

# 長大斜張橋（鶴見つばさ橋）の架設時の形状管理

## Form Control in the Construction of a Long-Span Cable-Stayed Bridge (Turumi-tubasa Bridge)

能登 宥 愿<sup>\*1</sup>      山下 久 生<sup>\*2</sup>      山 田 豊<sup>\*3</sup>      辻 幸 佐<sup>\*3</sup>  
*Hiroyoshi NOTO      Hisao YAMASHITA      Yutaka YAMADA      Kousuke TSUJI*

### Summary

The bridge discussed in this report is a three-span continuous steel bridge which is cable-stayed in a single plane. The spans are 255m, 510m and 255m.

Various inconsistencies in the design, manufacturing and construction stages gave rise to errors in the form of this bridge. In order to keep these errors within allowable limits in a well-balanced manner, the length of cables was adjusted using shims.

The bridge has PWS (499 wires, each 7 mm in diameter) because it has long spans and is wide, and is cable-stayed in only one plane. Since drawing these cables in from inside the girder would have required too large a device, a method in which they were thrust into the girder from the bridge floor was tried for the first time in our experience. A condition of this method, however, is that the cables should be adjusted at stages when they are first set.

In controlling the form of the bridge there were automated measurements of every factor because the period of control was long, the bridge is very long (over 1 km), the time for each stage of measurement was narrowly constricted, etc.

### 1. まえがき

本橋は一面吊りの3径間連続鋼斜張橋である。

斜張橋はケーブルを有する自由度の高い構造物であり、設計段階で力学的合理性、鋼重最小を目指した最適プレストレスが設定されており、張力・形状ともにその再現が必要不可欠である。しかるに設計・製作・架設の各段階で生じた各種不整合が、構造物の形状・張力・応力に影響を与え誤差を生みだしている。

そこで、これらの誤差を許容される範囲内に、バランスよく収めるためにケーブル長の調整（シム量の調整）を行う。

本橋は長支間（支間：255.0+510.0+255.0m）で幅員かつ一面吊りであるために、多径ケーブル（7φ×499）が使用されている。このため引き込み装置が大きくなり、桁内からの引き込みが難しくなった。そこで初めての試みとして、橋上からの押し込み方式を採用した。この方式は当該ケーブルをその架設ステップで調整しなければならないという制約条件がある。

各種計測は全て自動計測を採用した。これは形状管理が長期に亘ること、橋長が1 km 強と長いこと、各段階毎の計測時間が限られていること等による。

### 2. 管理方針

設計段階で目標とした構造系に近づけるためには、形状・張力を管理することは重要な事柄である。したがって架設時の精度管理にあたっては、形状・張力が設計上許容される一定の範囲内に収まるように施工されるよう管理するものとする。

施工管理にあたっては、次の3点を決めた。

- ①管理項目の選定
- ②管理基準値の決定
- ③管理基準値に対する許容範囲の決定

#### (1) 管理項目

管理項目は現地での計測環境を考慮し、計測可能で構造特性を支配する項目という条件で決める。他に本システムには確認項目としての計測がある。これらについて表-1に示す。

#### (2) 管理値に対する許容値および目標値

##### 1) ケーブル張力

管理する荷重状態の荷重の組み合わせと割り増し係数を次式に示す。

\*1 技術本部先行技術研究室長    \*2 技術本部第一設計部第二課

\*3 技術本部第一設計部第一課

$$D+L+T+SD+E1+E2+EA \leq Ta \times 1.15$$

D : 死荷重 L : 活荷重 T : 温度

SD : 支点沈下 E1 : 死荷重誤差

E2 : 製作誤差(主桁のキャンバー、主塔の倒れ)

E3 : ケーブル張力の誤差 E4 : 閉合誤差

誤差にはE1～E4があり、架設時に調整できるのはE3とE4である。したがって、ケーブルの設計許容張力に対して上式を満足するように、余裕張力EAを管理しなければならない。

$$EA = E3 + E4 + EX, \quad EX : \text{残差}$$

これらを考慮して、ケーブル張力の許容値は次のように設定する。

- ① 完成時および架設時の最大張力がケーブルの許容張力を越えないようにする。
- ② 各ステップの管理目標値は余裕張力EAの1/2とする。

## 2) 主桁キャンバー

主桁キャンバーの管理限界値は次式とする。

$$\delta a = \pm \{25 + (L - 40)\} \times 0.5$$

$\delta a$  : 管理限界値 (mm) L : 支間長 (m)

管理目標値は管理限界値の1/2とする

## 3) 塔の橋軸方向の倒れ

塔の倒れは塔頂の水平変位量で管理し、その管理限界値および管理目標値は次の通りとする。

塔高さ180mに対して、各々1/2000、1/4000とする。

$$\text{管理限界値} \quad \delta a = \pm 180000 / 2000 = \pm 90 \text{mm}$$

$$\text{管理目標値} \quad \delta p = \pm 180000 / 4000 = \pm 45 \text{mm}$$

表-1 管理項目

管理項目	計測項目	本システムで扱う管理項目	備考
ケーブル張力	○	○	
主桁キャンバー	○	○	
塔の倒れ	○	○	橋軸方向の倒れのみ
部材断面の応力	○		
橋体温度(外気温)	○		計測値の補正に用いる

## 3. 管理要領

### (1) 管理手順

計測およびシム調整は架設工事の進行に合わせて行うが、その時期は各段のケーブル架設完了時期とした。最下段ケーブルの架設時期をステップ1とし、その後のステップ8(下から8段のケーブル迄架設完了)の直後に荷重移動でB2ペントに不反力が生じ、B3ペントには300ton前後の正反力が生じている。このステップ以降張出し側の主桁が下がるので、張出し側のB3ペントもB2ペントと共に除去し、形状、張力を確認するために計測を行った。ステップ12では残りのペント(B1ペント)が主桁から離れるので、ここで計測・調整を行った。さらに最上段ケーブル架設時期のステップ17で、最後の調整を行い、閉合後に最後の計測を行った。

### (2) 計測項目と計測位置

#### 1) 計測項目

##### a. ケーブル張力

ケーブル張力は振動法によって計測する。ケーブル張力は塔側および桁側の取付点においてケーブル自重による差を生じるが、振動法によって得られる値は両者の平均値として扱うことができる。

ケーブル張力の計測は原則として、当該架設ステップのシム調整対象ケーブル1段2本と、前ステップ迄の3段6本(最大で)の合計4段8本とする。

##### b. 主桁キャンバー

主桁のキャンバーは連通管(主桁内に水圧式沈下計を設置)の水位から求める。計測点はケーブル定着部とし、側径間・中央径間大ブロック架設部はケーブル1段おきに、中央径間張出し架設部は全ケーブル位置とする。橋軸直角方向には、港内側および港外側の2系列の計測を行う。

##### c. 塔の橋軸方向の倒れ

塔の倒れは塔頂部の橋軸方向の水平変位を計測する。塔形状がくの字をしているため塔下端から直接計測できないので、中間部から塔頂塔下端を計測し、その差をとる。

##### d. 橋体およびケーブルの温度

桁形状など各管理項目は温度変化、部材間の温度差の影響を大きく受ける。したがって管理値と計測値の比較を行う際には、温度補正が必要になるので、本管理では部材の温度を熱電対等によって測定する。

主桁、主塔の温度は直接本体温度を計測し、ケーブルの温度は主桁上に設置したダミーケーブルを計測する。

温度補正を行うとはいへ、温度の影響は極力排除すべきであり、それには管理時の計測を行う条件として、計測中の急激な温度変化がないこと、部材間の温度差が安定することが必要である。したがって温度経時計測を行って、季節による最適な計測時間帯を設定する。

温度補正法としては、管理値を計測時点での温度状態の値に変換する方法と、計測値を標準温度状態での値に変換する方法の2通りがあるが、設計が標準状態で行われていること、各管理値の計測が必ずしも同時に行われるとは限らないことから、計測値を標準温度に補正する方法によるものとする。

e. 橋体の応力度

架設時の各ステップの主桁、主塔、エンドリンクの応力を安全性を確認するために計測する。

2) 計測位置

計測項目と計測位置を図-1に示す。

(3) 管理値と影響値の計算

1) 管理値の計算

管理値は各ステップ毎の管理項目（主桁、主塔の形状およびケーブル張力）の計算上あるべき値のことであり、本形状管理ではこの数値を目標として調整を行うこととする。したがって管理値の計算は、できるだけ実際の諸条件を正確に反映して行う必要がある。ここでは次に示す方法によった。

a. 解析モデル、解析法

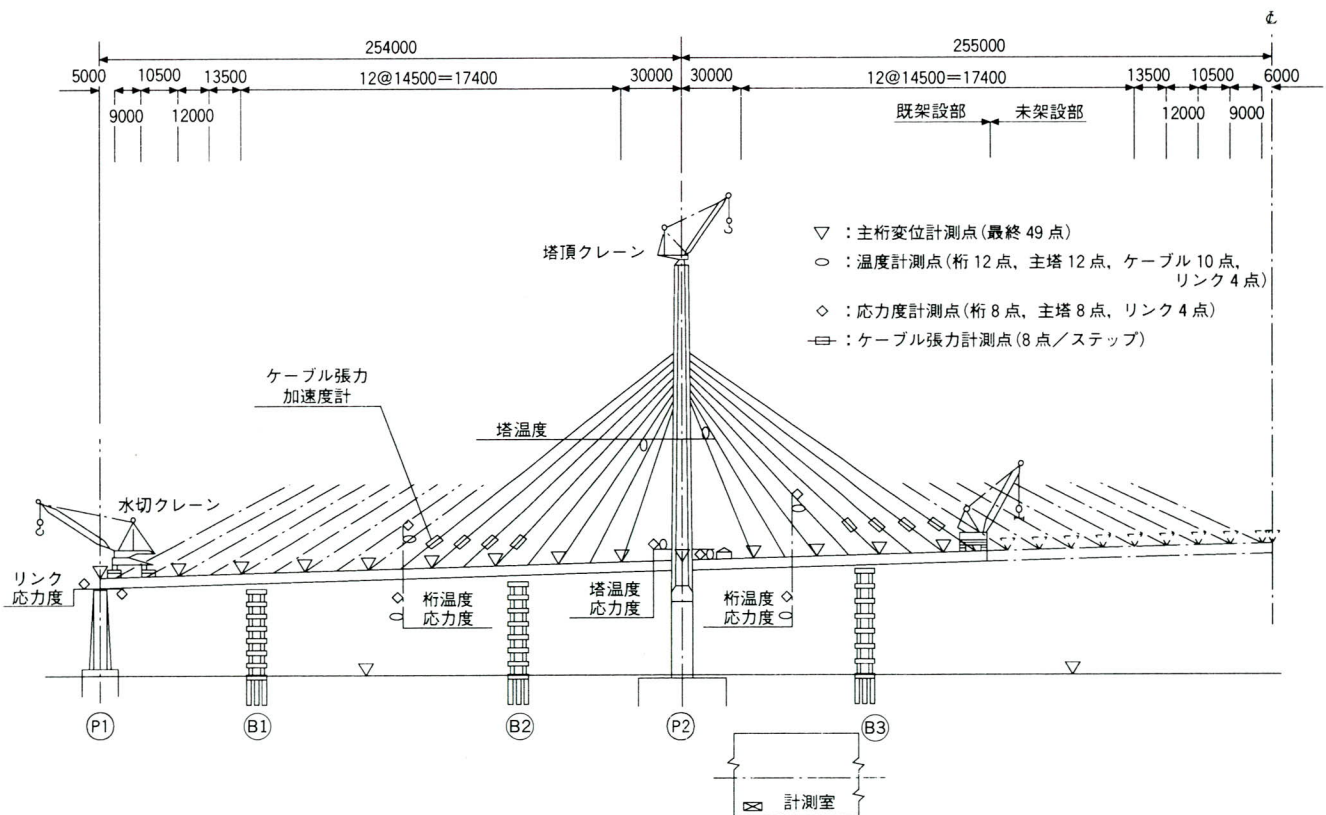


図-1 全体の計測位置とケーブル張力計測位置

解析に使用する構造系は立体骨組モデルとする。解析法は有限変形理論による非線形解析とし、完成系からの解体計算を行い、各ステップ毎の管理値を求める。ケーブルはサグの影響を考慮した自重を担うカテナリー要素として取り扱う。

#### b. 剛度

詳細設計断面より得られる実剛度を使用する。但し主桁の剛度は、最初の大ブロック架設時にその橋面上にクレーン車を移動載荷し、変形形状を計測する実剛度確認実験を参考にする。

#### c. 荷重

本体荷重はすでに据え付けられた付属物を加え、最終精算後の各ブロック別重量により算出する。

架設機材の重量は、架設進捗状況に応じて部材仮置き分が含まれ、また機材設置位置は刻々とその位置が変わることが予想される。したがって管理計測時に対応する架設荷重は、その実施直前（当日の午後）に橋面上の架設荷重調査を行って決定する。

ケーブルが一面吊りであるので、荷重は幅員方向で対称になるように、また荷重を中央分離帯側に寄せるなどして、主桁のねじれを極力抑えるように計画した。また架設クレーンのような橋体に対する影響の大きい重機については、計測時のブームの向きを常に一定にする必要がある。

### 2) シム影響値の計算

管理値と実測値の誤差はケーブルシムの調整によって改善する。

最適シム量の計算およびその応答計算を行うために、単位シムによる主桁、主塔の変位およびケーブル張力の影響値が必要となる。

各ステップ共シム調整は最上段ケーブルで行うが、シム影響値は各ステップの全ケーブルについて求めておく。

### 3) 温度影響値の計算

熱電対による温度計測値は、オンラインでコンピュータに接続し、部材毎に平均値および差を求めて、あらかじめ準備した温度および温度差の影響値により変位、張力の計測値の補正を行う。温度および温度差の影響値の解析は下記の要領による。

温度荷重の種類は次に示すグルーピングを行う。なお温度変化の値は20°Cを基準温度として算出する。

- 単位温度 1 : 主桁一様温度
- 単位温度 2 : 主桁上下面の温度差
- 単位温度 3 : 主塔一様温度
- 単位温度 4 : 主塔橋軸方向の温度差
- 単位温度 5 : ケーブル一様温度

### (4) シム決定フロー

シムは本来、ケーブル相対長の誤差を修正するものであるから、ケーブル張力やキャンバー等に生じている誤差（管理値からの偏差）の原因がケーブル長以外にあるときは、シム調整によって誤差を0にできるとは限らない。寧ろ、一般にはどのような調整を行ったとしても、何らかの誤差が必ず残留する。従ってシムの調整の目的は、誤差を0にすることではなく構造系に残留する誤差を、その構造系あるいは架設過程に対して最も望ましいものとする事と言える。当然ながら、誤差の絶対量は小さいことが望ましいのであるが、誤差は唯一のスカラー量で与えられるわけではなく、トータルとしての誤差量はその定義によって変わり得るから、最も望ましいシムの組み合わせを決定するには高度に工学的な判断が必要となる。

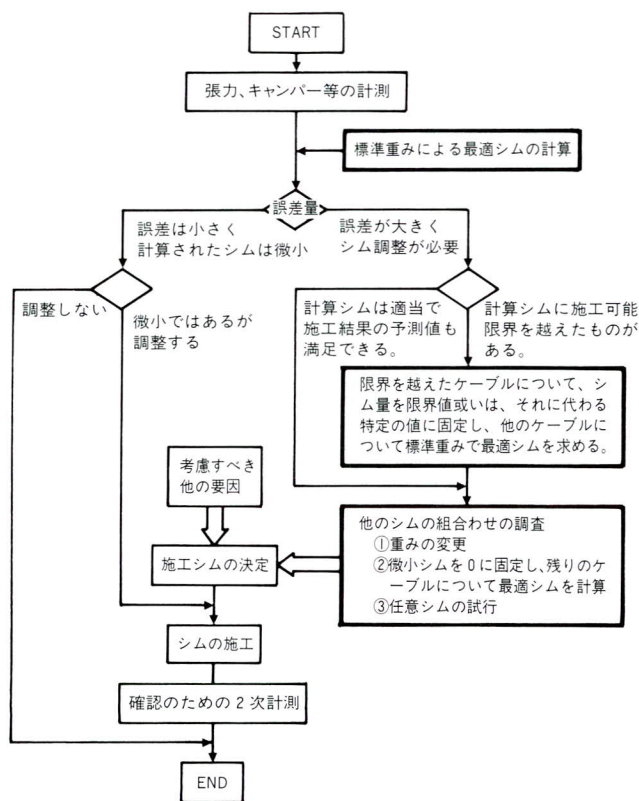


図-2 最小2乗法を用いたシム決定フロー

シム決定の判断に影響する因子の中には、比較的容易に数量化が可能なものと、極めて難しいものがある。ケーブル張力やキャンバーの測定から得られる誤差は前者に属し、これらに対してはある種のロジックに基づいた最適解が、真の最適シムを求める際の補助手段として、極めて有効である。本橋の精度管理では、そのためのロジックとして、最小二乗法を用いた。

最小二乗法を使用したシム決定における考え方の流れ図を図-2に示す。図中太枠線で示した部分が、精度管理用コンピュータ・システムから得られる情報であり、上述の最小二乗法による最適シムや任意のシムを施工した場合の応答の予測値などが含まれる。

図から明らかのように、分岐部での判断や最も重要な施工シムの決定の部分では、システムからの情報を参考にするとは言え、最終判断は担当技術者が行った。この判断には前述の数量化困難な要因が複雑に影響するので、明快な形で流れを示すことは難しい。そこで経験的に、シム量決定に影響を及ぼす要因等を考慮して、施工シムを決定した。

## 5. 構造特性

### (1) 主桁・主塔の剛性の変化

構造系が張出し状態で主桁・主塔の剛性が5%低い場合、中央径間先端は各ステップで0～-34mm位の変化がある。側径間はベント除去後、最大23mm(+は鉛直上側)の変化である。

主塔の倒れはステップ8'のB1ベント除去以降殆どがプラスで最大22mm(+は中央側)である。

ケーブル張力はステップ4まで全て減少傾向であるが、ステップ5以降上段ケーブルは概ね増加傾向(特に側径間)である。

構造系が閉合状態で主桁・主塔の剛性が5%低い場合、中央径間センターは4mm、側径間は1mm弱である。主塔の倒れは2mm、ケーブル張力は1ton位である。

### (2) 主桁の鋼重の変化

構造系が張出し状態で主桁の鋼重が5%重い場合、中央径間先端はステップ13以降-33～-86mmまで変化し、側径間も減少側である。

主塔の倒れはステップ13以降0～22mmである。

同様にケーブル張力は下3段で10ton前後、それ以外

はほぼ20～34tonの変化である。

構造系が閉合状態で主桁の鋼重が5%重い場合、中央径間センターは-80mm、側径間は-5mm前後である。主塔の倒れは22mm、ケーブル張力は塔を挟んだ下2段で10ton位、その他は最大29tonである。

### (3) 主桁・主塔のみ温度変化

構造系が張出し状態でベントB1除去後、主桁・主塔のみ温度が10℃高い(相対的にケーブルが短い)場合、中央径間先端は57～142mm変化する。

主塔の倒れは-25～-39mmである。

ケーブル張力は下2段で20ton前後、側径間上段で5ton前後、中段・中央径間上段では殆ど変化ない。

構造系が閉合状態で主桁・主塔のみ温度が10℃高い場合、中央径間センターは180mm、側径間は最大-42mmである。主塔の倒れは-82mmである。ケーブル張力は側径間側が顕著で、下2段が30ton前後、上3段が-20ton前後、中段は変化が少ない。

### (4) 主桁・主塔・ケーブルが温度変化

構造系が閉合状態で全部材の温度が10℃高い場合、中央径間センターで71mm、側径間は最大-55mmである。主塔の倒れは-54mmである。

ケーブル張力は前項と比べ、中段を除いて10ton位減少側に移行している。

代表として(1)～(4)についてステップ17と閉合時の図-3, 図-4に示す。

## 6. 計測結果と考察

『事前の曲げ剛性評価のための計測』結果から、計測

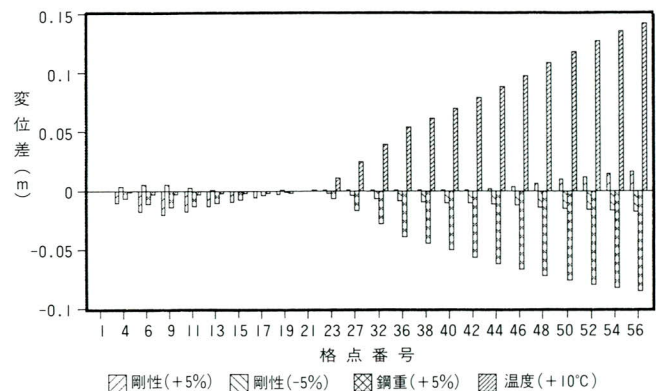


図-3a ステップ17の垂直変位差

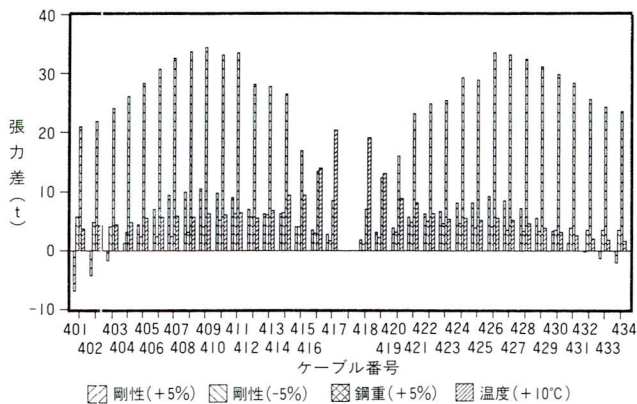


図-3b ステップ17のケーブル張力差

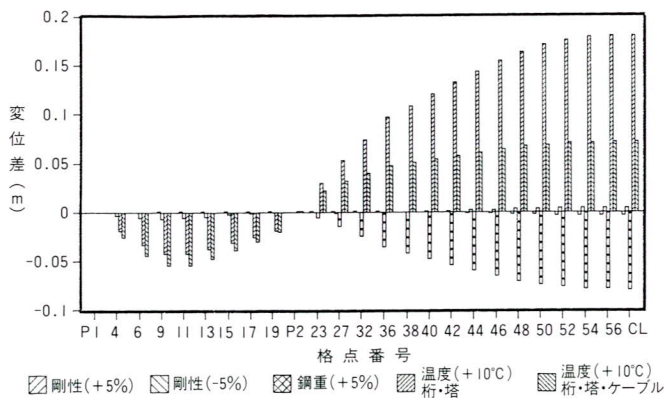


図-4a 閉合時の垂直変位差

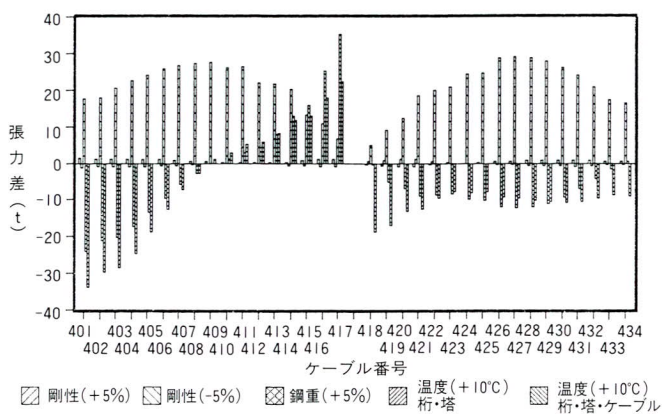


図-4b 閉合時のケーブル張力差

値とキャンバー設定時の解析値の曲げ剛性とはほとんど有意な差がないことが分かった。そこで、形状管理の管理値計算の曲げ剛性はキャンバー設定時の値を使用した。

計測結果はB1、B2、B3ベント支持まで（ステップ1～8）とその後閉合前までと閉合時に分けて述べる。

ステップ毎の張力、形状の履歴は図-5～図-7、閉合時の張力、形状およびその誤差は図-8～図-11に示す。

(1) B1、B2、B3ベント支持（ステップ1～ステップ8）

B1、B2、B3ベントで主桁が支持されている構造系は、主桁の形状が拘束されており、かつ見かけの曲げ剛性が高くなっている。

計測結果をまず形状について述べる。ステップの進捗と共に、14.5mずつ張出されていく主桁の中央径間先

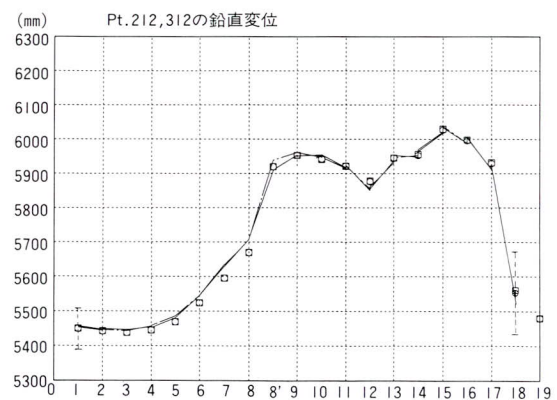
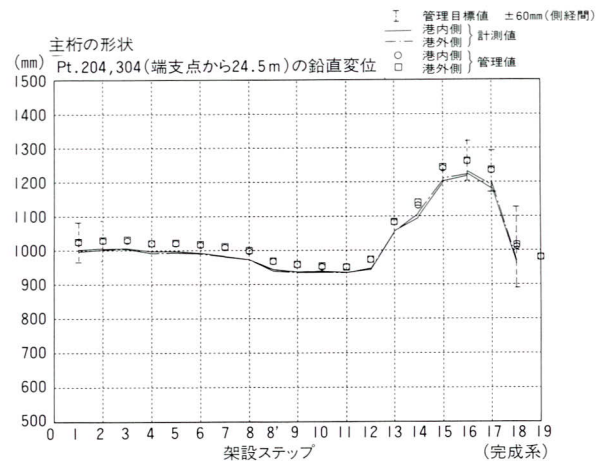


図-5 各ステップ毎の主桁の鉛直変位の履歴

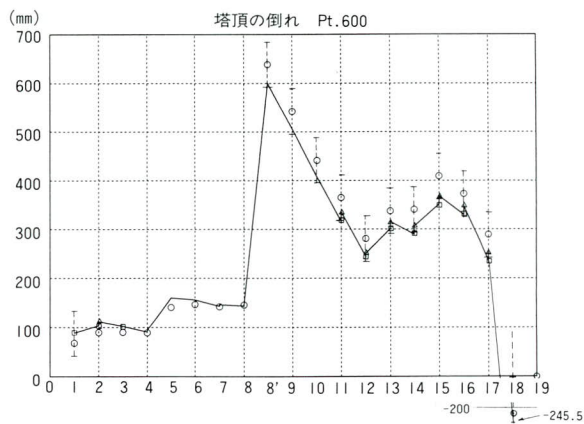
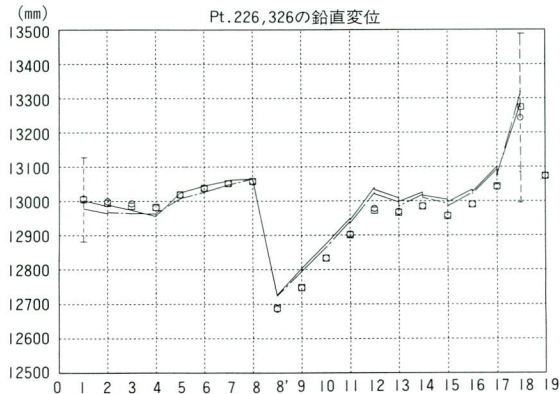


図-6 各ステップ毎の主桁・主塔の変位

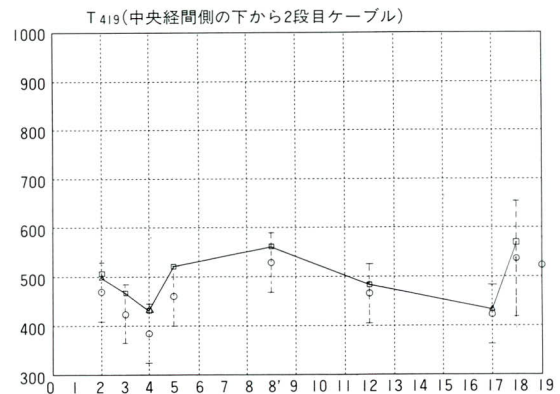
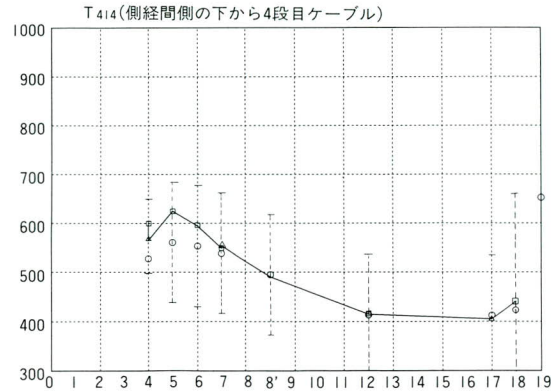


図-7 各ステップ毎のケーブル張力の履歴

端部の鉛直変位誤差（＝計測値－管理値）は、30mm前後（一部のステップで約55mm）と小さく、シム調整に対しても影響値計算より明らかなように感度が鈍い。

主塔の倒れ量はステップ4までが最大90mm、ステップ8までが最大でも147mmであり、その誤差は0～20mm前後と小さい。

ケーブル張力はシム量を調整するケーブルの影響を考慮して、その下3段目のケーブルまで計測している。

ケーブル張力はステップ1～5まで各ケーブルで管理値384～736tonに対して全て+側の誤差（＝計測値－管理値）で、管理目標値（誤差の許容値の1/2）に近いケーブルもある。しかし、ステップ6～8では一側の誤差も生じ荷重の全ケーブル負担分はバランスしてきている。シム調整に対するケーブル張力への影響は当然のことながら形状に比べて敏感であることが、影響値計算、計測より明らかである。

主桁が仮支点（ベント）で支持されている構造系では、

主桁の曲げ剛性が見かけ上大きくなっていること、ベントとケーブル支持点では支持効率が極端に異なっていることから、ベント除去後、シム調整量による計測値の変化量が想定値と合わないことが考えられる。そこでシム調整量はベント除去後への影響値の変化量を考慮して、最適値より少ない値とした。ちなみにシム調整したステップは、2、4、7、8で、調整量は-15～+16mm（+は挿入）の範囲である。

(2) B2, B3 ベント除去後～全ベント除去後(閉合前)

全ベント支持のステップ8で主塔の倒れ量146mm（管理値）だが、B2、B3ベント除去直後のステップ8'で638mmと大きく中央径間側に変化した。この時点でB1ベント（P1橋脚近傍）は仮支持点であるが、橋脚に近いため主桁の剛性増加にあまり寄与していない。このことが、これ以降のステップには言えると思われる。

荷重は橋体自重以外にも多くの架設荷重が載荷されて

いる。特に張出し先端部には、構造系に大きな影響を与える800ton強の主桁ブロック吊り上げ用クレーンが載荷されている。橋梁対比して大きな荷重は、可能であれば主塔付近に退避させる方が管理の精度が良くなることは確かである。しかし本橋では軌条桁が限られた範囲なので、退避は不可能である。

主桁の中央径間先端部の鉛直変位誤差は、ステップ8で約30mmがステップ8'で94mmと大きく変化している。これはもし荷重が多少でも大きめに設定しているとしたら、仮支持点が2つ除去されることで大いにあり得ることである。ステップが進み張出し長が伸びて、ステップ11（1次計測で）の桁先端で初めて平均135mm（港内側）

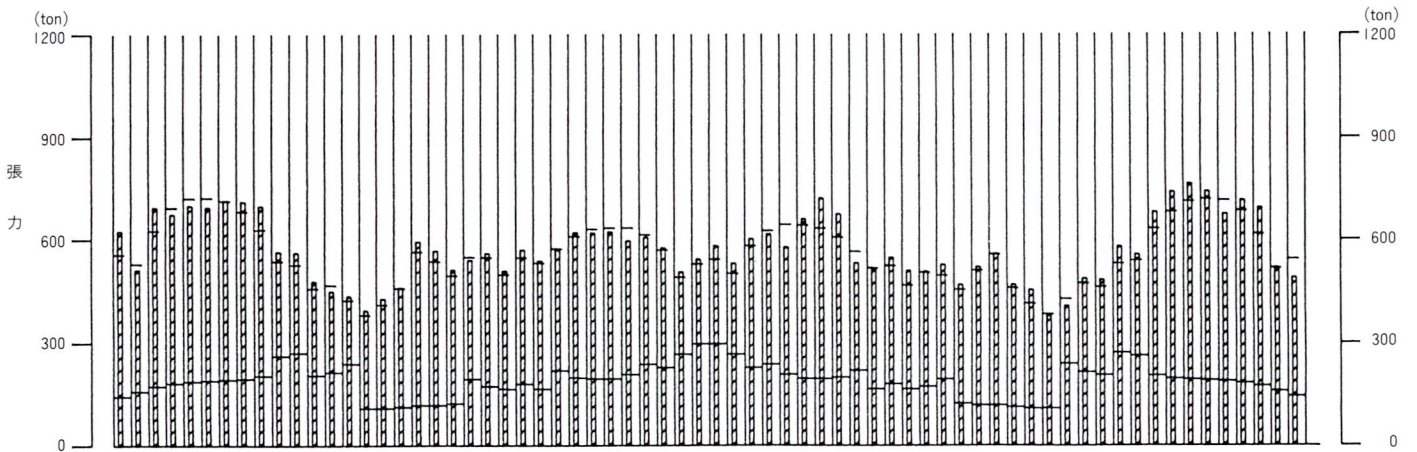
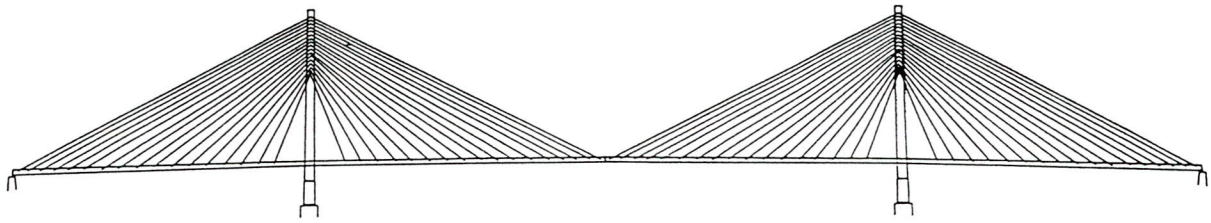


図-8 閉合時の張力図

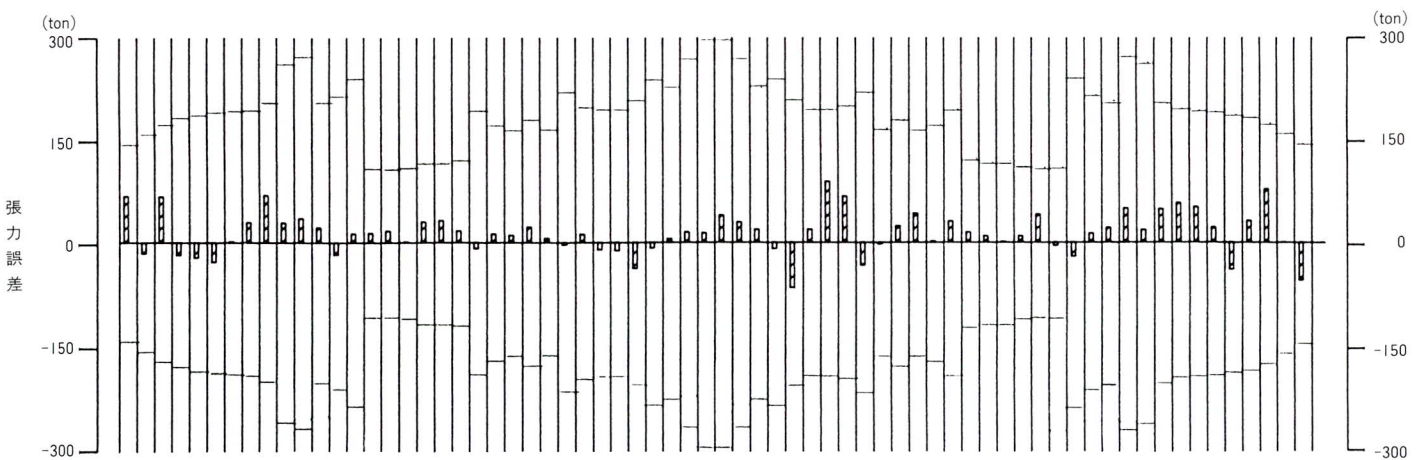


図-9 閉合時の張張力誤差図



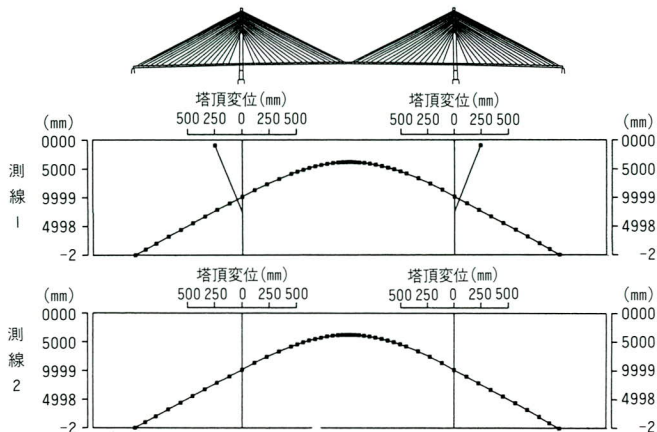


図-10 閉合時の形状図

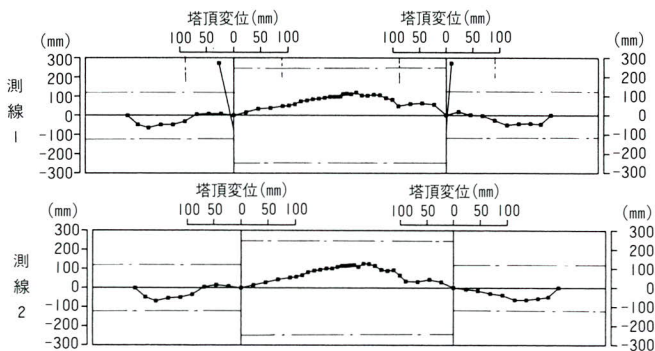


図-11 閉合時の形状誤差図

138、港外側：132)となり、管理目標値(124mm)を越えた。ステップ16では同じく桁先端で平均169mmとなり桁先端が上がり傾向にある。

主桁の側径間はこのステップも全体では下がり気味で、P2主塔近傍は少し上がっている。そこでこのステップ辺り以降のシム調整は、形状に重きを置いた。ステップ12で全てのベントが除去されることもあり、シム調整による形状に対する感度が今までと異なりステップと共に良くなってきた。シムは各ステップ30~50mm抜いた。その結果ステップ17(シム調整後)で平均87mmとなったが、これには次ステップの閉合時の条件も考慮した。

主塔の倒れ量はステップ8'の計測値が600mmで、それ以降管理値は多少山谷はあるが減少方向で、ステップ16、17で各々372、289mmと完成時の鉛直即ち0mmを目指している。誤差量はステップ15、17の1次計測で-58、-54mmと管理目標値±45mmを越えているが、前述のシム調整で各々-41、-36mmと目標値に収まった。

ケーブル張力はステップ8'以降誤差が減少し、突出

した誤差もない。これは見かけの主桁の曲げ剛性が実際の剛性に下がったことにもよっている。ステップ15の1次計測時の張力誤差が、管理目標値の1/3~1/2位であったものが、調整後には誤差が1桁ないしは大きくて目標値の1/3位になっている。ステップ17で全ケーブルをみると1,2本目標値の1/3を越えているものもあるが、ほとんどのケーブルは非常に良い精度に収まっている。

### (3) 閉合時

閉合直前の両工区の相対差は、ステップ17で閉合を考慮して管理したことにより、鉛直、水平共10mm前後と小さく、ねじれも微少である。これらの相対差をクレーン等架設荷重を移動することによって、主桁を結合した。閉合後、主桁ブロック吊上げクレーンを1台解体除去し、残り1台を主塔近傍までバックし、さらに軌条の一部を除去して閉合時の計測を行った。

主桁の鉛直変位の誤差は中央径間のセンターで平均106mm(港内側：97、港外側：115)上方に、最大はC36で122mm(港内側：118、港外側：125)上方となり、管理許容値(±248mm)の1/2以下である。

側径間の鉛直変位の誤差はP1~P2、P3~P4径間共-60mm前後であり、管理許容値(±120mm)の1/2位である。

主塔の管理値P2、P3は、ステップ17(閉合直前)で各々289mm、303mm中央径間側に倒れていたものが、本ステップでは-218mm、-234mm側径間側に倒れている。この大きな原因は、張出し先端部に載荷されていた吊上げクレーン2台が1台になり、なおかつ主塔近傍までバックしたためである。

本ステップの主塔の倒れの誤差としてはP2、P3とも側径間側に各々-27、-10mmであり、管理許容値(±90mm)に十分収まっている。

この時点でのケーブル張力は、定着側(側径間側)の上段ケーブルが、これ以降の死荷重、活荷重によって張力が大きく増加するため、完成系の1/2位であり、完成系の張力分布状況とは、大いに異なっている。張力誤差は管理許容値の10%前後のものが多く、数本25~45%位のものがある。但し、当然のことながら、この比率は完成系の張力に対しては約1/2位になる。張力誤差分布は張力誤差図より明らかなように、プラス、マイナス入り交じっているが全体としてはプラス側である。その結果、荷重のケーブル分担率が多少増えている。しかし、

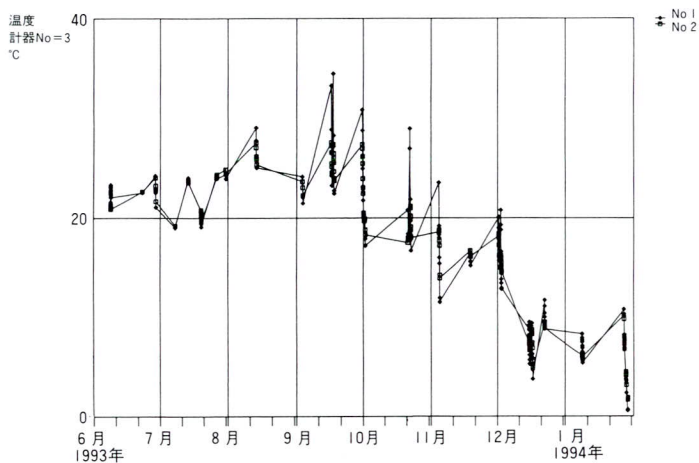


図-12 主折中央径間

主塔部の主桁鉛直脊に与える反力への影響は僅かな減少と思われる。

#### (4) 応力と温度

基準応力をケーブル張り渡し前として、その後のステップ4、7、9、17、18(閉合時)時点のエンドリンク、主桁側径間、主塔の応力等を解析値と計測値と比較する。結果をみると定性的にはほぼ良いと思われるが、主桁のように曲げが支配的な断面は多少差がある。以上のことより想定した構造系が近似的に対応がとれていることが確認された。

橋体、外気の温度計測は経時的に行い、そのデータを基に形状管理の時間帯(部材の上下の温度差の微小な時間帯)を設定した。これらの計測された温度はさらに管理項目の補正計算に使用される。(図-12、図-13参照)

#### 7. まとめ

製作時の構造物の寸法精度、現地での組立精度を反映して、形状管理の精度としては良い値が得られた。各管

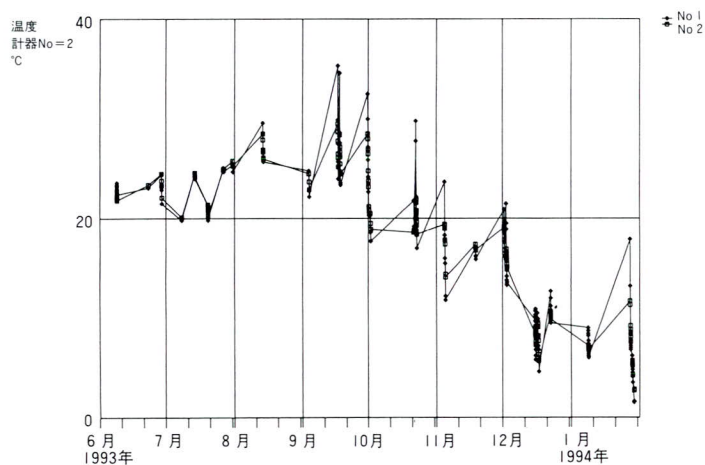


図-13 主桁側径間

理項目すなわち、主桁の鉛直変位、主塔の倒れ、ケーブル張力など全て管理許容値に収まるのはもちろんおこと、その1/2の管理目標値にもほとんど収まっている。

#### 8. あとがき

本稿を執筆するに際して、首都高速道路公団神奈川建設局の方々に御指導頂きましたことを誌上を借りて感謝致します。

#### 〈参考文献〉

- 1) 能登；斜張橋架設時の精度管理システムの開発、宮地技報7号、1991.2
- 2) 能登、町屋、山下；新万代橋の架設時の精度管理、第47回年次学術講演会概要集(1)、1992
- 3) 丸山、能登；斜張橋(宮本橋)の架設時の精度管理、第21回日本道路会議

1995. 10. 16受付