

神崎川橋梁の設計と施工

CONSTRUCTION OF THE NIELSEN BRIDGE OVER KANZAKI RIVER



久保 元生¹⁾



奥原 光²⁾



浜村 正信³⁾



竹中 裕文⁴⁾

SYNOPSIS

Kanzaki River Bridge, located on the Coastal Line of the Hanshin Expressway, is a basket-handle type Nielsen bridge, having an arch rise of 30.0m and a span length of 150.0m.

Due to the fact that Kanzaki river serves as a passageway for the local navigation, a clearance of 110.0m width by 20.3m length was required beneath the girder. At the same time, the necessity of a landmark for the local navigation lead to the decision on the structural type as a Nielsen-Lohse bridge.

The main characteristics of the present bridge are the composite structure of the stiffening girder with the steel deck-plate, the use of the great block one-stage erection method, by means of a floating crane (hereafter referred to as FC), and a new type of aluminum-covered PC strand (hereafter referred to as APS cable) for the cables.

The present paper is a brief report on the design and constructive methods.

1. まえがき

神崎川橋梁は、阪神高速道路湾岸線（神戸市東灘区から大阪泉佐野市まで総延長55.6km）の神崎川河口部に位置するバスケットハンドル型ニールセンローゼ橋である（図-1参照）。

神崎川は、航路として利用されており、その航路限界を確保するため、幅110m高さ20.3mの桁下空間が必要であること、さらに航行上のランドマークとしての役割を配慮する必要があることからニールセンローゼ橋が選定された。

本橋の主な特徴としては、下弦材と鋼床版との合成構造、フローティングクレーン（以下、FCという）工法による大ブロック一括架設工法等の採用とともに、吊材としてアルミニウムカバーを施したPC鋼より線ケーブル（APSケーブル＝Aluminum covered Pc-strand Squeezing method）を使用していることがあげられる。

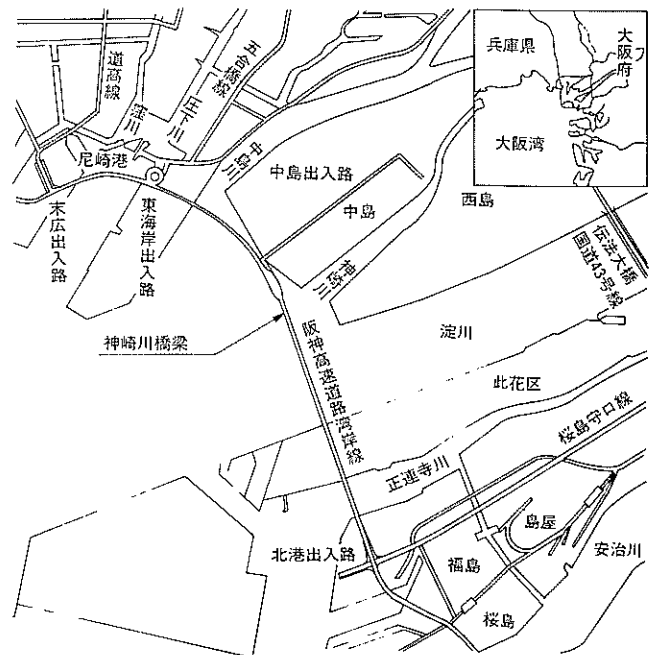


図-1 位置図

- 1) 設計技術部設計三課長代理 Motoo KUBO
- 2) 工事部工事課 Akira OKUHARA
- 3) 和歌山工場管理課長 技術士（建設部門）Masanobu HAMAMURA
- 4) 設計技術部技術開発課長 技術士（建設部門）Hirofumi TAKENAKA

2. 構造概要

本橋は、橋長150m、アーチライズ30mを有し、また北隣に、海上パーキングエリアを控えていることから、有効幅員は27.26~30.375mとかなり広幅員の鋼床版を有するニールセンローゼ橋といえる。図-2には、本橋の一般図を、また表-1には主要構造諸元を示す。

2.1 上弦材

上弦材は、面外方向の剛性を高めるため、両主構造面を約70°傾斜させたバスケットハンドル型とした。アーチライズは、経済性および景観を考慮して30m（ライズ比1/5）とした。また、図-3に示すように、上弦材を横長の箱断面にして面外方向の剛性を高めている。上横支材は、運転者への圧迫感を極力小さくするとともに、景観を配慮して、できるだけ少なく配置した。

2.2 下弦材

下弦材は、完成時に軸方向力が支配的になること、曲げモーメントに対しては鋼床版が有効に働くこと、および、経済性を考慮してI桁形式とした。ケーブル定着は、下弦材からブラケットを張り出す形式とした。

2.3 床組

床組は、トラフリブを用いた鋼床版を採用し、吊材の定着位置およびその中間に横桁を入れ、さらに、横桁間に横リブを配置した。そして、橋軸方向には両下弦材間に3本の縦桁を配置した構造としている（図-2（e））。

2.4 吊材

吊材の配置は、橋梁の規模および張力等を考慮して傾斜角60°のダブルワーレン形式とした。吊材としては、耐候性、経済性および景観等を考慮して、アルミニウムカバーを施したPC鋼より線ケーブルを採用した。

3. 設計概要

3.1 設計方針

本橋の設計に際しては、基本的に道路橋示方書および阪神高速道路公団設計基準に従った。本橋梁特有の問題については、別途種々な検討を行っている。

設計荷重としては、完成系において死荷重、活荷重、衝撃、温度、地震、風、架設誤差、および支点移動の影響を考慮した。また、架設系においては、死荷重に加え温度差、衝撃荷重、不均等荷重および特殊荷重を考慮している。

主構は、完成系および架設系とも立体骨組構造解析を行って設計した。また、床組は、立体解析および格子解析を行い、部分的には有限要素法による解析も用いて設計した。

図-4には、主構造の設計フローを示す。

3.2 荷重

(1) 完成系における荷重

本橋では、道路橋示方書に規定されている荷重のほか、下記の荷重を考慮した。

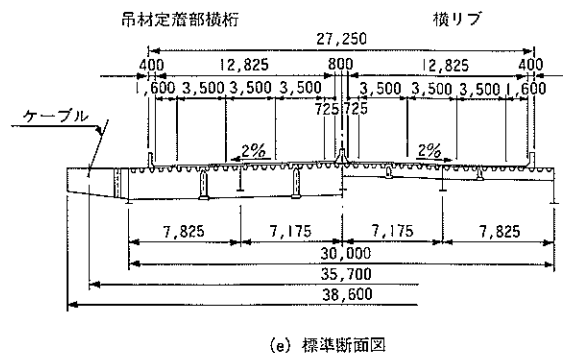
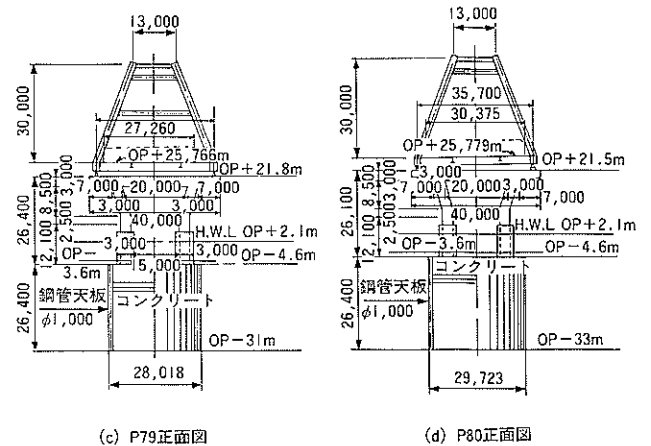
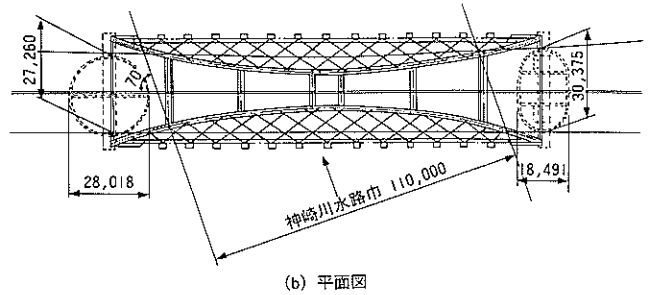
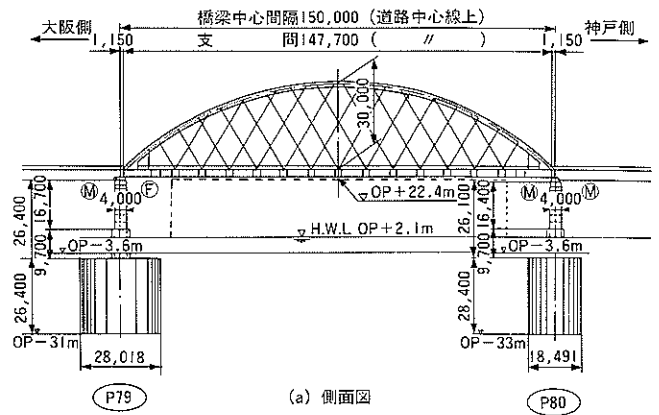


図-2 一般図

表-1 構造概要

道路名	大阪府道高速湾岸線
工事名	神崎川工区上部工事
道路構造規格	第2種第1級
設計速度	80km/h
橋格	1等橋 (TL-20, TT-43)
形式	バスケットハンドル型ニールセンローゼ桁
橋長	150.0m (道路中心線上) 149.964m (構造中心線上)
支間長	147.7m (道路中心線上) 147.664m (構造中心線上)
ライズ	R=30.0m (ライズ比R/L=1/5)
幅員	27.260~30.375m
主構間隔	基部35.7m 頂部13.0m
吊材間隔	9.375m (吊材傾斜角60°一定)
主構のたおれ角	69° 16' 36"
主要鋼材	SM58, SM50Y, SS41
吊材断面	SWPR 7B φ15.2-19本 (アルミカバー付)
総鋼重	3100 t

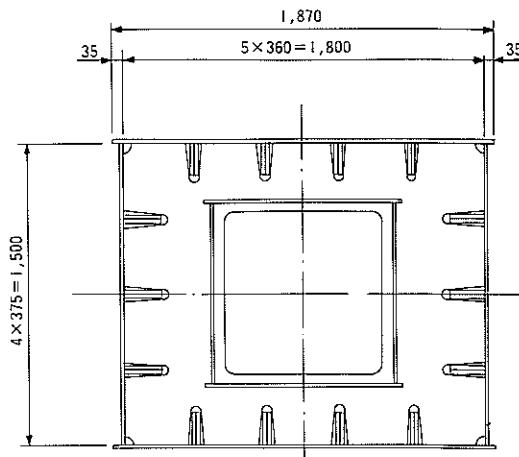


図-3 上弦材の断面寸法

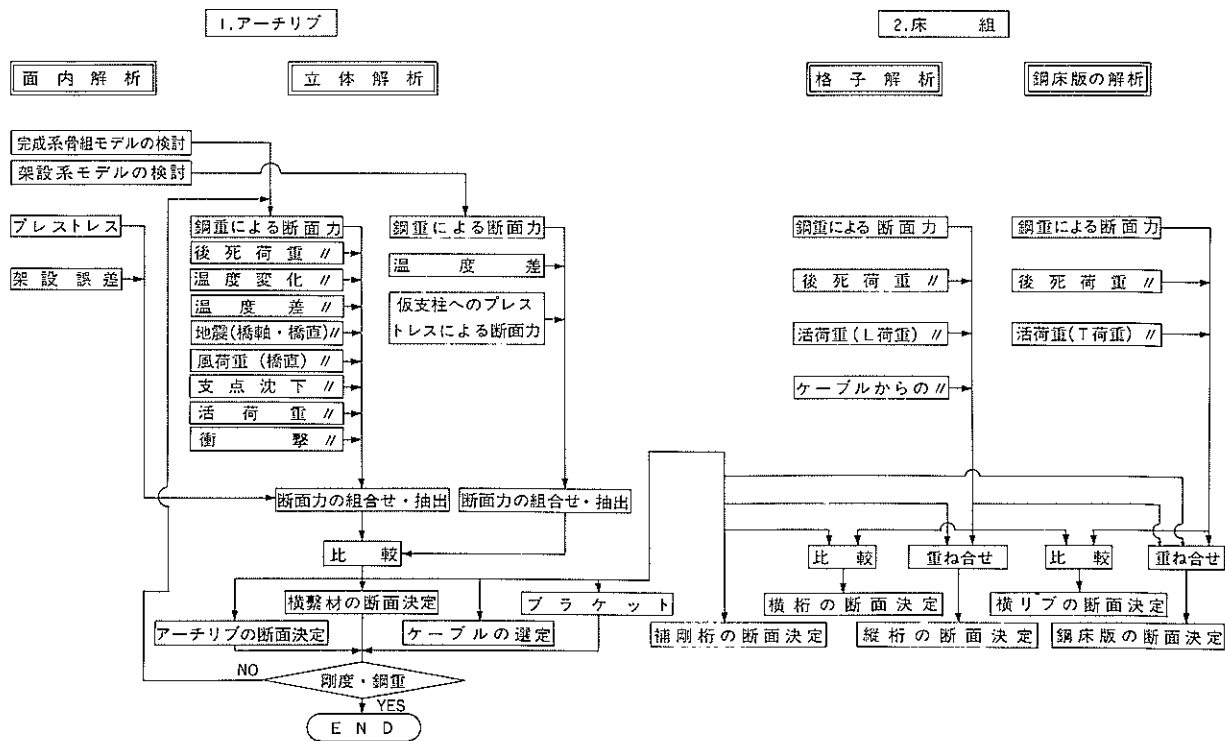


図-4 主構造の設計フロー

a) 風荷重

上弦材に対する風荷重としては、「新浜寺大橋上部工設計指針」(阪神高速道路公団)に基づいて設計風速(69m/sec)および風荷重強度(590kgf/m²)を求めた。

b) 架設誤差

ケーブルの残留張力誤差に伴う架設誤差の影響についても荷重として取り扱うこととした。すなわち、橋体の一括架設後にはケーブルの張力調整を行うが、その際不可避的

に残存する張力誤差を考慮して設計を行うものとした。その場合、「死荷重+プレストレス」による張力の10%を残存誤差としてケーブルに作用させることとし、これを架設誤差にともなう荷重とした。

c) 支点移動の影響

支点移動としては、橋脚の橋軸直角方向の回転を考慮することとし、回転量としては、主構造間隔の1/1000とした。

(2) 架設系における荷重

吊架航による大ブロック架設時における荷重としては、下記の荷重を考慮した。

a) 基本鉛直荷重

架設時死荷重、仮設備および架設機材重量を考慮した。

b) 温度差

下弦材の上下フランジ間で15°Cの温度差を考慮し、腹板の上部300mmの範囲内で三角形分布するものとした。

c) 衝撃荷重

FCの動揺にともなう動的荷重を考慮することとし、衝撃係数として $i=0.15$ を設定した。この荷重に関する検討結果については後で詳しく述べる。

d) 不均等荷重

橋体の重心の誤差およびFCの吊りワイヤーの摩擦等にもなう不均等荷重を考慮することとし、荷重の割増し係数を0.10とした。

e) 特殊荷重

本橋では、ケーブルの張力調整をFCによる一括架設後に行うこととしている。そのため、一括架設時においてケーブルの残存張力誤差に起因する断面力の変動が懸念される。そこで、ケーブル張力の誤差要因の抽出を行うとともに、その影響について定量的な評価を試みた。表-2には、今回想定した種々な誤差にともなう各部材の断面力の変化率を示す。そして、これらの誤差による断面力変化率を誤差伝播の法則に従って求め、各部材に対する特殊荷重における割増し係数として下記のように設定した。

下弦材：0.25

上弦材：0.1

吊材：0.15

3.3 構造解析

本橋は、上弦材が傾斜したバスケットハンドル型であるので、立体骨組構造解析を行って、面内・面外荷重を同時に取り扱うこととした。また、隅角部および鋼床版の設計に際しては、応力の発生状況を極力正確に把握するため、有限要素法による解析も行った。さらに、鋼床版の座屈に対する安全性を確認するため、弾塑性有限変位解析も行った。

3.4 各部材の設計

(1) 上弦材

上弦材は、圧縮と曲げを受ける柱として設計した。有効座屈長としては、面内の座屈に対しては、吊材間隔、面外の座屈に対しては、上横支材間隔の70%とした。また、フランジの曲がりによる付加応力を考慮して設計した。

(2) 下弦材、縦桁

鋼床版との合成構造としており、軸力に対する有効幅については、FEM解析を行うことによって有効幅を設定した。また、架設時において圧縮力が作用するため、圧縮補剛板としての照査も行った。

(3) 上横支材

表-2 各誤差による断面力の変化率

誤差	誤差の要因	設定誤差	着目点	変化率 α	備考	
解析誤差	荷重誤差	仮定荷重と実荷重との誤差		+2.5%	+0.025	
	剛度誤差	下弦材の剛度誤差	鋼床版	下弦材	+0.043	
			全幅有効	上弦材	-0.077	
				ケーブル	-0.055	
	上弦材吊点位置の剛度誤差	フランジ	下弦材	-0.055		
		全幅有効	上弦材	-0.000		
			ケーブル	-0.068		
ケーブル定着間隔誤差	骨組誤差	解析モデルと実モデルとの誤差	下弦材		製作架設時の骨組形状誤差については断面力に与える影響は小さいので無視する	
			上弦材			
ケーブル定着間隔誤差	計測誤差	ケーブル定着間隔距離の測定誤差	±5mm	下弦材 ±0.091 上弦材 ±0.044 ケーブル ±0.079		
	温度誤差	ケーブル定着間隔距離の測定時の温度による誤差	±5°C	下弦材 ±0.035 上弦材 ±0.015 ケーブル ±0.015		
キャンバー誤差	組立誤差	上弦材組立時、ベント反力の誤差	10tf	下弦材 ±0.030 上弦材 ±0.030 ケーブル ±0.030		
	鋼床版溶接によるキャンバー誤差	鋼床版溶接の縮みによるキャンバー誤差	±50mm	下弦材 ±0.151 上弦材 ±0.014 ケーブル ±0.000		
ケーブル誤差	弾性係数誤差	ケーブルの弾性係数の誤差	$1.95 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ $-1.97 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	±0.010		
	無応力長の計測誤差	ケーブル無応力長の計測誤差	±5mm	下弦材 ±0.091 上弦材 ±0.044 ケーブル ±0.079		

上弦材の座屈防止材として、また面外方向の風・地震荷重に対して設計した。

(4) 吊材

ケーブルの切断荷重に対する安全率は、道路橋示方書の「ハンガーの安全率」に従い、3.5とした。

吊材の構造としては、アルミニウムカバーを施したPC鋼より線ケーブルを使用している。このケーブルの基本的な力学的特性・設計法等については、文献4)にまとめられているが、施工例が少ないため、種々な実験や検討を加えて設計・施工を進めた。

図-5にはケーブルの断面図を示す。ケーブル本体としては、ポリエチレンで被覆したPC鋼より線(7本より線φ15.2mm、材質SWPR7B)を19本束ねたものを使用しており、引張荷重は、505.4tfである。ケーブルの外周には、クロロブレンゴム製の弾性スペーサーを介して、厚さ2mmのアルミニウムカバーを施している。したがって、PC鋼より線の防錆は、ポリエチレン被覆とアルミニウムカバーとの2つによって行われている。

APSアンカーケーブルの主要特性は、表-3に示すとおりである。

図-6にアンカー部の構造を示す。アンカーは、ソケット

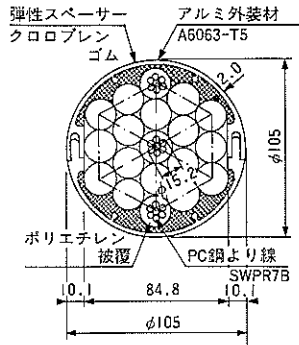


図-5 APSケーブルの断面形状

表-3 ケーブルの特性

引張強度	190 kgf/mm ² 以上 (SWPR 7B)
疲労強度	20kgf/mm ² 以上
弾性係数	19,500kgf/mm ² 以上
コンパウンドの熱変形温度	70℃ 以上
防食方法	PC鋼より線のポリエチレン被覆+アルミニウムカバー

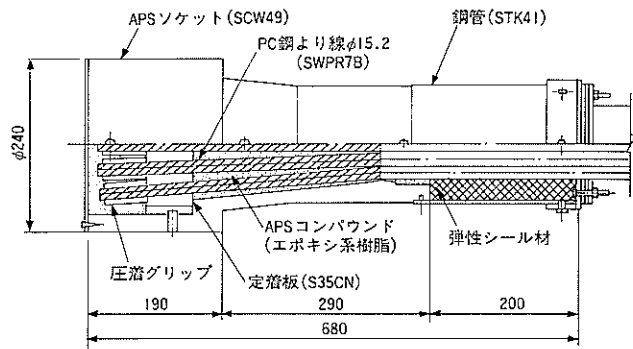


図-6 APSアンカーの構造

ト、定着板、エポキシ樹脂 (APSコンパウンド) および弾性シール材より構成されている。PC鋼より線の定着は、圧着グリップと定着版によってなされており、ケーブルの引張荷重に耐えられるように設計している。ソケット内に充填されているコンパウンド (エポキシ樹脂) は疲労強度の向上に寄与している。また、ソケット先端部には、ソケット内への水の侵入を防ぐため弾性シール材を充填している。

(5) 床組

本橋の床組は、両補剛桁間で30m、吊材定着間で35.7mと極めて広い幅員を有している。経済性、施工性、景観および構造上の問題等に関して種々な検討を加えて設計している。

(6) 端横桁

完成系、架設系における立体解析およびジャッキアップ時の断面力を考慮して設計した。

(7) 隅角部

上弦材起きようと部や上弦材と上横支材の隅角部は、応力伝達状況が複雑であるので、有限要素解析を行って所要の安全率が確保されるように設計した。

(8) 鋼床版

本橋は幅員が30m余りあり、橋軸方向の面内引張応力はもちろん橋軸直角方向の曲げによる圧縮応力が作用しているため、2方向の面内力を受ける補剛板としての座屈安定照査を行った。

4. 各種実験・検討の概要

上述したように、本橋の設計施工に際しては、種々な実験および検討を行っているが、ここでは、それらについて概説することとする。

4.1 2方向面内力を受ける補剛板の設計法に関する検討

上述したように、本橋の鋼床版は橋軸および橋軸直角の両方向の面内力を受けるので、2方向の面内力を受ける補剛板としての座屈安定問題に関する検討を行った。その際、文献⁵⁾で提案されている方法に従うこととした。

検討の結果、予備設計における材質 (SS41) と板厚 (12mm) では所定の安全率 (1.7) を確保できないことがわかった。そのため、横桁の剛度を上げる方法および鋼床版の材質・板厚を上げる方法等床組構造も含めて種々検討した。そして、最終的に経済性や施工性等も考慮して、材質をSM50Yに、板厚を14mmに変更することとした。

また、決定した床組構造に対して有限要素解析を行い、鋼床版に発生する応力特性を把握して、弾塑性有限変位解析を用いて座屈安全照査を行った。本橋の鋼床版の作用応力に対応する点を極限強度の相関図上にプロットすれば、図-7のようになり、許容応力相関曲線に入っていることがわかった。

2方向面内力を受ける補剛板の耐荷力については、阪神高速道路公団の委託により、大阪市立大学において確認実験が行われた⁶⁾。

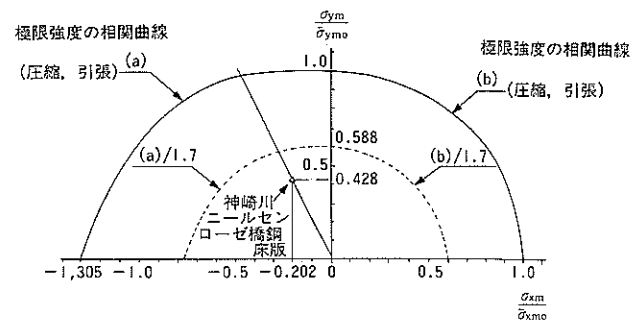


図-7 終局強度の相関曲線

4.2 ケーブルの力学的特性に関する実験・検討

APSケーブルの疲労強度は、文献4)によれば、20kgf/mm²以上であることが疲労実験を通じて確認されている。しかしながら、施工実績が少ないことと、ニールセン橋に対応するように定着部の構造を変更していることから、本ケーブルの力学的特性に関し、阪神高速道路公団の委託により、京都大学において疲労強度の確認およびクリープ・リラクセーションの特性の確認実験が行われた⁷⁾。疲労実験の結果を表-4に、クリープ・リラクセーションの試験結果を図-8～9に示す。その結果、所要の力学的特性が得られていることが確認された。

表-4 疲労試験結果

条 件	載荷条件	繰返し数 (回)		最終繰返し回数 (回)
		初破断	3%破断	
1	σ_u : 54kgf/mm ² $2\sigma_a$: 20kgf/mm ²	無	無	2×10^6
2	σ_u : 65kgf/mm ² $2\sigma_a$: 22.5kgf/mm ²	無	無	2×10^6
3	σ_u : 65kgf/mm ² $2\sigma_a$: 27.5kgf/mm ²	1,101,130	1,708,020	2×10^6

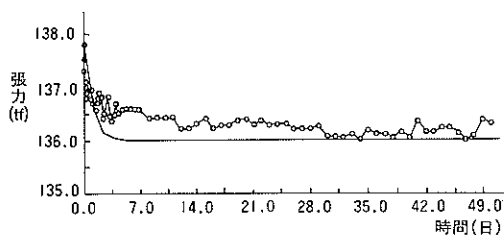


図-8 リラクセーションの経時変化

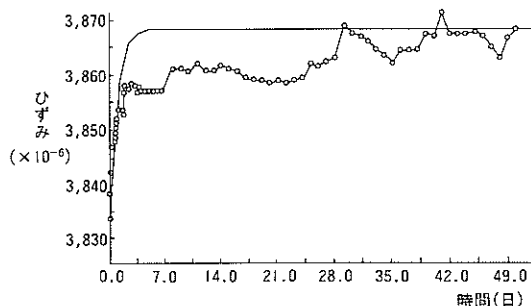


図-9 クリープの経時変化

4.3 一括架設における橋体の動揺に関する検討

橋体の吊曳航時および一括架設時には、FCの動揺にともなう動的荷重が橋体に作用する。そこで、大ブロック架設系における固有値解析および想定されるFCの動揺周期に対する動的応答解析を行って、架設時における橋体の安全性を照査することとした。

解析モデルとしては、大ブロック架設系の平面モデルとし、もちろん架設時に圧縮となるケーブルは除去してある。動的荷重としては、FCの動揺による橋体の加速度計算を行って、その値を0.1Gとした。そして、1～20次の振動モードに対する固有値および周波数0.05～15.0Hz（この間で40種類の周波数を設定した）に対する応答値を計算した。

その結果、まず大ブロック架設系における固有周期は、1次モード：2.7秒、2次モード：0.71秒、3次モード：0.54秒であった。一方、FCの動揺周期は、6～7秒と想定され、橋体の固有周期との差が大きいことから、共振現象は生じないものと考えられる。

つぎに、FCの動揺周期を6秒とした場合の応答値は、静的荷重による断面力の10%程度であり、加速度0.1gとほぼ一致する。したがって、橋体は、吊曳航時および一括架設時におけるFCの動揺に対して剛体運動をするものと考えられる。

これらのことから、架設系における荷重の1つとして考慮した衝撃係数=0.15は、十分適切な値であるといえよう。

5. 架設概要

神崎川橋梁の地組立および架設に際しては、詳細設計と架設計画とを並行して進め、架設系（吊上げ系）における照査結果に基づいて主構本体の補強材、架設用吊金具および仮支柱などを設計した。

昭和63年12月より、泉大津助松埠頭において地組立工事に着手した。地組立ヤードは、地耐力が期待できないのでH杭による基礎を設けた。

平成元年1月より、下弦材および鋼床版の組立ておよびヤード溶接を行い、平成元年4月より、上弦材の組立ておよびケーブルの取付けを行った。

地組立された橋体の輸送は、フローティングクレーン（以下、F.Cという）による吊運搬とした。

平成元年6月25日に、浜出しおよび一括架設を行う予定で地組立て作業を進めたが、当日は悪天候で作業中止基準を超えていたため中止とし、7月9日に浜出しおよび一括架設を行った。

架設地点は、神崎川航路上となるので、休日の昼間に航路を全面閉鎖して吊運搬した橋体を大ブロックで一括架設した。

架設完了後にケーブルの張力調整および橋面工の施工を行い、平成元年10月に工事を完了した。

5.1 地組立

本橋は、大ブロック一括架設工法で架設するので、地組立ヤードにおいて全部材の組立てを行った。図-10に地組立作業フローを示す。地組立に際しては組立て精度の確保と不等沈下防止のために、主要な支持点には支持架台（杭基礎4-H400）を設けた。

和歌山工場から地組立ヤードへの部材の輸送は、斜材ケーブルを含め全て海上輸送とした。

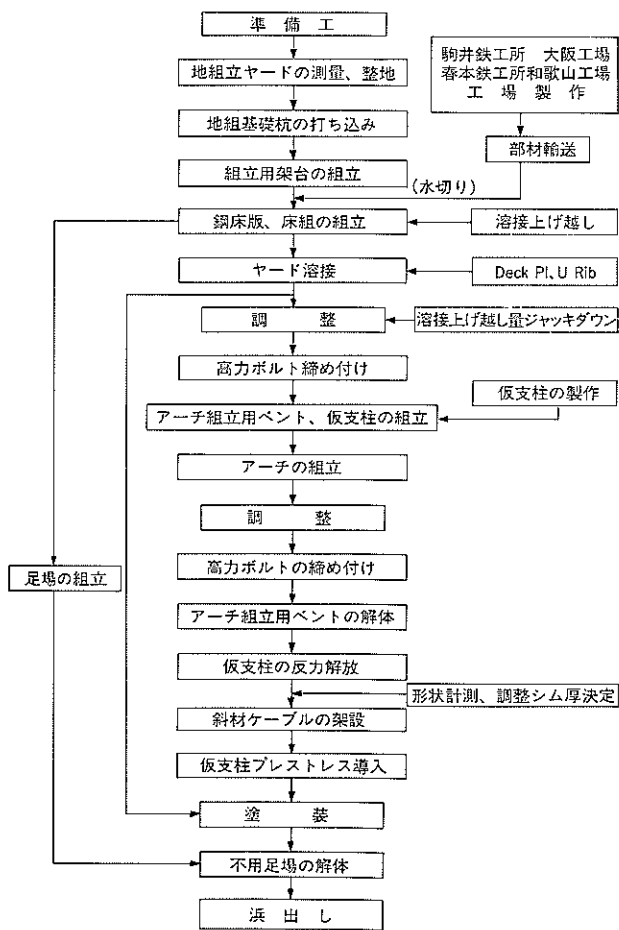


図-10 地組立の作業フロー

(1) 下弦材・鋼床版の組立

下弦材および鋼床版は、45ブロック（約2000 t）を150t吊クローラークレーンを用いて支間中央より端部へと順次対称に組立を行った。なお、ヤード溶接による収縮の影響を考慮してキャンバーの上げ越しを行い、溶接完了後、上げ越し分をジャッキダウンにより調整して高力ボルトの締め付けを行った。

ヤード溶接による継手は、橋軸方向が4列、橋軸直角方向が10列で、溶接延長は約9000m（6mm換算）あり、溶接はサブマージアーク溶接により、中央より端部に何って対称に行った。溶接継手の検査は、溶接線の端部および交差部ではX線検査を行い、中間部では超音波探傷試験を行った。

(2) 上弦材の組立て

鋼床版上にペント8基および仮支柱4本（ペント兼用）を組立て、300 t吊のクローラークレーンを用いて両端部より対称に組立て、中央の部材を調整ブロックとして製作し上弦材の閉合を行った（写真-1）。

(3) ケーブルの取付

大ブロック架設時におけるケーブルの残存張力誤差を小さくする方法としては、地組立時において支点支持状態で張力調整を行うことも考えられるが、地組立現場の地盤状

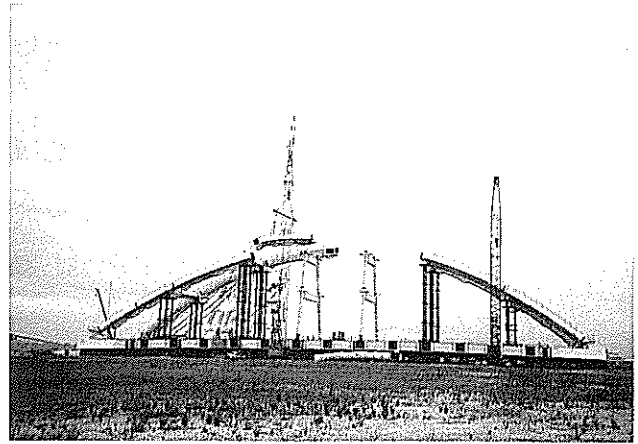


写真-1 上弦材の組立

況から、この方法は極めて困難であると判断した。そのため、ケーブル長およびケーブル定着間長による管理を行った。

上弦材の高力ボルトの締め付け完了後に、ペントの解体撤去および仮支柱の解放を行い、ケーブル定着間長の実測を行った。定着間長の計測は、ピアノ線を全ケーブル（56本）の定着面間に張りわたし、温度の影響をあまり受けない早朝に行った。その結果と上弦材のタワミおよびケーブルの製作誤差データとを考慮してシムプレート厚を決定した。

ケーブルは、製作工場においてアルミカバーを取付けた状態で地組立現場に搬入した。

そのため、ケーブルの架設は、ケーブルホルダー（吊天秤）を使用して油圧クレーンによる相吊りで行った。架設時には、ケーブルの角折れ、アルミカバーの損傷等のないよう細心の注意を払った（写真-2）。

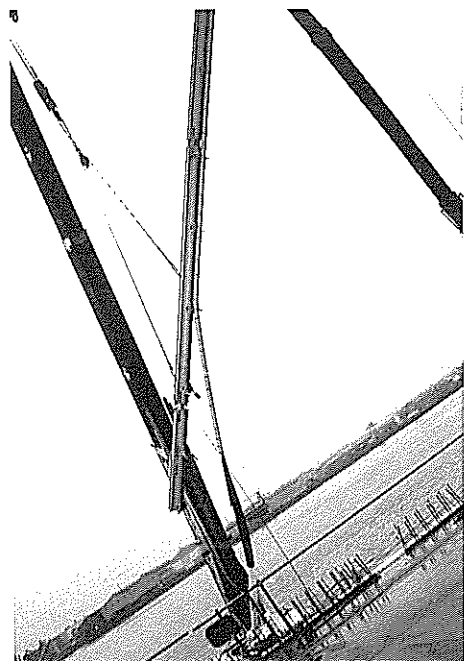


写真-2 APSケーブルの取付

ケーブルの架設手順は下記のとおりである。

- 1) ケーブルホルダーの取付け：仮置きされたケーブル上にケーブルホルダーをセットし、ケーブルバンドによってケーブルをホルダーに固定した。
- 2) ケーブルの吊上げ架設：2台の油圧クレーンを使用してホルダーを傾斜させた状態で吊り上げ、ケーブルのソケットを、まず下弦材側の定着板にセットし、つぎに引込みワイヤーを取付けて上弦材側の定着板にセットして仮固定を行った。
- 3) ケーブルホルダーの固定解除：ケーブルのソケットが定着板に仮固定されていることを確認した後に、ケーブルバンドの固定装置を解除して、ケーブルをホルダーから解放した。
- 4) シムプレートの挿入：ケーブル引込み用治具を用いて、上弦材側には所定のシムプレートを、下弦材側には調整シムプレートを挿入した。

5.2 大ブロック一括架設

架設工法として、ベント工法、台船工法およびFC工法の3案が考えられた。これらについて、橋梁型式、橋体重量(3,200 t)、架設地点の条件、工期、作業性、および経済性等を比較・検討した結果、架設地点が神崎川の航路上であるので架設時には航路閉鎖が必要となること、また水深が浅い(満潮時4.9m)ことから、最も短期間で架設することができるFCによる大ブロック一括架設工法を採用することとした。また、橋体の輸送は、地組立ヤードと架設地点とが近く、大阪湾内であることよりFCによる吊運搬とした。

(1) 吊り上げ方法

橋体の吊り上げ方法としては、上吊り(上弦材を吊る)と下吊り(下弦材を吊る)とがあるが、それぞれの吊り方法における仮支柱の断面および本数について検討した結果、最も経済的となる上吊り(吊金具16点、アーチリブと仮支柱4本とが一体構造となる)によって吊り上げることとした。吊運搬については、橋体の動的解析を行い、安全性を確認した。

仮支柱は、架設時の橋体の形状保持と上弦材と組立時の支保工を兼ねるよう設計した。架設時および架設後に引張力が作用するので架設時の引張力の軽減と架設後の解体を容易にするため地組立時にプレストレスを導入することとした。

(2) 浜出し

浜出し作業は、早朝からの吊運搬のスケジュールに合わせて深夜に行った(写真-3)。また、昼間にリハーサルおよび試験吊り(負荷50%)を行い、作業手順、安全性等を確認した。

(3) 吊運搬

泉大津防松埠頭から神崎川河口まで、大阪湾内約18kmを3時間で吊曳航した。曳航は、主曳船(6000PS)1隻と補助曳船(3000PS)4隻にて行い、河口付近において、主曳

表-5 吊り方法の比較

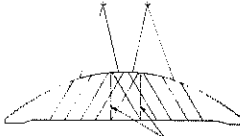
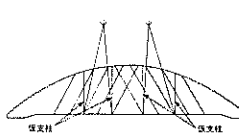
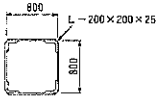
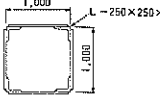
	上吊方法	下吊方法
概要図		
仮支柱の断面		
本体の補強	1).アーチリブの補強が大きい。 2).下弦材の補強は負モーメント部の水平補剛材の追加のみ。	1).アーチリブ補強は比較的小さい。 2).下弦材の補強が必要となる。 3).吊点部の補強が大きくなる。
作業性	作業床 上吊のため、アーチリブ面に、ワイヤー連結用の作業床を必要とする。	作業床 鋼床版上でのワイヤー連結となるので特に作業床は必要ない。
	ワイヤリング 高所作業となるが、ワイヤーの連結作業に対して問題は少ない。	ワイヤリング 鋼材ケーブルと吊ワイヤーが交鎖するため、非常に困難。
評価	○	△



写真-3 浜出しの状況

船を吃水の浅い曳船(3000PS)2隻に取替えて架設地点まで曳航した。写真-4に吊運搬の状況を示す。

(4) 一括架設

FCは、架設地点に到着後、前方4点、後方5点のアンカーで係留され、係留索により架設位置へ進入した。架設時には、橋体の重量を、FCの荷重管理により沓へ移しつつ沓のセットを行うとともに、FCの吃水確保のため、バラスト調整を行った。FC進入、架設、ワイヤリング解体、FC離脱までの一連作業を、約9時間で無事完了することができた(写真-5)。図-11に架設状態図を、表-6に架設作業のフローを示す。

沓は、あらかじめ橋脚上に仮据けしておいたが、最終的に地組立時の支間、吊り上げ時の橋体変位量、架設時の支点移動および橋体の温度等の計測結果を考慮して据付けた。

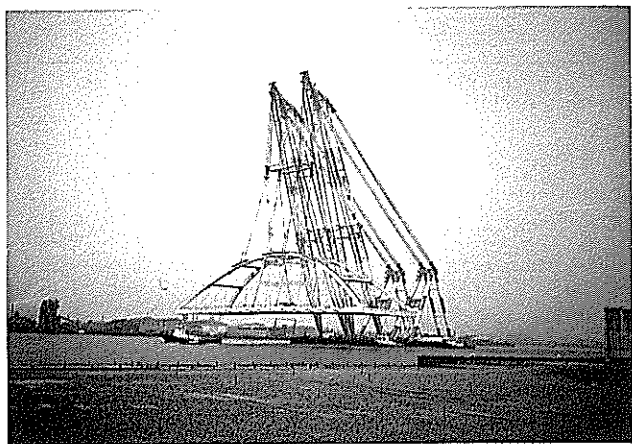


写真-4 吊運搬の状況

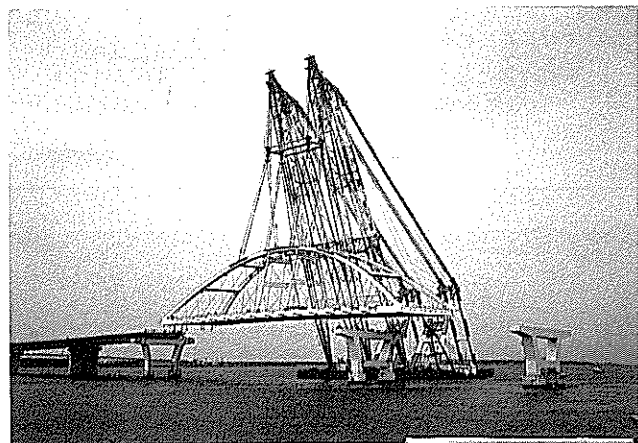


写真-5 一括架設の状況

表-6 一括架設作業フロー

月日	作業フロー	管 理 項 目	管理方法及び目視	チェックポイント
7/9	9:00 現地進入準備			約2km 手前
	15:00 曳船盛替			
	17:00 現地進入	現地集合	潮位 FC吃水 揚程	実測 FC ドラフト マーク
	17:30 FC係留	現場移動	警戒船 配置 按留位置	FC揚程計 及び目視
	18:00 アンカー投錨			
	18:00 灯浮標設置	架設準備		
	19:00 FC位置合わせ、係留	架設準備	FC 船位置 揚程 誘導	目視
		巻き下げ(クリア1.0m)		
		荷重調整		
		引寄せ装置セット		
	P79G1 寄位置合わせ	桁の通り	橋軸方向 橋軸直角 方向	ケーブル 点検
	桁引寄せ			
	巻き下げ			
	P79G1タッチ			
	G2 寄位置決め			
	P79寄セット			
	巻き下げ			
	桁引寄せ			
	P80G1, G2 寄位置決め			
	巻き下げ			
20:30	P80寄タッチ			P80 寄遊間 ケーブル 点検
	荷重解放			
	荷重負荷 100%		吊荷重 FC吃水 P80 寄移動量	P80寄 遊間計測
	// 90%	バラスト調整		
	// 70%			
	// 50%			
	// 30%			
	// 10%			
	// 0%			
22:00	吊具解体			
	振れ止め索取り外し			
	作業配置解除			
23:00	FC係留解除			
	アンカー揚錨			
23:30	FC離脱			
	回航船団出発			
	作業完了			
	FC回航			
	解散			

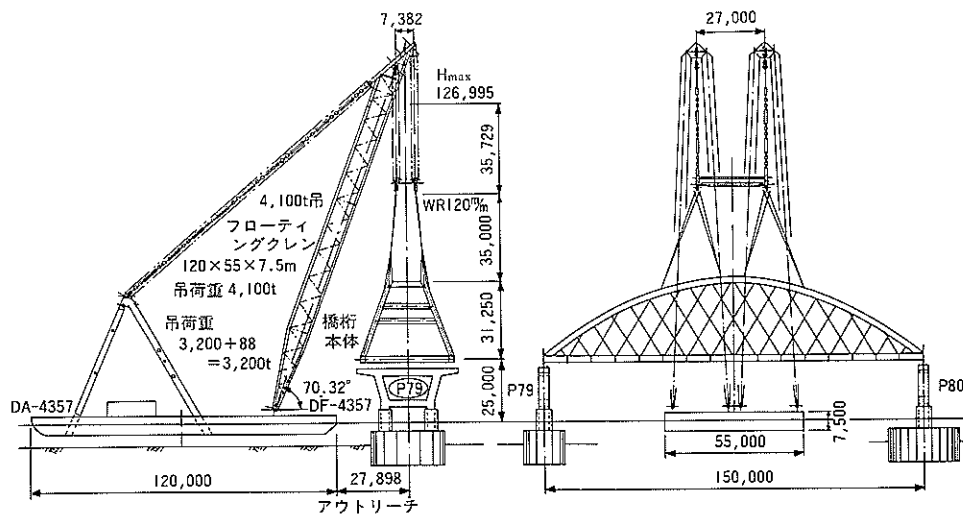


図-11 架設状態図

また、架設時の沓のセットを容易にするため、上沓にガイド機能をもたせた突起を設けた。

架設完了後、仮支柱の残存引張力をセンターホールジャッキを用いて解放し、仮支柱の解体撤去を行った。

表-7には、全体の実施工程を示す。

6. ケーブルの張力調整

6.1 概要

ニールセンローゼ桁橋におけるケーブル張力の調整は、斜張橋の場合と同様に、架設精度の向上を図ることによって、構造物に作用する種々な断面力および形状を極力設計値に近づける上から、極めて重要な作業の一つとして位置付けられる。

このような吊り構造物におけるケーブルの張力調整量の算出方法としては、従来から種々な方法が提案されている。なかでも、①ケーブル張力の許容誤差を制約条件として設定し、その範囲内でシム調整量を最小化する方法、および、②ケーブル張力および橋梁の各着目点におけるキャンバー（計画高等）の誤差に対して求めた2つの独立したシム調整量に基づいて、最適なシム調整量を決定する方法が一般的であろう。また、③ケーブル張力、キャンバー等の各管理項目における残留誤差を無次元化した二乗和にシム量自身の二乗和を加えて、これを目的関数として最適シム調整量を算出する方法なども提案されている。

本橋では、橋梁形式および過去の実績等を考慮し、上述の②の方法を用いることとした。その際、ケーブル張力の調整は、橋体の一括架設後、地覆・高欄・中央分離帯および舗装を施工する前に行うものとした。図-12には、本橋におけるケーブルの張力調整作業の基本フローを示す。

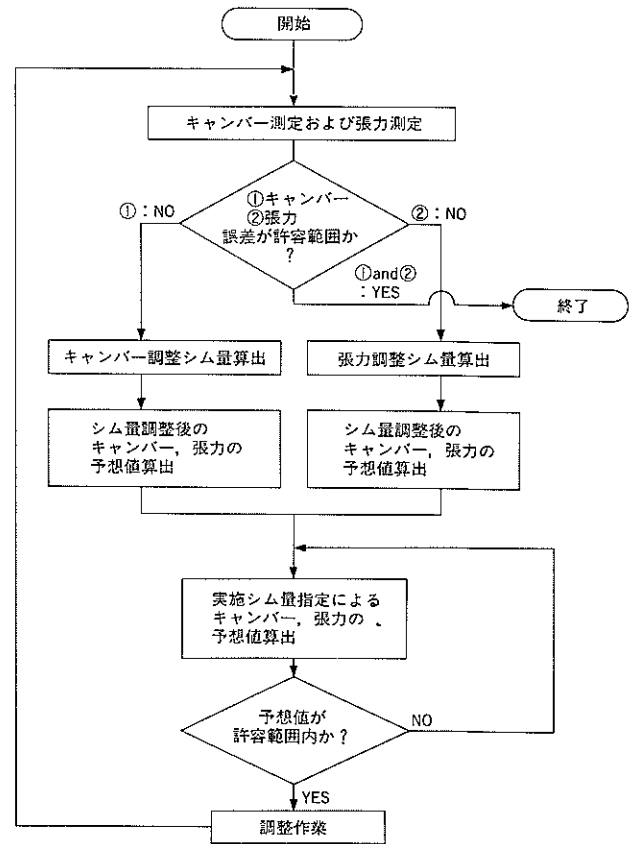


図-12 張力調整作業の基本フロー

表-7 全体実施工程表

年度 工種	1988年					1989年									
	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
工場製作、工場塗装	101520	101520	101520	101520	101520	101520	101520	101520	101520	101520					
地組基礎、組立用架台															
部材輸送															
鋼床版地組															
現場溶接、X線検査															
高力ボルト締付															
仮支柱組立ベント組立															
アーチ組立															
斜材ケーブル組立															
現場塗装															
沓据付															
浜出し、曳航、架設															
橋面工、跡片付け															

6.2 ケーブル張力の測定

ケーブルの張力および下弦材の計画高は、橋体の各部材間の温度差が小さくなる夜間に計測することとした。その際、温度差に伴うケーブル部材の張力変動量の試算結果に基づき、温度差が3°Cを越える場合には計測を行わないものとした。そのため、橋体の各部には温度センサーを取付けて、張力等の計測前後に温度を計測している。

ケーブル張力の測定は、まずケーブルを人力によって加振して固有振動数を計測した。つぎに、あらかじめケーブルの工場製作時において検定された張力一固有振動数換算式を用いて作用張力を求めた。

図-13にはケーブル張力、計画高および温度の計測位置を示す。

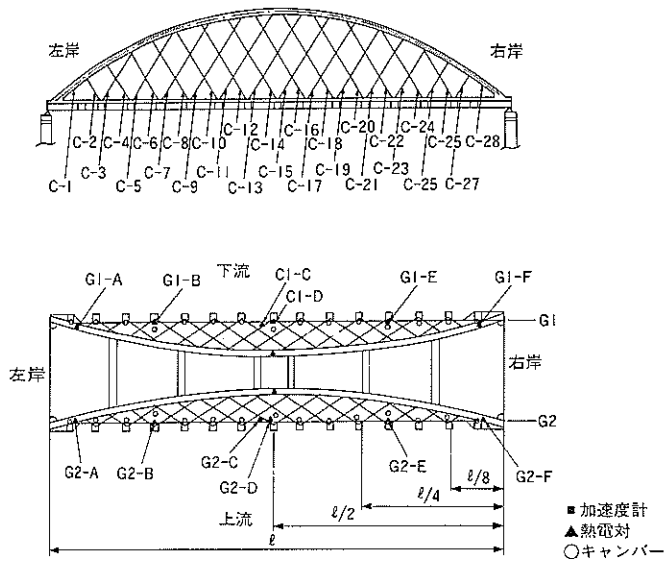


図-13 ケーブル張力、計画高および温度の計測位置

6.3 シム調整量の算出

シム調整量の算出は、まず立体骨組構造解析によって、張力影響マトリックスおよび変位影響マトリックスを求めた。つぎに、最小値問題の解決法としては、2次計画法(Quadratic Programing)を用いることとした。以下に、シム調整量の算出法の概要を示す。まず、ケーブルの張力に着目したシム調整量 ΔS_c は、下記のように表せる。

$$\Delta S_c = D \{ (\Delta T + kT_0) + \epsilon \}$$

ここに、

ΔS_c : シム調整量

ΔT : 張力誤差

T_0 : 目標張力

D : 張力影響マトリックス

k, ϵ : 許容張力誤差に関するパラメータ

そして、目的関数を f_c を、

$$f_c = \sum (\Delta S_c)^2$$

として、これを最小化する手法によった。

一方、形状管理のためのシム調整量は ΔS_d は、

$$\Delta S_d = G (\Delta \delta + \epsilon)$$

と表せる。ここに、

ΔS_d : シム調整量

$\Delta \delta$: 形状管理目標値との誤差

G : 形状影響マトリックス

ϵ : 許容形状誤差に関するパラメータ

そして、目的関数 f_d は、

$$f_d = \sum (\Delta S_d)^2$$

となる。

このようにして、2つの独立した最適シム調整量を求めるが、実際にはこれら両者の答が一致することはまずない。本橋のケーブル張力調整においては、あらかじめ単位シムに対する張力および変位の影響を調べた結果から、変位応答量に比べてかなり小さいことがわかっていたので、ケーブル張力を主としてシム調整量を決定することとした。もちろん、決定したシム調整量による変位応答も求め、その際の応答計算値が形状管理に支障を与えないことを確認している。

6.4 張力調整結果

表-8には、ケーブル張力の調整結果を示す。

まず、第1回目の調整においては、計算応答値と実応答値との比較検討のことも考えて粗調整を行うこととした。その結果、全ケーブルの約40% (24箇所) について6~13mmのシムを挿入あるいは抜くこととした。第1回目のシム調整後、計算応答値と実応答値との比較検討を行って、端部のケーブルを除き計算応答値と実応答値とがよく一致することを確認した。

第2回目のシム調整では、全ケーブルの80% (45箇所) を調整した。その結果、全体の約90%が5%程度の張力誤差の範囲内に入った。そして、最終的に第3回目の調整は、6本のケーブルについて行った。

以上の結果、各ケーブルの目標張力に対する誤差は、概ね5%程度の範囲内となった。もちろん、下弦材の計画高の誤差も許容値内にあり、本橋のケーブル張力は、ほぼ設計どおりに調整されたものといえよう

7. あとがき

本文では、神崎川橋梁の設計・施工の概要を報告するとともに、鋼床版の設計、APSケーブルの力学的特性に関する実験・検討およびFCによる大ブロッケー括架設について述べた。

本工事は、昭和62年9月に着工して以来、平成元年7月9日に大ブロッケー括架設を行い、ケーブルの張力調整、橋面工を完了して平成元年10月に無事竣工した。この間、阪神高速道路公団第三建設部の関係各位をはじめとし、大阪市立大学中井教授、京都大学渡辺教授、大阪市立大学北田助教授に多大の御指導、御助言を賜わった。ここに、深く感謝する次第である。

表-8 ケーブルの張力調整結果

ケーブル No.	鋼桁架設後												地覆・壁高欄・ 中央分離帯施工後		
	目標 張力 T ₀ (tf)	シム調整前		第1回シム調整			第2回シム調整			第3回シム調整			目標 張力 T ₀ (tf)	実測値 T (tf)	誤差 (%)
		実測値 T (tf)	誤差 (%)	シム Δ (mm)	実測値 T (tf)	誤差 (%)	シム Δ (mm)	実測値 T (tf)	誤差 (%)	シム Δ (mm)	実測値 T (tf)	誤差 (%)			
G1-C 1	22.10	7.24	67.2	6.0	31.87	-44.2	2.0	.50	1.8	0.0	22.88	-3.5	26.80	25.22	5.9
G1-C 2	46.00	32.66	29.0	9.0	44.34	3.6	0.0	46.73	-1.6	0.0	46.73	-1.6	55.30	52.58	4.9
G1-C 3	33.70	37.57	-11.5	0.0	40.77	-21.0	-3.0	34.43	-2.2	0.0	34.43	-2.2	37.90	39.16	-3.3
G1-C 4	36.80	23.89	35.1	10.0	36.98	-0.5	0.0	38.14	-3.6	-1.0	35.83	2.6	45.30	44.10	2.7
G1-C 5	28.10	36.79	-30.9	-10.0	20.00	28.8	5.0	28.20	-0.4	0.0	28.20	-0.4	34.50	36.79	-6.6
G1-C 6	33.30	33.94	-1.9	0.0	28.63	14.0	2.0	27.38	17.8	3.0	31.23	6.2	41.40	39.71	4.1
G1-C 7	36.10	39.39	-9.1	0.0	41.97	-18.0	-4.0	34.35	4.8	0.0	34.35	4.8	43.90	41.97	4.4
G1-C 8	33.10	31.49	4.9	0.0	31.49	4.9	1.0	31.49	4.9	1.0	31.49	4.9	40.90	39.36	2.5
G1-C 9	37.40	35.26	5.7	0.0	35.26	5.7	2.0	35.26	5.7	0.0	35.26	5.7	45.60	46.49	-1.9
G1-C 10	33.50	35.33	-5.5	0.0	35.33	-5.5	0.0	33.28	0.7	0.0	33.28	0.7	41.10	43.97	-7.0
G1-C 11	36.90	24.54	33.5	9.0	33.53	9.1	5.0	36.54	1.0	0.0	36.54	1.0	45.30	48.65	-7.4
G1-C 12	35.50	31.88	10.2	0.0	31.88	10.2	4.0	34.23	3.6	0.0	34.23	3.6	43.30	44.03	-1.7
G1-C 13	36.70	33.26	9.4	0.0	30.39	17.2	8.0	36.15	1.5	0.0	36.15	1.5	45.00	44.85	0.3
G1-C 14	36.70	37.51	-2.2	0.0	37.51	-2.2	1.0	34.85	5.0	0.0	34.85	5.0	44.40	42.95	3.3
G1-C 15	36.30	32.67	10.0	0.0	32.67	10.0	6.0	35.32	2.7	0.0	35.32	.7	44.40	43.44	2.2
G1-C 16	37.20	33.01	11.0	0.0	33.01	11.3	5.0	35.74	3.9	0.0	35.74	3.9	44.90	44.22	1.5
G1-C 17	35.20	31.68	10.0	0.0	36.45	-3.6	2.0	31.68	10.0	2.0	34.05	3.3	43.20	43.87	-1.5
G1-C 18	37.60	24.86	33.9	7.0	33.59	10.7	4.0	36.54	2.8	0.0	36.54	2.8	45.20	45.55	-0.8
G1-C 19	33.40	42.05	-25.9	-8.0	28.97	13.3	6.0	33.20	0.6	0.0	33.20	0.6	41.00	42.05	-2.6
G1-C 20	38.10	37.37	1.9	0.0	37.37	1.9	0.0	37.37	1.9	0.0	37.37	1.9	45.50	42.76	6.0
G1-C 21	33.10	32.47	1.9	0.0	32.47	1.9	3.0	30.74	7.1	1.0	32.47	1.9	40.80	41.52	-1.8
G1-C 22	36.80	42.45	-15.4	0.0	42.45	-15.4	-4.0	37.13	-0.9	0.0	37.13	-0.9	43.60	42.45	2.6
G1-C 23	33.30	25.06	24.7	8.0	32.81	1.5	3.0	32.81	1.5	0.0	32.81	1.5	41.00	41.44	-1.1
G1-C 24	28.50	25.68	9.9	0.0	25.68	9.9	2.0	27.84	2.3	0.0	27.84	2.3	34.00	34.43	-1.3
G1-C 25	36.70	34.34	6.4	9.0	28.63	22.0	5.0	34.34	6.4	0.0	34.34	6.4	44.70	41.86	6.4
G1-C 26	33.70	27.57	18.2	6.0	33.87	-0.5	0.0	32.26	4.3	0.0	32.26	4.3	37.40	35.49	5.1
G1-C 27	45.80	25.51	44.3	13.0	47.01	-2.5	0.0	43.53	5.0	0.0	43.53	5.0	54.50	50.59	7.4
G1-C 28	22.40	7.77	65.3	7.0	30.36	-35.5	-1.0	23.24	-3.7	0.0	23.59	5.3	27.00	28.04	-3.8
G2-C 1	21.80	7.03	67.8	7.0	29.13	-33.6	-2.0	19.27	11.6	0.0	19.27	11.6	26.20	23.13	11.7
G2-C 2	45.50	27.84	38.8	3.0	43.73	3.9	0.0	46.17	-1.5	0.0	47.00	3.3	54.40	53.89	0.9
G2-C 3	31.60	43.48	-37.6	0.0	38.57	-22.1	-4.0	32.36	-2.1	0.0	32.26	-2.1	34.70	35.38	-2.0
G2-C 4	37.00	32.55	12.0	10.0	35.82	3.2	0.0	35.82	3.2	0.0	35.82	3.2	45.30	43.92	3.1
G2-C 5	26.20	27.52	-5.0	0.0	27.52	-5.0	-2.0	25.38	3.1	0.0	27.52	-5.0	31.20	31.86	-2.1
G2-C 6	34.00	25.91	23.8	8.0	30.26	11.0	3.0	34.72	-2.1	0.0	34.72	-2.1	42.20	43.99	-4.2
G2-C 7	34.70	38.48	-10.9	0.0	38.48	-10.9	-3.0	35.87	-3.4	0.0	35.87	-3.4	41.20	43.81	-6.3
G2-C 8	34.00	33.20	2.4	0.0	29.81	12.3	4.0	33.20	2.4	0.0	33.20	2.4	42.20	42.18	0.1
G2-C 9	36.30	42.62	-17.4	0.0	42.62	-17.4	-5.0	34.61	.7	0.0	34.61	4.7	43.50	45.38	-4.3
G2-C 10	34.40	34.74	-1.0	0.0	34.74	-1.0	3.0	32.78	4.7	0.0	32.78	4.7	42.70	43.04	-0.8
G2-C 11	36.00	27.66	23.2	0.0	27.66	23.2	7.0	35.61	1.1	0.0	35.61	1.1	43.60	44.02	-1.0
G2-C 12	36.50	38.26	-4.8	-8.0	30.87	15.4	7.0	35.77	2.0	0.0	35.77	2.0	45.00	45.83	-1.9
G2-C 13	35.90	28.32	21.1	0.0	31.04	13.5	5.0	33.81	5.8	0.0	33.81	5.8	43.70	42.43	2.9
G2-C 14	37.80	36.22	4.2	0.0	33.55	11.2	5.0	36.22	4.2	0.0	36.22	4.2	46.50	47.14	-1.4
G2-C 15	35.70	31.07	13.0	0.0	33.89	5.1	3.0	33.89	5.1	0.0	33.89	5.1	43.60	45.26	-3.8
G2-C 16	38.00	20.63	23.2	8.0	37.77	2.2	0.0	35.03	9.2	2.0	37.77	2.2	47.50	49.03	-3.2
G2-C 17	34.90	37.66	7.9	0.0	37.66	-7.9	-1.0	33.16	5.0	0.0	33.16	5.0	43.00	42.34	1.5
G2-C 18	39.50	29.42	25.5	8.0	37.53	5.0	1.0	37.53	5.0	0.0	37.53	5.0	43.50	48.92	-0.9
G2-C 19	33.20	34.28	-3.3	0.0	34.28	-3.3	1.0	32.19	3.0	0.0	32.19	3.0	41.10	42.86	-4.3
G2-C 20	40.30	43.87	-8.9	0.0	43.87	-8.9	-3.0	38.42	4.7	0.0	38.42	4.7	49.10	49.49	-0.8
G2-C 21	32.90	28.83	12.4	0.0	27.06	17.8	6.0	32.44	1.4	0.0	32.44	1.4	41.00	41.88	-2.2
G2-C 22	39.50	42.61	-7.9	0.0	45.15	-14.3	-4.0	40.13	-1.6	0.0	40.12	1.6	47.90	50.35	-5.1
G2-C 23	32.70	28.32	13.4	6.0	26.99	17.5	6.0	32.41	0.9	0.0	32.41	0.9	41.10	40.97	0.3
G2-C 24	32.30	38.96	-20.6	-7.0	30.42	5.8	0.0	32.52	-0.7	0.0	32.52	0.7	39.30	38.96	0.9
G2-C 25	35.57	30.76	13.8	7.0	36.50	-2.2	2.0	34.51	3.3	0.0	35.49	0.6	44.20	44.10	0.2
G2-C 26	39.10	38.85	0.6	0.0	38.85	0.6	0.0	37.27	4.7	0.0	37.27	4.7	44.00	42.06	4.4
G2-C 27	43.90	29.52	32.8	9.0	41.49	5.5	1.0	42.21	3.8	0.0	43.66	0.5	53.10	49.01	7.7
G2-C 28	20.80	4.82	76.8	6.0	24.74	-18.9	-1.0	19.07	8.3	0.0	19.97	4.0	25.40	22.14	12.8

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団・第一建設部：新浜寺大橋上部工設計指針，昭和62年3月
- 2) 阪神高速道路公団，(財)災害科学研究所：ニールセン橋の座屈耐荷力に関する研究業務報告書，昭和62年3月
- 3) 吉川紀，山内幸裕，袴田文雄：新浜寺大橋の設計，阪神高速道路公団，技報，第7号，1987年
- 4) (財)日本材料学会：APSアンカーケーブル技術委員会報告書，1985年11月
- 5) 北田敏行，中井博，吉田富保，鈴木広昌：2方向面内を受ける補剛板の極限強度に関する研究，土木学会構造工学論文集，Vol. 34A，pp.203-214，1988年3月
- 6) 阪神高速道路公団，(財)大阪都市協会・都市技術研究所：2方向面内力を受ける補剛板の設計法に関する研究，昭和63年3月
- 7) 阪神高速道路公団，災害科学研究所：2方向面内力を受ける補剛板の耐荷力に関する実験的研究，平成元年3月
- 8) 阪神高速道路公団，(財)システム総合研究所，京都大学工学部・構造力学研究所：神崎川橋梁に使用するケーブルのクリープ・リラクセーション及び疲労に関する研究，平成元年3月