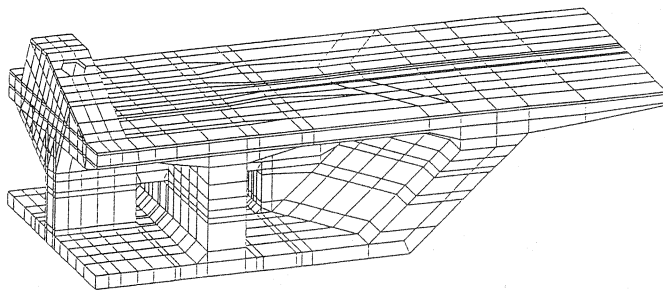


図-4 斜材定着部横桁立体FEM解析メッシュ割図

$0.7Pu \sin \theta$ とした。ここに Pu は斜材の引張強度、 θ は斜材と桁のなす角度である。
また設計押し抜きせん断耐力 (V_{pyd}) は次式により算出した。

$$V_{pyd} = V_{pcd} + V_{psd} + V_{ped}$$

ここに V_{pcd} : コンクリートの負担する設計押し抜きせん断耐力

V_{psd} : 押し抜きせん断補強鋼材により受持たれる設計押し抜きせん断耐力

V_{ped} : 横桁横締PC鋼材の有効引張力のせん断力に平行な成分の負担分

斜材張力の鉛直成分が最大の斜材定着部に関して、図-4に示すモデルでソリッド要素による三次元FEM解析を実施した。これは斜材張力の主桁への伝達状況、横桁及びその近傍の局部的な曲げ及びせん断応力を把握し、鋼材による補強の効果と簡易法による設計の妥当性を確認することを目的とした。一般的には簡易法によれば安全であることが確認できたが、斜材張力の鉛直成分により上床版が押し上げられ、斜材定着部付近の限られた範囲で床版に30~50kgf/cm²程度の引張応力の発生が見られたため引張鋼材補強をした。

また斜材定着部は、破壊モードや破壊耐力が十分把握されているとは言えないため、実橋の1/4縮尺の全断面モデルで、実橋の応力状態を極力再現した複合応力状態下での模型実験を実施した。その状況を写真-3、4に示すが、破壊モードは斜材定着部突起周辺が押し抜けるモードであり、耐力は斜材の規格降伏強度 P_y の2.0倍であった。計算耐力は2.1倍で両者が良く対応しており、簡易法による設計を適用すれば耐力が推定できることがわかった。

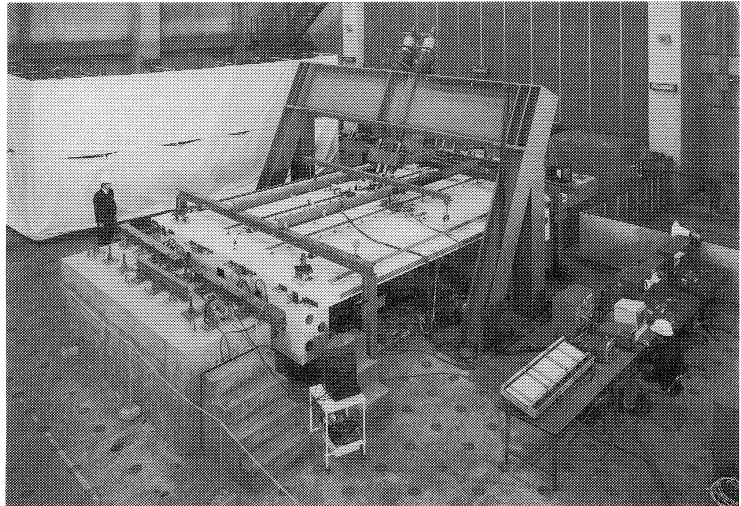


写真-3 斜材定着部模型実験載荷状況

5. あとがき

本橋は平成5年3月の供用開始を旨として、現在上部工の施工が最盛期に入っている。

本論文では碓氷橋(PC斜張橋)のPC構造に関して主として報告したが、斜材定着部模型実験の詳細、主塔の長柱安定性解析、動的解析、耐風安定性解析及び施工に関する報告に関しては別の機会に報告したいと考えている。

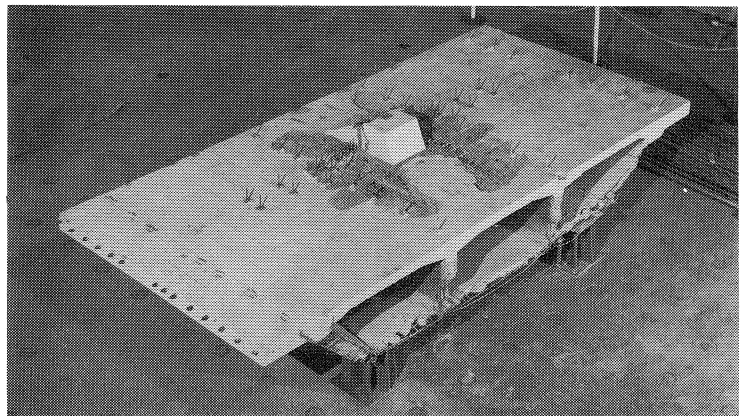


写真-4 斜材定着部模型実験破壊状況

6. 参考文献

- 1) 村山八洲雄他: 変断面PCコーベル部材の耐力算定法について、鹿島建設技術研究所年報第35号
- 2) 石橋忠良、高木芳光、大庭光商: 青森大橋(PC斜張橋)の設計概要と斜材定着部実験、プレストレストコンクリート、VOL. 30, N04 1988年 7月