

斜張橋架設時の精度管理システムの開発

Development of Quality Control System for Cable-Stayed Bridge during Construction

能 登 宥 愿*
Hiroyoshi NOTO

Summary

The optimum cable prestress in cable-stayed bridges is determined at the time of design to achieve the mechanical and economic objectives, and efforts are made at the time of actual construction to build the structure according to the design. However, at each of the stages of design, manufacture, and construction, various errors creep into the structural shape, the cable tension, the member strength, and the reaction of the bridge.

The present quality control system uses real-time optimum determination of cable shim thicknesses to maintain the above errors within allowable limits in a well-balanced manner, contributing to the improvement of safety and quality and to the speedy progress of construction.

1. まえがき

橋梁の架設時の品質と安全の管理は、工程の管理と相俟って、架設の3本柱である。ここで報告する精度管理システム（または形状管理システムともいう）は主に品質と安全の管理に主眼を置いているが、工程のスムーズな進捗にも良い影響を与えているものと思われる。

対象とする橋梁形式はケーブルを有する斜張橋、ニールセン橋等が考えられるが、ここでは斜張橋を対象とした精度管理システムについて述べるものとする。

2. 概要

斜張橋はケーブルを有する高次不静定構造物であると同時に、自由度の高い構造物であるので、設計段階で経済性等を目指した最適プレストレスの選定が目論まれており、張力・形状ともにその再現が必要不可欠である。そこで設計・製作・架設の各段階で精度確保のためのシステムティックな管理を必要とする。しかし、設計時に想定したケーブル張力・部材力・構造形状に対して各段階で精度向上を図っても、ある程度の誤差が生ずるのは避けられない。設計段階では構造モデル化、荷重、剛性等、製作段階では部材寸法（ケーブル長も含む）、部材相互間の寸法、角折れ、仮組検査時の温度影響等の誤差がある。また架設段階では組立方法・その順序、仮設材の

重量・載荷位置、仮設時強制外力の導入およびその残留、温度影響等、さらに架設途中の管理のための計測にさえも誤差が生じている。これら各種の誤差が影響の大小を取り混ぜて、構造物の形状・応力に影響を与えている。その結果、設計段階で目標としたこれらの弾性諸量に誤差が生ずる。本システムでは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、ケーブル定着間距離とケーブル長の相互関係を調整する方法を示している。また架設時の作業の効率、安全性の確保を最大限に図る役目も担っている。このためにコンピュータシステムによるリアルタイム処理の精度管理システムが必要となる。

3. システムの構成

システムは事前解析・計測・シムトライアル・報告書作成・システム管理の5つの大項目から成り立っており、細項目は図-1に示すようにツリー状になっている。

このシステムを構成する基本機器とその役割は図-2に示す通りである。

現場での計測に先立って、事前に汎用計算機で管理値・影響値を計算する。この管理値が計測当日になんらかの理由で変更になった場合、パソコンを使ったオンラインによりファイルの送受信・再計算を行う。オンラインの方法については図-3に示す。

計測に各種計測値取り込みのためのセンサー・変換器、

* 技術本部長大橋業務部付課長

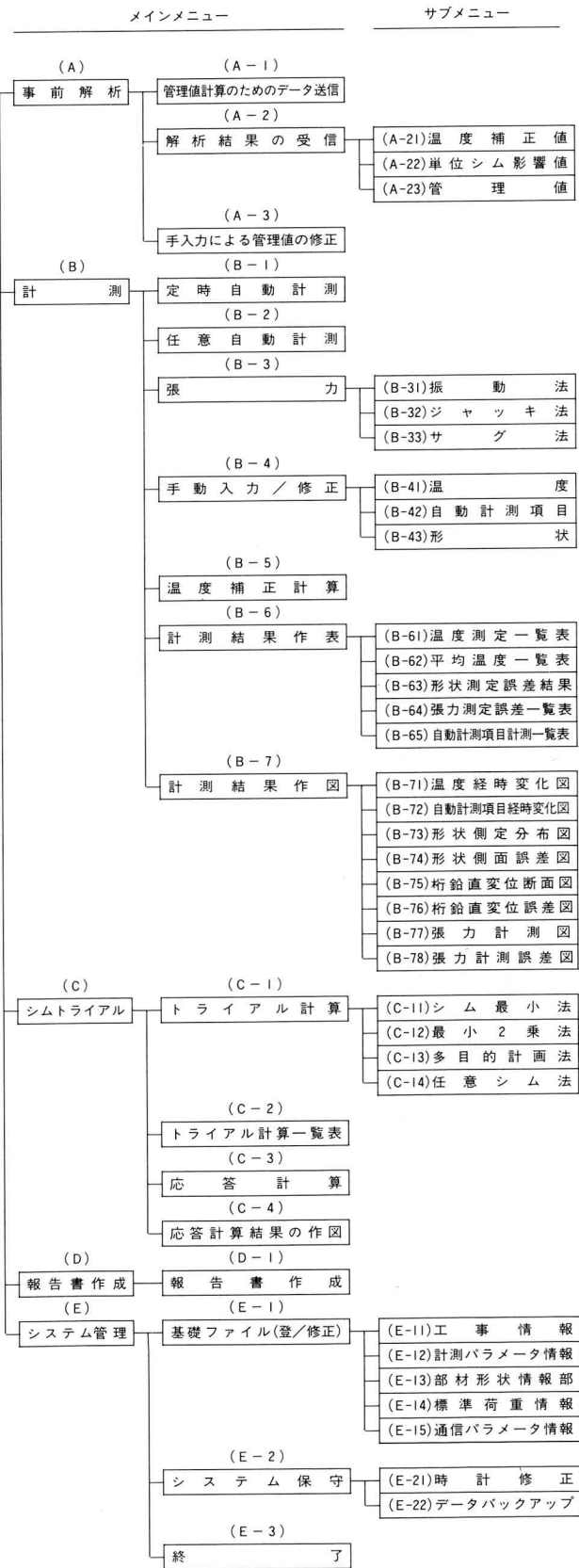


図-1 システムの構成

その記録に各種レコーダ、処理およびその結果の出力装置としての機器等が配置されている。

これらの機器はMS-DOS上で稼働する各種のプログラムによって制御され、必要に応じて計測・記録・処理・計算・出力等を行う。

4. システムの内容とその流れ

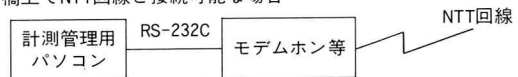
システムの内容とその流れは、図-4、図-5に示すように管理値の算定・計測・最適シム決定・シム調整となっている。しかし、この流れに入る前に構造特性の調査がある。

各種の誤差が張力・形状等の弾性諸量にどのような影響を与えるか、また逆に弾性諸量の誤差がどの誤差要因から発生しているのか等をこの調査から明確にすることができる。この調査結果を利用して、管理値・影響値計算を行う。即ち設計・製作・架設の各情報を、その影響度を考慮して精度のレベルを決め、当該架設ステップの管理値の計算と単位シム量・単位温度・部材断面内の単位温度差・単位荷重による影響値の計算を行う。

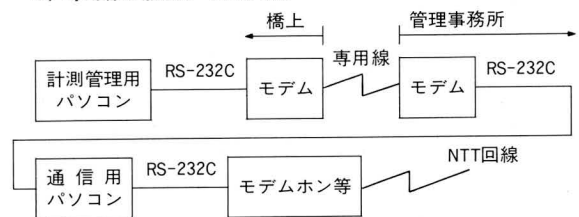
ここまで事前検討を行ったうえで、現場に臨む。

現場では荷重等について管理値に変更がないかどうか、

a) 橋上でNTT回線と接続可能な場合



b) 橋上でNTT回線と接続不可：管理事務所にてNTT回線と接続可能な場合で、専用線の敷設が可能な場合



c) b)で専用線の敷設が不可能な場合

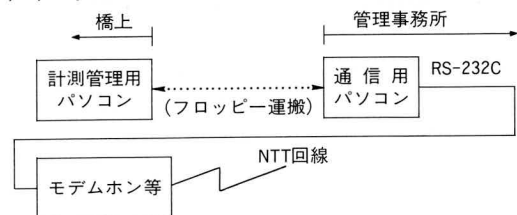


図-3 オンラインの方法

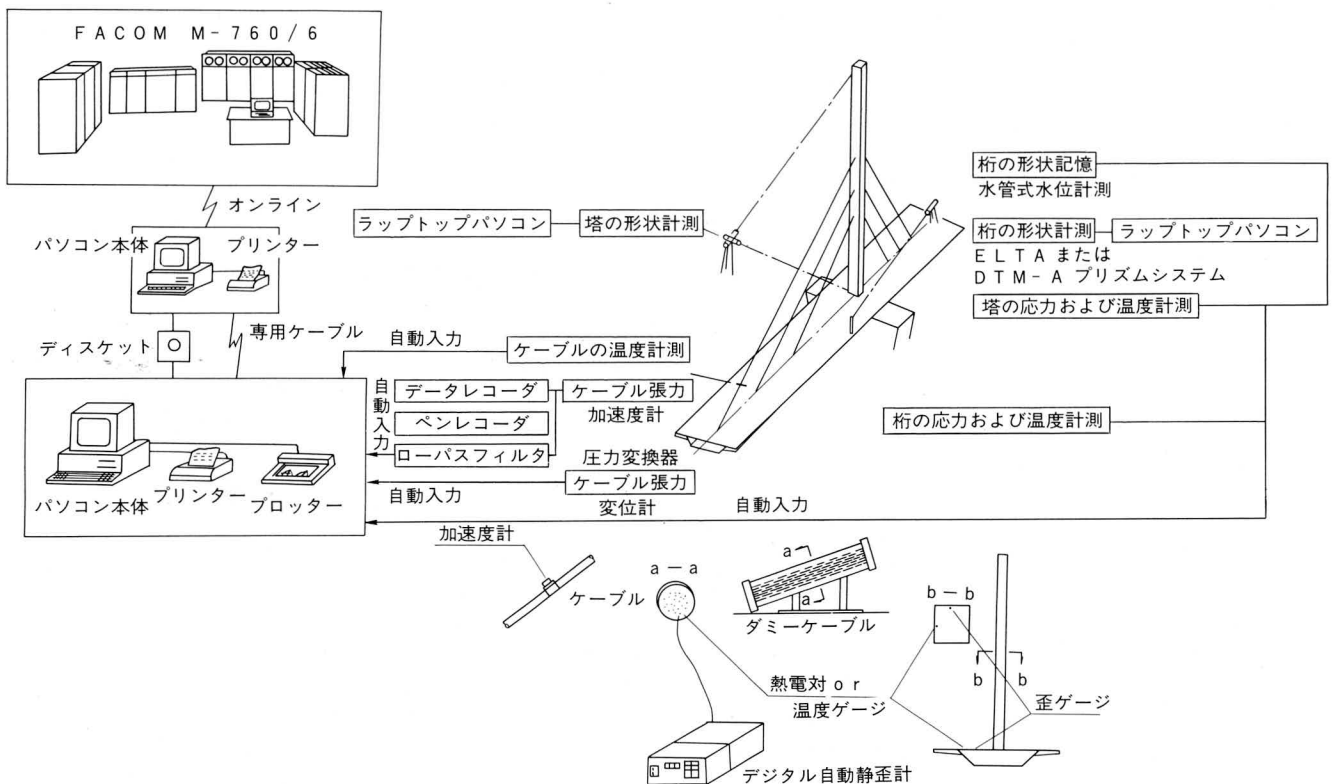


図-2 精度管理システムの概略


変更があれば、汎用計算機とのオンラインで再計算を行う。

構造物は原則として設計シム量(標準シム量ともいう)で組立てられる。第1回目の計測でこの状態を計測し、誤差量を確認する。この誤差量の良否(管理基準値または許容値との対比)をみて、判定が否であれば、構造特性調査等も参考にして、最適シム決定を行う。決定されたこのシム量の組み合わせに従ってシム調整を行い、調整の良否を確認するために第2回目の計測を行う。この段階で特殊な構造物を除いて、誤差量は満足される値に収まるものと思われる。

(1) 管理値・影響値

橋梁の完成状態を解析始点とし、解体計算により任意の架設状態の計算を行う。その結果を管理値とする。この構造モデルは重要な意味をもつので、構造特性・載荷状態を良く考えて、モデルの平面・立体、支持条件等の決定を行う。解析理論は実際の構造物になるべく忠実に、柔ケーブル部材を考慮した有限変形理論とする。また影響値計算も同様とする。しかし、構造形状によっては、微小変形理論でも十分である。

斜張橋精度管理システム


 90/11/07
 16:14:32

【パラメータ】	【データ入力】	【データ出力】	【シム計算】	【システム】
工事情報	自動計測	表	シムトライアル	P C 間通信
計測制御情報	手動入力	作	図	システム保守
送信データ	張力計測			終了
管理値情報	温度補正計算			

グループNo.1	架設ステップ1	計測第1回
----------	---------	-------

↓↑←→キーで項目を選択し(CR)を押して下さい。(CLR)画面消去(⇐)復活

図-4 メインメニュー

(2) 計測

1) ケーブル張力

ケーブル張力の計測には、計測が容易で、使用実績も多い振動法を中心にして、3つの方法が用意されている。

(a) 振動法

ケーブル振動の加速度波形を抽出し、パソコンに組込んだA/D変換ボードに取り込み、デジタル変換し、高速フーリエ変換(FFT)プログラムでスペクトル解析し、固有振動数を求め張力を計算する。

または、FFTアナライザーに加速度波形を取り込み、固有振動数を求めて張力を計算することもできる。

精度管理フロー

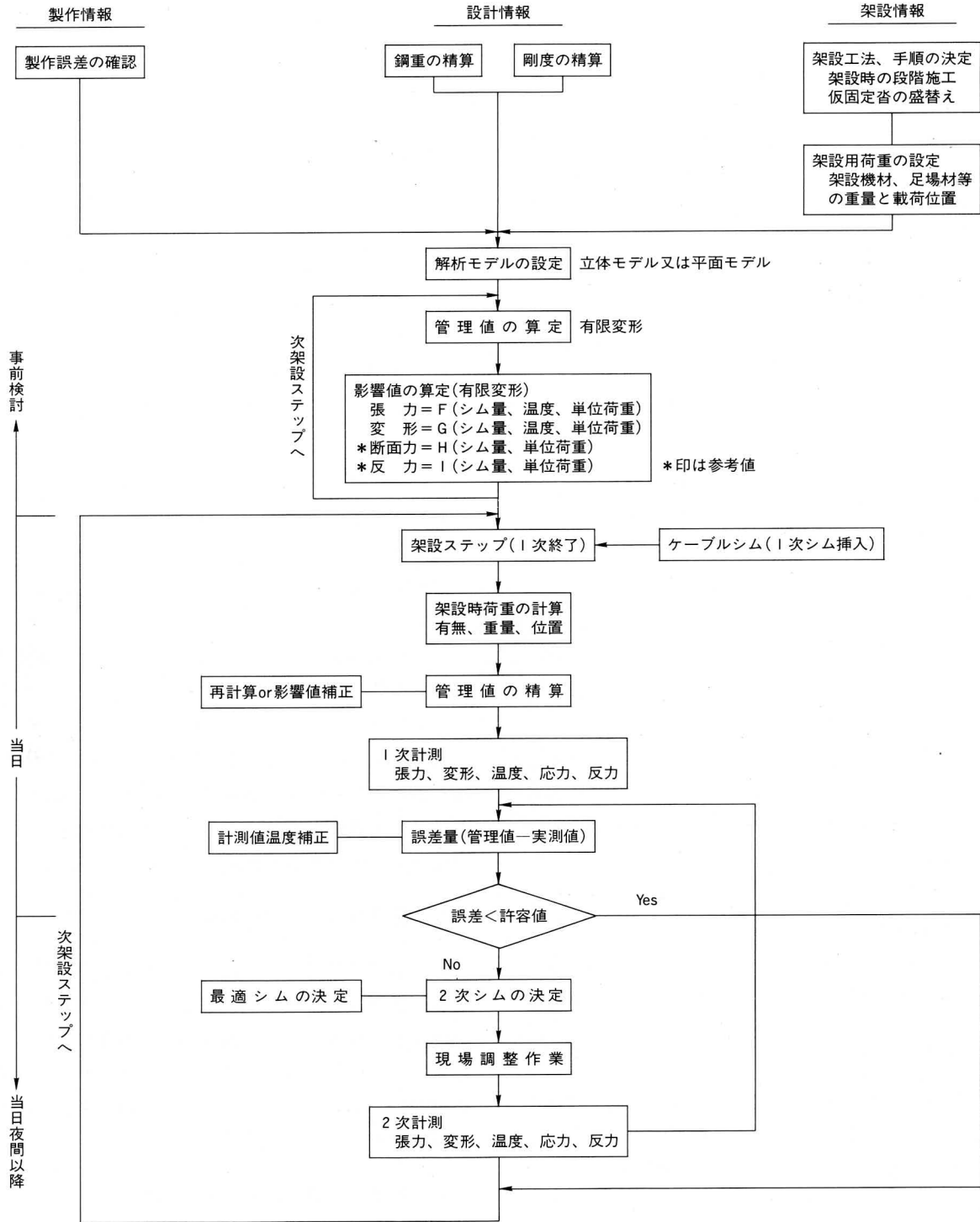


図-5 精度管理フロー

張力算定式

$$T = \frac{4W}{n^2g} (f \cdot l)^2 D$$

対称 1 次振動

$$\Gamma \geq 3 \quad (\text{サグの小さい場合})$$

$$3 \leq \varepsilon \leq 17$$

$$D = 0.857 - 10.89 \left(\frac{c}{f}\right)^2$$

$$17 \leq \varepsilon$$

$$D = 1 - 2.2 \frac{c}{f} - 2 \left(\frac{c}{f}\right)^2$$

逆対称 1 次振動

$$\Gamma < 3 \quad (\text{サグの大きい場合})$$

$$\varepsilon \geq 10$$

$$D = 1.02 - 6.26 \frac{c}{f}$$

ここで

f : 固有振動数 l : ケーブル斜長

w : ケーブル自重 EI : ケーブル曲げ剛性

g : 重力加速度 A : ケーブル断面積

θ : 水平からのケーブル傾斜角

$$c = \sqrt{\frac{EIg}{wl^4}}, \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{T}{TI}} \cdot l \quad \delta: \text{サグ比} (= \frac{s}{l})$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{wl}{128EA\delta^3 \cos^5 \theta}} \begin{pmatrix} 0.31\varepsilon + 0.5 \\ 0.31\varepsilon - 0.5 \end{pmatrix}$$

(b) ジャッキ法

ジャッキの油圧を用いてソケットを引張り、圧力変換器・変位計を読み、その値から最小二乗法で近似直線を描き、変位が今まさに生じようという荷重をもって張力とする。

またこの方法は、振動法の補正係数算定にも使用される。(図-6)

(c) サグ法

サグ量をピアノ線等を使って計測し、サグと張力の式から、ケーブル下端の張力を求める。

$$T = \frac{w}{2} (l \coth \psi - y)$$

ここで

$$\psi = l_n \frac{1+2\delta}{1-2\delta}$$

y : 鉛直座標成分

但し、説明のないものは前出に倣う。

2) 構造形状(桁のキャンバー・塔の倒れ)の計測
橋長により光学器機を使う方法と水管を使う方法等が

変位—張力 分布図よりの張力決定 ケーブルNO:
〔最小二乗法〕 ケーブル張力: 22.60(ton)

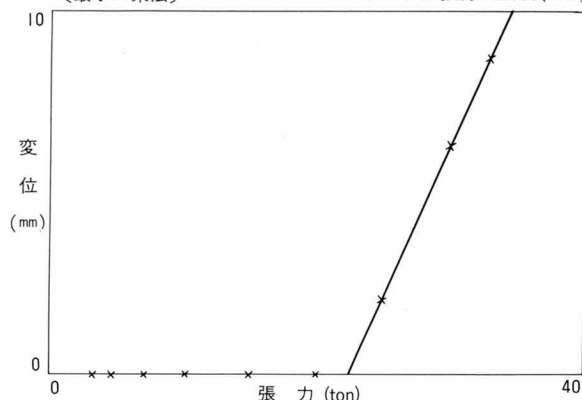


図-6 ジャッキ法による張力決定

ある。

i) 光波式測角測距儀(トータルステーション)

不動点に器械を据え、計測位置に反射プリズムをセットし、光波の反射を利用して、座標X、Y、Zを求め、標高を計算する。

ii) 水管式変位計測

計測位置の水位差(圧力水頭の変化)を歪に変換し、RS422の端子を介してパソコンに取込み、標高を計算する。

塔の倒れは、i)の方法等により塔頂の橋軸方向変位を計測する。

3) 温度

計測に入る前に部材温度・外気温度の経時変化をとり、構造物の温度特性・計測時間(桁断面内の温度差の少ない時間)の確認、設定に用いる。また張力・形状に及ぼす温度分布の影響等を補正するため、同時に計測を行う。

(3) 管理値と計測値の対比

計測当日の最終決定した荷重に対する管理値と温度補正後の計測値の差が誤差量となる。この誤差量と完成時の許容値を比較して、シム調整をするかしないかを決める。このとき当該架設ステップの誤差の特性を類推し、完成時にどのような誤差量になるのか、誤差量の移動を見極めておく。

(4) 最適シム量の決定とその調整

構造形状・剛性等非常に特徴のある構造物を含めて、全てを一つの最適手法で対応するのが最も効率が良いとは思えないし、また良い結果が得られないこともある。

しかし、実務的な面からみれば張力・形状等の意味の

異なる諸量を重みで評価した最小二乗法による方法が使い易いと考えられる。

ここではシステムに含まれる4つの方法について述べる。

1) シム量最小法

ケーブル張力に許容誤差(制約条件)を設定し、その範囲内で無数に存在するシム量の組み合わせのうちから、調整量の二乗和を最小にする張力誤差の組み合わせを決定する最適化問題を解いて、調整量を定める。調整量の二乗和を目的関数にとると、共役勾配法により解が求められる。

$$\Delta \mathbf{S} = \mathbf{X}^{-1}(\Delta \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}) = \mathbf{D}(\Delta \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon})$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n\}^T \quad |\varepsilon_i| \leq \varepsilon_{\max}$$

$$f = \Delta \mathbf{S}^T \cdot \Delta \mathbf{S}$$

$$= \Delta \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{D}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \Delta \mathbf{T} + 2\Delta \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{D}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \cdot \mathbf{D}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}$$

ここで、

$\Delta \mathbf{S}$: シム調整量 f : 目的関数

$\Delta \mathbf{T}$: 目標張力と計測張力との差

\mathbf{X} : 単位シム量変化による張力の影響行列

$\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}_{\max}$: 許容しうる張力誤差とその許容値

2) 重み付き最小二乗法

張力・形状の誤差の二乗和を最小とするシム量の組み合わせを得る目的関数を適用する。管理項目全体の残留誤差応答をバランスよく減少させるため、シム量・張力・形状にそれぞれ重み係数を導入し、誤差応答の二乗和をシム量で偏微分して零とおき、目的とするシム量が求められる。

$$(\mathbf{K}_T \mathbf{f} \mathbf{K} + \rho_0 \mathbf{E}) \Delta \mathbf{S} = \mathbf{K}_T \boldsymbol{\rho} (\mathbf{z} + \mathbf{r})$$

$$f = \sum_{i=1}^m \rho_i \cdot (z_i + r_i)^2 + \rho_0 \cdot \sum_{i=1}^m S_i^2$$

ここに、

$\Delta \mathbf{S}, S_i$: シム調整量の行列と i 番目要素

\mathbf{K}, \mathbf{K}^T : 張力・形状に対応する影響行列と転置行列

$\boldsymbol{\rho}, \rho_i, \rho_0$: 張力・形状の重みの m 行 m 列の対角行列とその i 番目要素、シム量の重み係数

$\mathbf{z}, \mathbf{r}, z_i, r_i$: シムによる応答と誤差応答の行列と各 i 番目要素

\mathbf{E} : n 行 n 列の単位行列

f : 目的関数

3) 多目的計画法

張力・形状の各 n 、 m 個の残留誤差と n 個のシム量を目的関数とし、実用上可能なシム調整量の n 個の上下限の制約条件で目的関数の最適化を図る。この多目的問題は満足度 D_i を導入することにより、単一目的の問題に置換され、次のように定式化できる。

目的関数 $F = D$ (D_i の最大值) \rightarrow 最小化

制約条件 $D_i \leq D$ ($i = 1, 2, \dots, 2n+m$)

$\Delta l_{Li} \leq \Delta l_i \leq \Delta l_{Ui}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)

ただし、 $D_i = (f_i - f_i^*) / (\hat{f}_i - f_i^*)$

ここで

$\Delta l_{Li}, \Delta l_{Ui}$: 第 i ケーブルのシム調整量の下限、上限値

f_i : 張力・キャンバーの残留誤差とシム調整量

f_i^* : 各目的関数 f_i の理想点(十分小さい値)

\hat{f}_i : 各目的関数をどこまで実現したいかその水準で希求水準という

各種方法に対して、算出されたシム量で調整した場合の応答予測値が出力され、誤差量の調整状況をみてシム量を決定する。このとき調整量が応答予測値にあまり影響を与えない程度のもは零と考え、調整量および調整箇所数を最終決定し、任意シム法で応答予測値を計算して確認する。調整量零の箇所を設けることにより、ジャッキを使用した調整の工程短縮ができる。

(5) 結果の出力

出力される主なデータを表-1に示す。

これらのデータには最終の結果に至る迄のものと、最終結果とがある。いずれにしても報告書にそのまま入ってくるので、統一した形式をとっている(図-7~図-9)。

表-1 出力図表

	表	図
温度	温度測定一覧表 平均温度一覧表	温度経時変化図
張力	張力測定誤差一覧表	張力計測図 張力計測誤差図
形状	形状測定誤差結果	形状測定分布図 形状側面誤差図 主桁鉛直変位断面図
応力	応力測定一覧表	応力経時変化図
反力	軸力を反力の測定誤差一覧表	軸力(リンク)および反力図 軸力(リンク)および反力誤差図
シム応答	シム応答一覧表	張力応答誤差図 形状応答誤差図

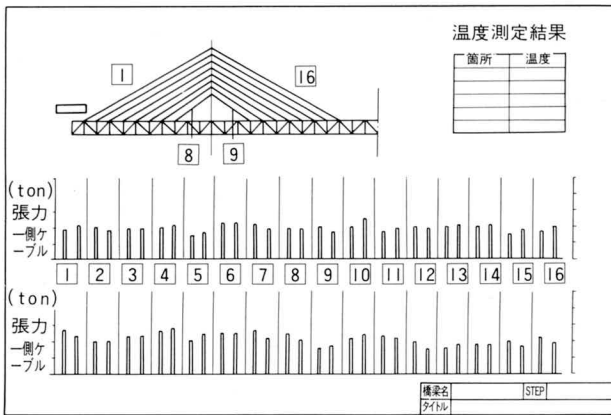


図-7 ケーブル張力

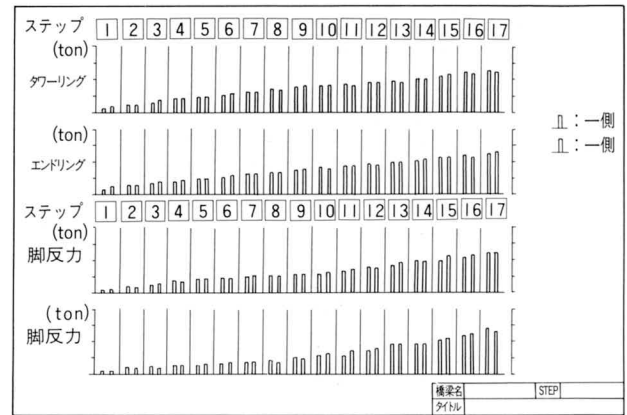


図-9 軸力および反力

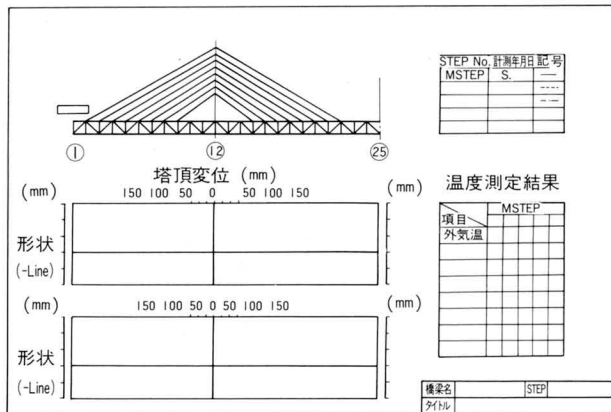


図-8 形状

5. まとめ

本システムを稼働するためには、ここでは説明をしていない支援プログラムとして、完成系設定・解体計算プログラム、計測システムに渡すデータのファイルの再編集、補正計算を行う編集プログラム等がある。これらは全て事前に汎用計算機で処理を行う。ところでシステムとしては作業性・機動性の良いパソコンを使っているが、計測直前に先ほどのファイルの一部に変更が生じた場合、オンラインにより汎用計算機の力を借りることになる。現場での計測、温度等による補正計算、シム量の最適化計算、応答計算はパソコンで処理する。但し、シム量最

適化計算のうち多目的計画法は、構造モデルがある程度大きくなると、パソコンの容量では対応できなくなり、汎用計算機に処理を委ねることになる。

6. あとがき

本文では斜張橋の精度管理システムについて述べた。これと同様なシステムとしてニールセン橋対応のものが、現在川津大橋で稼働している。またパソコンの容量に対する問題については、エンジニアリングワークステーション等を使用すれば解決でき、さらに現場だけでクローズしたシステムにすることができる。

<参考文献>

- 1) 新家、広中、頭井、西村；振動法によるケーブル張力の実用算定式について、土木学会論文集294号、昭和55年2月
- 2) 松村、新家、頭井、寺西；斜張橋のケーブル張力計測と張力調整、橋梁と基礎13巻9号、昭和54年9月
- 3) 藤沢；斜張橋架設時のシム量決定方法、橋梁と基礎18巻9・10号、昭和59年9月・10月
- 4) 古川、井上、中山、石堂；多目的計画法を用いた斜張橋の架設時精度管理システムに関する研究、土木学会論文集374号、昭和61年10月

1990.10.31受付