

斜張橋の架設形状管理システム (櫃石島橋)

能登有愿*

1. まえがき

斜張橋はケーブル張力を、設計時にある範囲で任意に選ぶことが可能な、自由度の大きい構造物である。しかるに、主桁と主塔で構成される定着間距離とその間に定着されるケーブル長との間には、製作、架設、計測等を通して、相関的に誤差が生じる。その誤差により、ケーブル張力、主桁、主塔の形状、応力と構造系全体に大きな影響を与える。

それに対して、全体が最適な管理限界の範囲に納まるように、すなわち架設時の安全性、完成時の精度を保持するように、ケーブル長の調整を行ない、ケーブル張力、主桁、主塔形状の良い組み合わせを見つける。

特に本橋のような長大橋でかつ、マルチケーブル形式の場合は、ケーブル張力、主桁の形状、主塔の倒れ、温度、応力等の計測項目の着目箇所数が多く、その結果のデータ処理および最適なケーブル長の調整量の選定等多

くの作業量を現場で遂行するために、高速処理が可能なシステムが必要となる。

ここでは、櫃石島橋で行なった、リアルタイム処理の形状管理システムについて述べる。

2. 櫃石島橋の概要

櫃石島橋は、本四連絡橋・児島一坂出ルート海峡部に架設される道路鉄道併用のケーブル2面のマルチ・ファン型3径間連続鋼斜張橋である。

ここに、構造、架設の概要について述べる。

(1) 構造の概要

本橋の主桁は、鋼床板と合成されたトラス構造で、中央径間、側径間共、11段のケーブルによって主塔から斜吊りされている。主塔の形状は、道路面の横断面からみると、塔の中間部がお互いに向き合った形でテーパーが

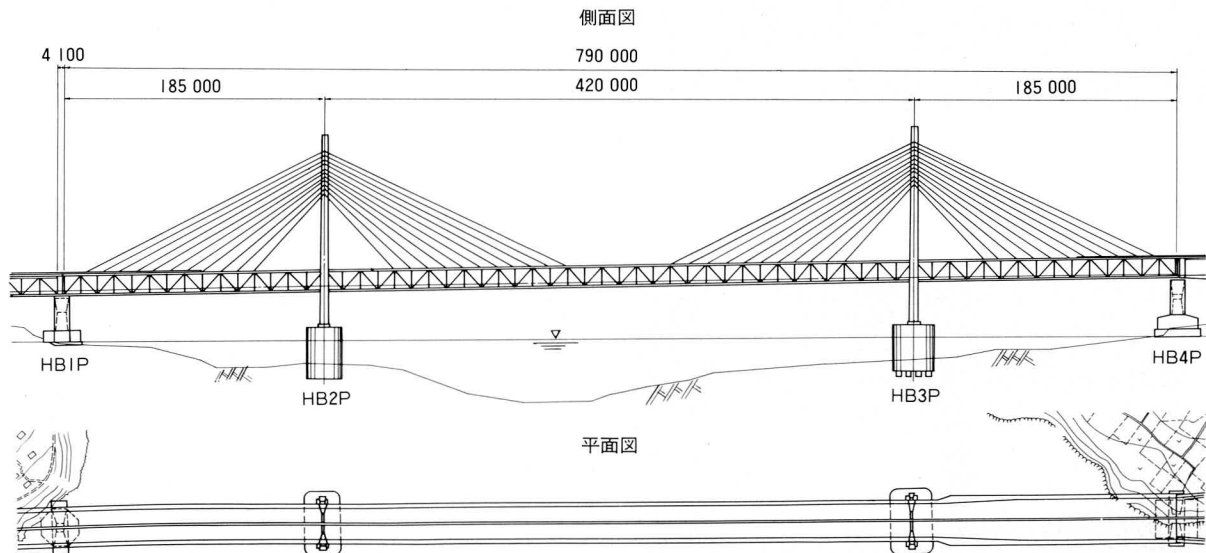


図-1-1 一般図

* 技術本部設計部設計第2課課長代理

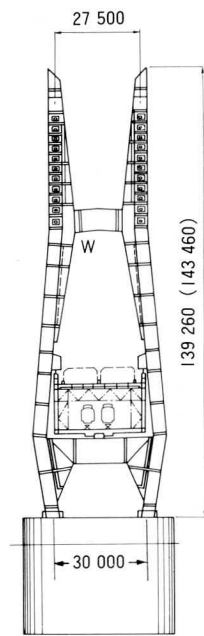


図-1-2 主塔図

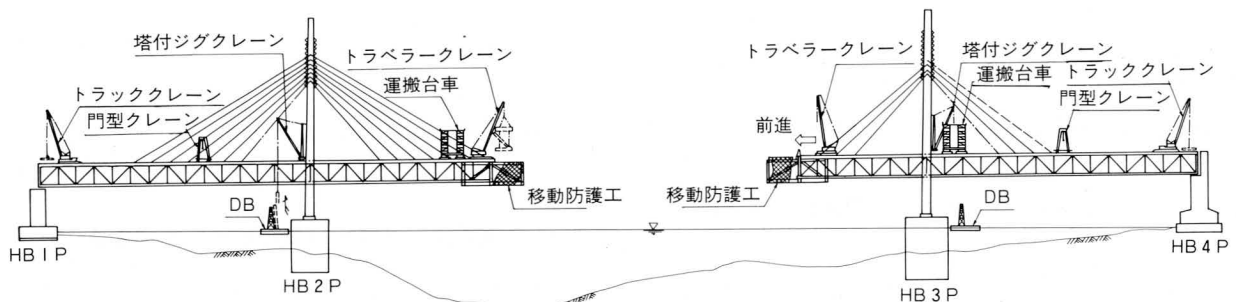


図-2 架設概要図

ついており、さらにハンチ部を有するH型である。

ケーブルは、部材断面組立時に組み込まれた定着ブロックに定着されており、張力導入等のジャッキ操作は全て塔側で行っている。ケーブルの種類はHiAm形式で、その構成は1ケーブル2ストランドで、1ストランド当り $\phi 7\text{mm}$ の素線が139~277本となっている。

構造形式は図-1に示す通りである。

(2) 架設の概要

本橋の架設は次に示す順序で行なわれる。

主塔の底板、基部をセットした後、下部を大ブロックで架設する。次にコンクリート橋脚と塔下部および必要があればベントを支持点として、主構の側径間を大ブロック架設する。そしてこの主構上面にタワークレーンを設置して、塔を単材で塔頂まで架設する。これでケーブ

ルを張り渡す条件が揃ったので、主構の中央径間を1パネルずつ面材張出し架設しながら、ケーブルを逐次取付けていく。この面材張出し架設において、側径間側の最下段ケーブル付近は主塔近傍の作業場所として使用するので、このケーブルは桁の中央径間の閉合直前に架設するものとする。

また、最下段ケーブル（側径間側は前述のケーブルの直上のケーブル）は面材張出し架設開始時の架設時ケーブル張力が非常に大きくなるので、ケーブル長を75mm位長めにし、張力の調整をしておいて、次のケーブルがセットされてから、シムを挿入して余長を打消す。

ここに、中央径間の面材張出し架設の概要を図-2に示す。

次に面材張出し架設の一サイクルのフローを図-3に示す。

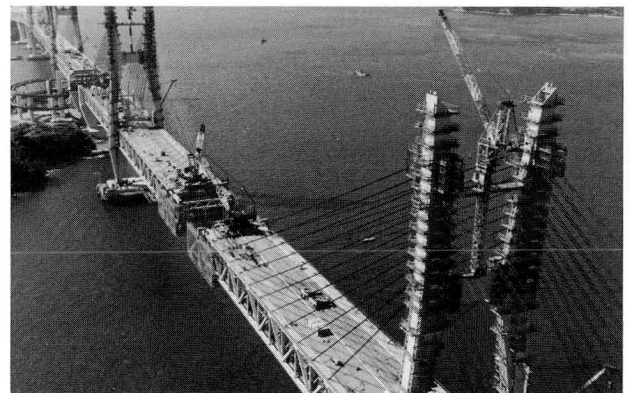


写真-1 閉合間近の主構の架設

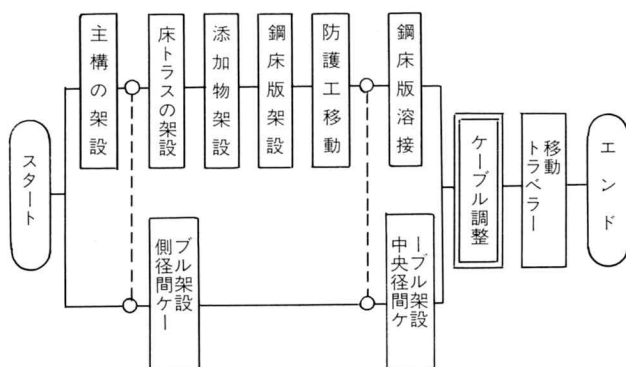


図-3 面材架設の一サイクル

3. 構造特性の調査

橋梁の形状管理を行っていくには、事前に構造特性を把握しなければならない。そこで各種の誤差および変化量が構造物の挙動にどのような影響を与えるかを述べる。

(1) 各種誤差による影響

(a) 桁剛性が一様に+5% (+:設計値より大)の誤差を有する場合

桁の形状は、MSTEP 6-3で桁先端13mm、MSTEP 12で33mm、MSTEP 16で8mm位各々上げ越しのキャンバー誤差となる。

塔頂の倒れは、各ステップで側径間側に1~4mm位である。

先端のケーブル張力誤差は、MSTEP 6-3で-4t、MSTEP 12で-6t、MSTEP 16で0tとその影響は小さい。

但し、MSTEP 6-3:ケーブル6段で桁はその先2パネル張出しの系

MSTEP 12 : 閉合直前の系

MSTEP 16 : 完成時の系

(b) 桁重量が一様に+5%の誤差を有する場合

桁の形状は、MSTEP 6-3で桁先端59mm、MSTEP 12で142mm、MSTEP 16で83mmと各々下がり気味のキャンバー誤差となり、影響が大きい。

塔の倒れは、各ステップで中央径間側に19~26mm位である。

先端のケーブル張力誤差は、MSTEP 6-3で23t、MSTEP 12で44t、MSTEP 16で25tとなる。

(2) 温度変化(上弦材のみが+10℃)による影響

桁の形状は、MSTEP 6-3で側径間中央32mmの上げ越し、中央径間先端75mmの下がりキャンバーとなる。

MSTEP 12で側径間16mmの上げ越し、桁先端で32mmの下がりキャンバーとなる。

塔の倒れは、各ステップで中央径間側に47~13mmである。

ケーブル張力は、その時点の最上段ケーブルで25~26t(32t:アンカー側)の張力増加となる。

(3) 立体構造物としての特性

桁形状は、例えば東側主構面の最上段ケーブルを10t多めに引込んだ場合、MSTEP 2-4で桁先端が東側1.1mm、西側0.7mm、MSTEP 12で各々2.1、1.7mmの上げ越しになる。

塔の倒れは、MSTEP 2-4で中央径間側に東側2.5mm、西側0.3mm、MSTEP 12で側径間側にそれぞれ1.7、1.9mmとなる。

ケーブル張力は、MSTEP 2-4で中央径間側最上段ケーブルの東側10t、西側-1t、MSTEP 12で10t、0tである。

又、桁先端に振りモーメント荷重(100t・m)を載荷して偏心の影響を調べたが、各部材への影響は微小である。

MSTEP 2-4:ケーブル2段で桁はその先1パネルの系(架設ステップは図-7参照)

(4) 仮置材、クレーン等の移動荷重の影響

MSTEP 6-3の系に10tの格点荷重を移動させて、桁変位、塔頂水平変位、ケーブル張力の変化を調べた。

桁の変位は、桁先端に着目すると架設先端付近に載荷する荷重の影響が大きく、荷重の大きさ、位置に敏感に反応する。側径間中央付近に着目すると、その最大影響値でも2~4mm程度である。

塔頂変位は、側径間荷重には鈍感であるが、架設先端付近の荷重には敏感で7mm程度となる。

ケーブル張力は、架設先端に荷重が載荷した時の最上段ケーブルで5t程度である。

(5) 桁の実剛度の測定

大ブロック架設完了時の2点支持状態で、桁の静的たわみの測定および振動測定を行って、桁剛度を確認した。その結果、設計剛度より約5%大きいことが判った。

(6) 単位シムによる応答

各架設ステップの構造系において、シム量を単位量(10mm)変化させたとき、ケーブル張力や桁先端がどれだけ

変化するかを調べる。

- 1) シム厚+10mmにより、当該ケーブルの張力は15～20t位増え、桁先端は1.5～3.5mm位持ち上がる。
- 2) 張力+10tにより、桁先端は1～2mm位持ち上がる。
- 3) 桁先端たわみのシムによる応答は、側径間より中央径間、下段より上段のケーブルの方が多少大きめであるが、総じて鈍感である。
- 4) 張力のシムによる応答は上段よりも下段ケーブルの方が敏感である。

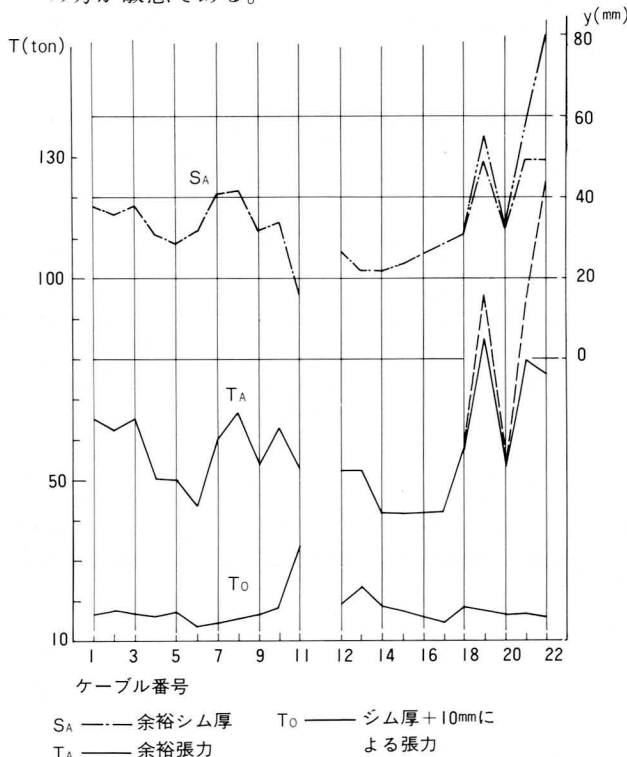


図-4 余裕張力、余裕シム厚、単位シム量による張力

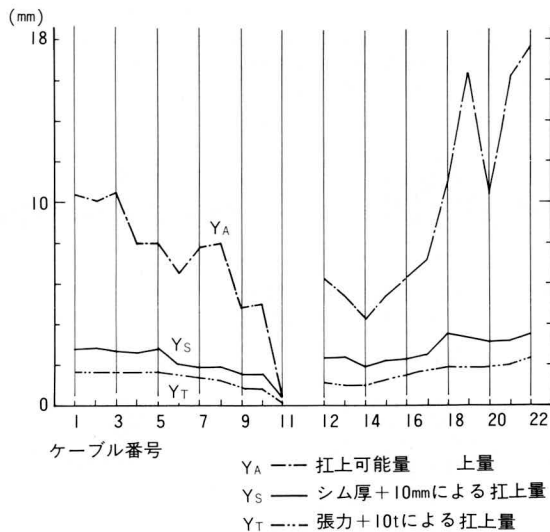


図-5 桁先端扛上量

(7) ケーブルの余裕張力

ケーブルの余裕張力には、次の2種類の張力がある。

- ① 許容張力と設計張力の差
 - ② 設計張力に含まれる製作・架設誤差として見込んだ量
- 一方、シム量は標準を50mmとして、変動分を±50mm(構造上負側は50mm迄)と考えている。

これらの制約条件のもとで、張力や変形がどこまで修正可能かを図-4に示した。

ケーブル張力の余裕(TA)は、標準は40～70tであり、中央径間の上段ケーブルの余裕の大きい箇所、90～120t程度である。また完成時の許容張力以内での挿入可能シム量(SA)は、ほぼ20～50mmである。また架設先端の調整可能量(YA)は、5～18mm程度である。(図-5参照)

4. 形状管理システム

本橋に形状管理システムを適用するに際し、まず管理方針について述べる。

(1) 管理方針

- (a) 誤差の中にはケーブル長の誤差、桁と塔の相対位置の誤差、その他種々の誤差(死荷重算定誤差、桁剛性誤差、温度不均一による誤差、計測誤差)等、調整すべき誤差と調整すると施工不可能なシム厚が生ずる誤差(本来シム厚で調整すべきでない誤差)とが混在している。そこで重み付けをして最適な値に調整する。

桁形状の誤差の許容値

$$\delta_a = \pm \{25 + 0.25(L - 50)\}$$

側径間：±59mm、中央径間：±118mm

主塔の倒れ

$$\delta_a = H/5000$$

HB 2 P : 28mm、HB 3 P : 29mm

- (b) 架設作業のスムーズな進行、架設中の安全性確保および完成時の形状、ケーブル張力等の精度向上を図るために、ケーブルを架設する毎にシム調整を行う。さらに、中央径間閉合後にケーブルの張力、桁、塔の形状を計測、確認する予定である。

- (c) 架設時のシム調整は、最上段の4ケーブル・8ストランドだけを対象とする。一段のシム調整作業は、管理項目の計測、シム量の計算、シムの挿入、再計測のサイクルでこれらを一夜で行うものとする。

(d) 計測データの補正用に、主桁、主塔には温度ゲージを、ケーブル（ダミーケーブル）には熱電対を使用する。また架設時の有害な応力の発生を確認するために主橋体および、エンドリンク、タワーリンクに歪ゲージを使用する。

(e) 管理項目は、最上段の8ストランド、その下2段の各々4ストランドの計16ストランドの張力と、両主構面の格点の鉛直変位と塔頂の倒れである。(d)で測定する応力は参考値であり、管理項目とはしない。

(f) ケーブル張力、形状等の各種の計測および、これらの調整のための最適シム量の計算等を、コンピュータを活用したシステムを使用し、架設作業を迅速に行なうと共に、出来上り精度の向上を図る。

(2) 施工管理のフローおよび面材張出し架設に伴うシム調整ステップ

施工管理のフローを図-6に示す。

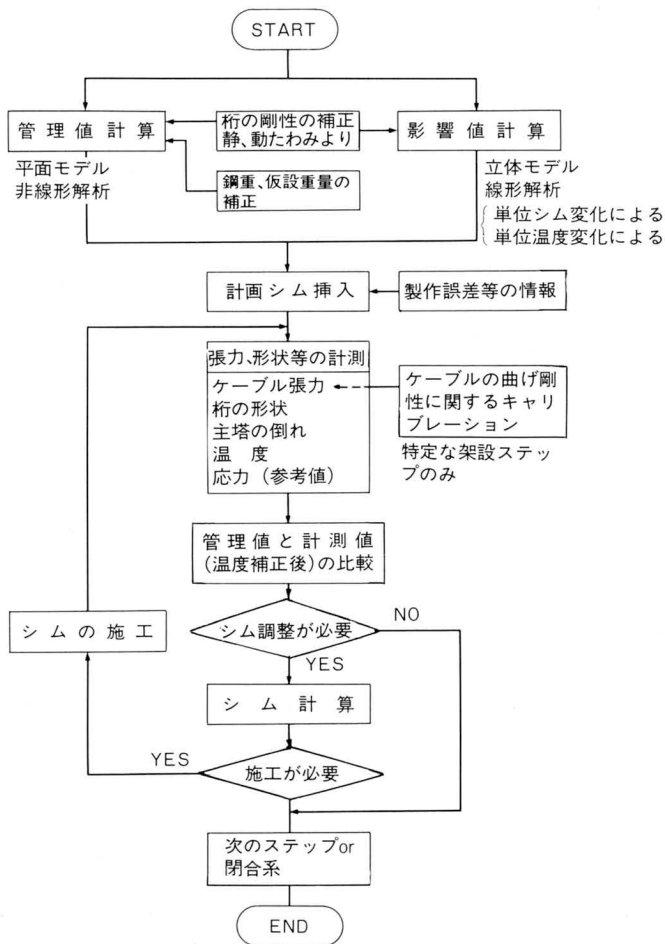
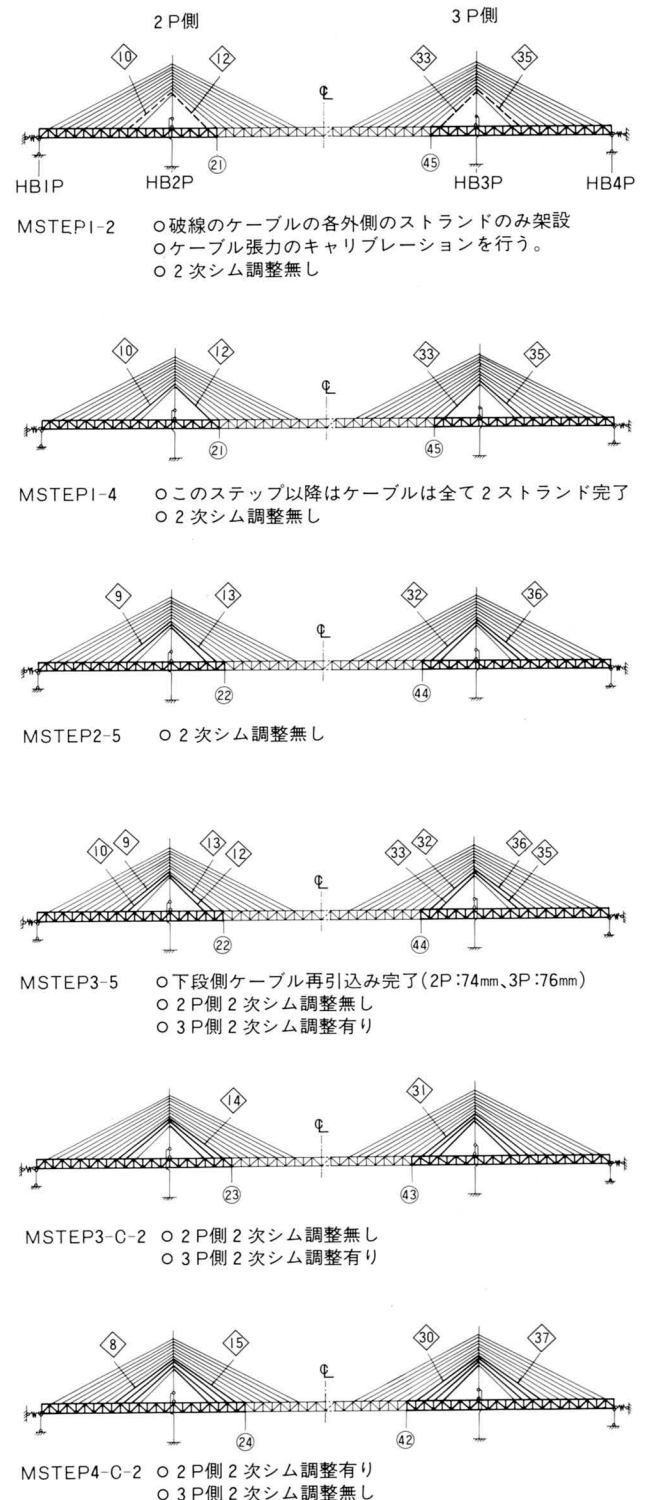
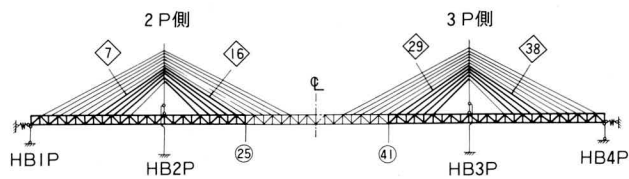


図-6 施工管理のフロー

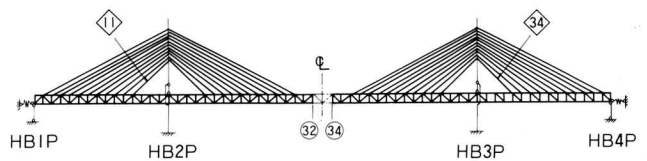
このフローの中の計画シムは、製作時のケーブル定着間距離を計測し（ケーブル長は正しいとする）、誤差を求め、設計シム厚50mmを補正したもので、1次シムと称している。

次に、中央径間の面材張出し架設に伴うシム調整の架設ステップを図-7に示す。

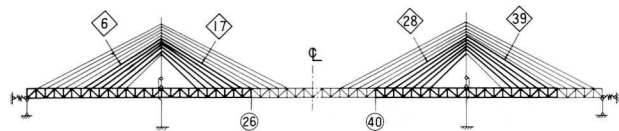




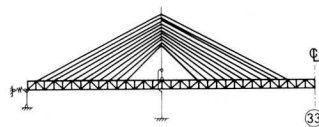
MSTEP5-C-2 ○ 2次シム調整有り



MSTEP12-S-2

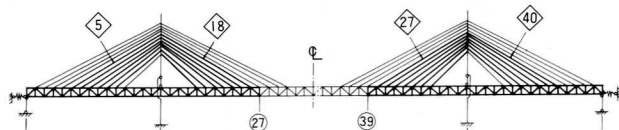


MSTEP6-C-2 ○ 2P側1次シム調整有り、2次シム調整有り
○ 3P側1次シム調整有り、2次シム調整無し

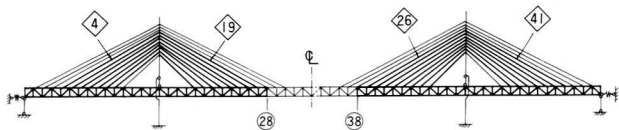


MSTEP-12

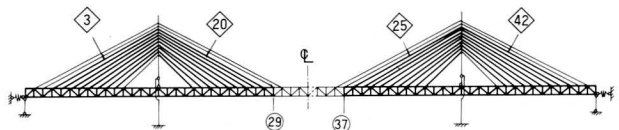
図-7 シム調整の架設ステップ



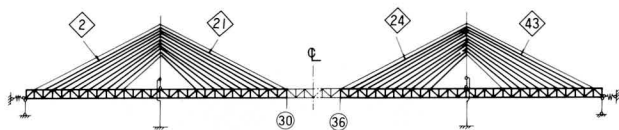
MSTEP7-C-2 ○ 2次シム調整有り



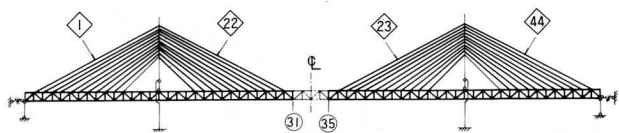
MSTEP8-C-2 ○ 2次シム調整有り



MSTEP9-C-2 ○ 2次シム調整有り



MSTEP10-C-2 ○ 2P側2次シム調整無し
○ 3P側2次シム調整有り



MSTEP11-C-2

(3) 形状管理システム

本システムは、3P側は現地のパソコンと大型計算機とがオンラインで接続されたシステムであり、2P側は通常の状態ではミニコンを中心としたシステムである。

現地のコンピュータで計測の制御、計測データの整理、簡単なシム計算等を実行する。しかし、荷重（仮設機材等）およびその位置の変化に伴う管理値の再計算、繰返し計算を必要とする最適シム計算（2P側はミニコンで処理）等は大型計算機で行ない、データ通信端末としてパソコンを使用する。形状管理作業の中で時間的にクリティカルになるのは、ケーブル張力の計測である。

本橋は一段当りのストランド本数が多く、一夜で計測、シム計算、シムの施工、確認のための再計測等を行なうには、コンピュータ制御による多チャンネル同時計測が必要と思われる。また事前の影響値計算によれば、構造物の挙動が温度分布に対して非常に敏感であるので、コンピュータ制御による温度の自動計測を必要とする。

(a) 張力の計測

張力の計測は、常時微動振動法による。鋼床版上面から1.5~2.0mのケーブル位置に取付けられた加速度計により得られた振動データ（振動波形）は、A/D変換器によって直接システムに取込まれ、システムによって、スペクトル解析（FFT法による）、張力計算、温度補正、剛性等の補正が行なわれる。この測定された固有振動数から張力を計算する場合のケーブルの曲げ剛性や境界条件の影響を補正するために、ジャッキの油圧を利用してキャリブレーションをする。（図-10参照）

固有振動数を求める方法は、ここで行っている周波数

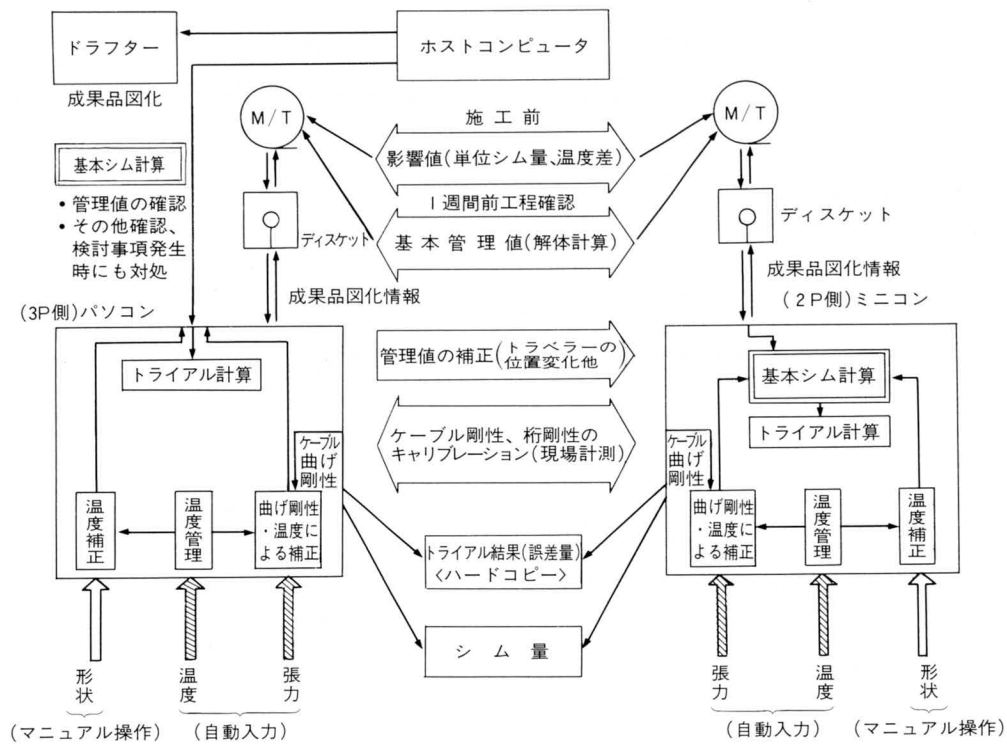


図-8 管理システムとジョブの流れ

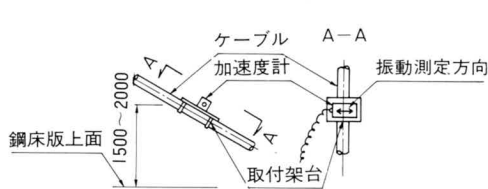


図-9 加速度計取付け図

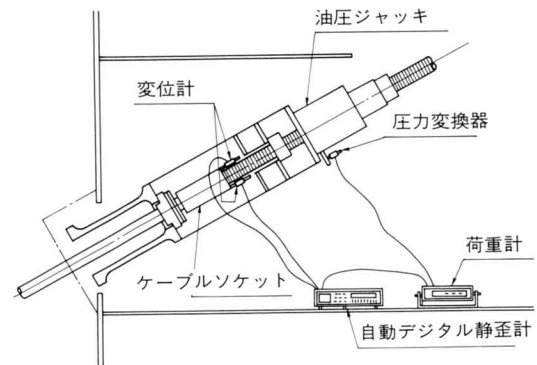


図-10 ケーブル張力キャリブレーション要領図

分析による方法の他に、共振曲線から求める方法、定常波振動記録波形（オシログラフ）による方法等がある。

架設中のシム調整のため、張力計測を行なうケーブルは、最上段の4ケーブル・8ストランドとその下の2段のケーブルの外側8ストランドの計16本であり、同時に4本を行なう。

また、中央径間閉合後は、全ストランドの張力を計測する。

(b) 桁および主塔の倒れの計測

桁の形状は、東西両主構面の下弦材の格点位置を水管式水準測量によって計測する。

本計測を採用した理由は、計測が夜間になるため、また障害物があり見通しが難しいため（盛替えの頻度が増える）、作業の安全性、時間短縮および測定精度の向上を目的としてである。

主塔の倒れは、ケーソン上に据え付けられたレーザー

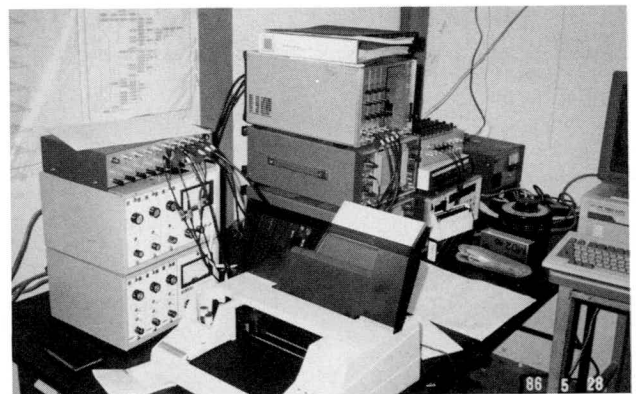


写真-2 現場事務所のコンピュータシステム

セオドライトで、塔頂の受光板にレーザービームを照射し、受光板の目盛を読み記録する。

このようにして得られた計測データの温度補正を行なうために、計測時刻を記録しておく。また計測データのシステムへのインプットはマニュアル操作によるものである。(図-11参照)

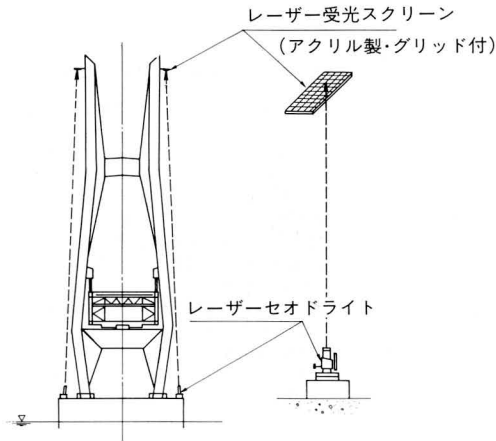


図-11 主塔の倒れ計測概要図

(c) 温度の計測

温度の計測は、ケーブル張力や形状に温度分布の影響が少ない時間帯を知り、計測時刻を設定するためと、各計測データに含まれる温度分布の影響を除去すべく補正するためである。

温度計測は、コンピュータ制御による自動計測とし、システム内に温度データとして保存し、張力、形状、応力等の計測値を自動的に補正する。温度の測定点は、2P側、3P側の両方で、側径間の主構の上下弦材22点、主塔の高さの中間部4点、ダミーケーブルに4点とする。これらの計測位置の温度データから、主塔、ケーブル各々の部材の平均温度、主構の上下弦材各々の平均温度の4項目を求め、温度補正計算に用いる。

(d) 部材応力の計測

構造系の応力状態を把握するため、場合によっては安全性のチェックのため、主な部材の応力を参考データとして計測するものとする。

測定対象とする部材は、反力を受けるエンドリンク、タワーリンク、主として軸力部材である上下弦材、および曲げと軸力を受ける塔基部とする。応力の計測は、コンピュータ制御による自動計測とし、形状および張力計測と同時にを行うものとする。

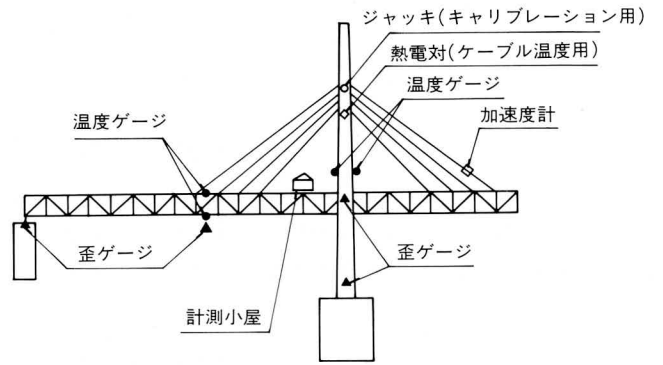


図-12 センサー等配置概要図

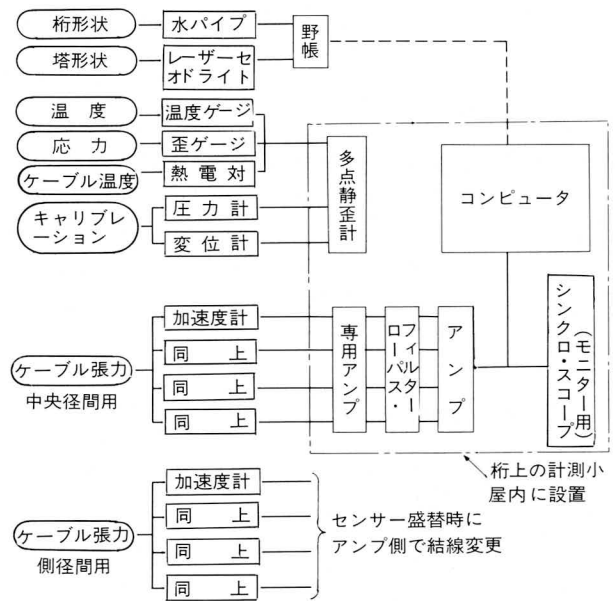


図-13 計測関係ブロック図

(e) シム調整量の決定

シム調整は、管理限界(管理目標値に許容誤差量)と構造物の状態を示す各種の実測値とのより良い関係を見つけることである。すなわち、シム厚をいろいろ調整することによって、(管理限界-実測値)の値をバランス良く許容誤差内に納めることである。管理値としては、なるべく広い範囲の項目を採用することが、現実にあったシム量を選ぶことになり、ここではケーブル張力、桁の形状、塔の倒れとする。

$$Y = X \cdot S \rightarrow S = X^{-1} \cdot Y$$

但し、X：各管理項目の影響値

S：各ケーブルのシム量

Y：管理限界-実測値

シム調整量の決定とは、上式のSを求めることである。さて、ここで実際の現場作業を考えてみると、閉合前の各架設ステップにおいてシム量を変えるとすることは、

そのステップで引込んだケーブルとそれに対応する側径間のケーブル（最上段ケーブル）のみのシム量を調整することが適当と考えられる。

最上段一段だけのケーブルのシム量を決定する場合には、まず最小二乗ロジックにより最適シム量を求める。これを初期値とし、次に重み付き最小二乗法によりトライアル計算を行ない、この計算値に対して、技術者の工学的判断を加えて施工すべきシム量を決定する。

さらに複数段のケーブルのシム調整が必要な場合には、最小二乗ロジックおよびシム量を目的関数とする方法、張力、形状、シム量を目的関数とする多目的計画法を用いる方法等により、シム量を比較検討し、最小シムを決定する。

5. 形状管理システムによるアウトプット

形状管理システムのアウトプットのうち、温度の経時変化、ケーブル張力のキャリブレーション、一架設ステップのシム量トライアル計算による形状、張力の変化傾向および調整結果を示す。

(1) 温度の経時変化

温度の経時変化を知るために、3P側MSTEP5-C-2について述べる。

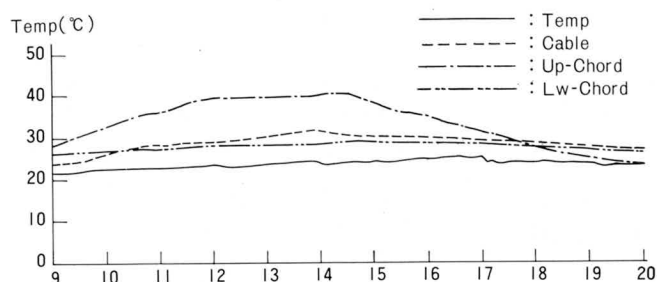
測定日時6月20日9時～20時の気温は、日中で25.5℃位である。しかるに各構造部材の最大温度は、ケーブルで32℃弱、上弦材で41℃位、下弦材で29℃強であり、時刻による温度差はケーブルで8.5℃、上弦材で17.5℃、下弦材で3℃位である。

気温と比べて、ケーブル、特に上弦材は日中、太陽の直射によりかなり温度が上昇することが判る。

また、構物造の挙動に最も大きな影響を与える上下弦材の温度差は、日中で12℃位の差であるが、18時以降は最大でも3℃弱の差となる。(図-14)

(2) ケーブル張力のキャリブレーション

油圧ジャッキを作動させ、ケーブルに張力を導入し、荷重計と圧力計の読み値を何点か得、一次式の関係を作る。このときソケットの変位計が連動しているので、ソケットの変位と圧力計の読み値の関係をプロットし、変位が大きく変化するところ(ソケットとシムが離れた瞬間)の圧力計の読み値(又はグラフにより作図で求めた値)を前記の一次式で変換し、ケーブル張力を求める。



*部材温度一覧表
測定日時：昭和61年06月20日20時59分

| 部 材 | 温度 |
|--------------|------|
| 外 気 温 | 22.4 |
| ケーブル平均温度 | 26.4 |
| 塔平均温度 | 25.8 |
| 桁平均温度 | 24.8 |
| 上弦材平均温度 (東側) | 25.2 |
| 上弦材平均温度 (西側) | 23.2 |
| 上弦材平均温度 | 24.3 |
| 下弦材平均温度 (東側) | 25.7 |
| 下弦材平均温度 (西側) | 25.6 |
| 下弦材平均温度 | 25.6 |

単位：[℃]

図-14 温度の経時変化(3P側MSTEP5-C-2)

一方、固有振動数を使用して、文献²⁾によりケーブル張力をシステム内で計算する。

次に、これらの変位から求められたケーブル張力と、固有振動数から求められたケーブル張力の比をとり、これを補正係数($\alpha=0.975$)とする。この補正係数は後の架設ステップ(他のケーブルについて)で確認する。

(図-15)

(3) シム量のトライアル計算と最適シム量の決定

その架設ステップで取付けた最上段ケーブルに、1次シムを挿入し、計測(調整前の)を行い、結果により調整の必要を判定する。調整はシム量のトライアル計算を形状、張力の重み係数を変えて行う。各種誤差量の収束の度合いは、調整しようとする管理項目の重み係数を大きくすることにより、急速に図られる。しかし、側径間の桁の形状は、構造特性の項で述べたように、感度が鈍い。

これらのトライアル計算の中から、技術者が工学的判断により、全体の項目のバランスを考えて、最適シム量(NO.1-5)を決定する。この方法は、前述した本来シム厚では、調整すべきでない誤差を調整量から除外していることになる。(図-16)

ジャッキ油圧一変位による張力計測

櫃石島橋ケーブル振動加速度のスペクトル

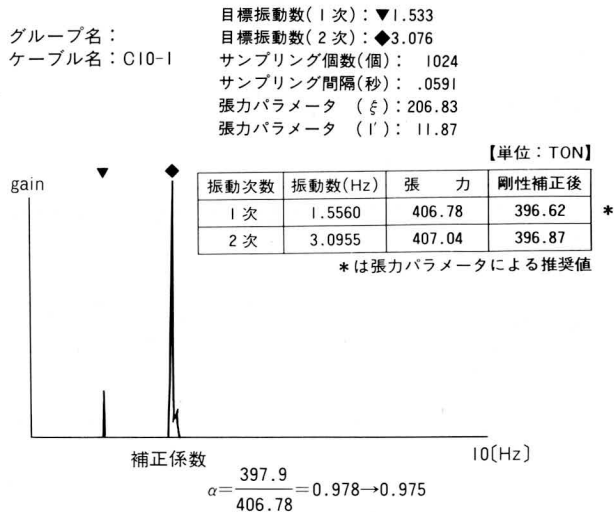
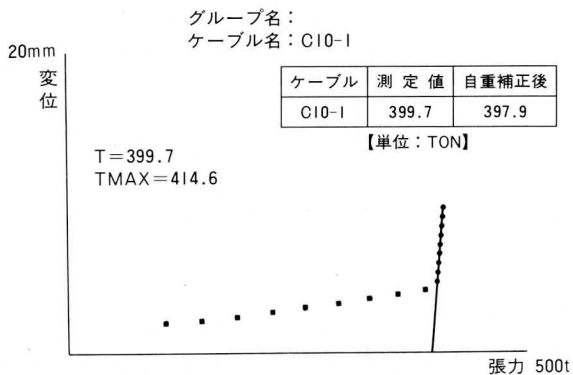


図-15 ケーブル張力のキャリブレーション

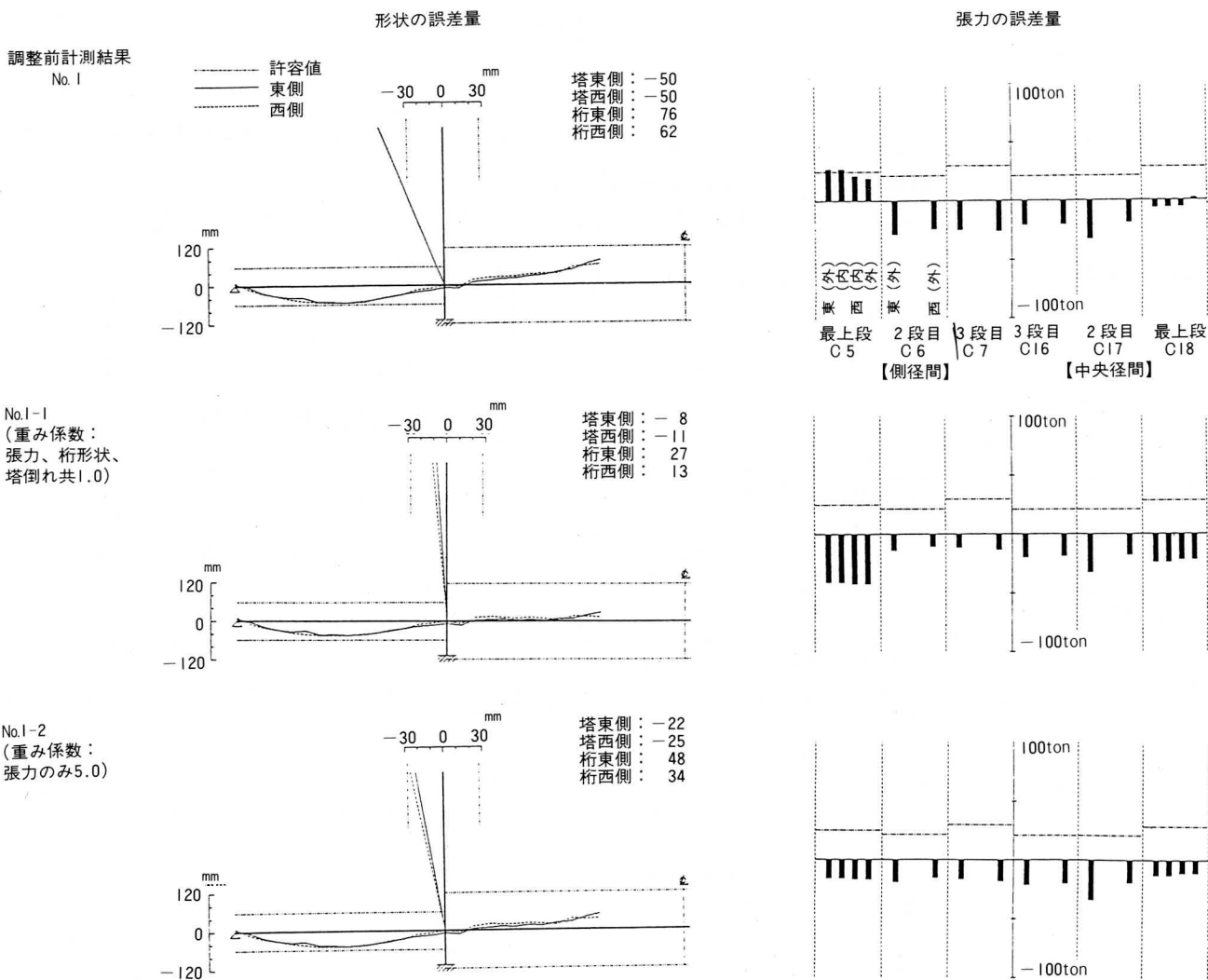
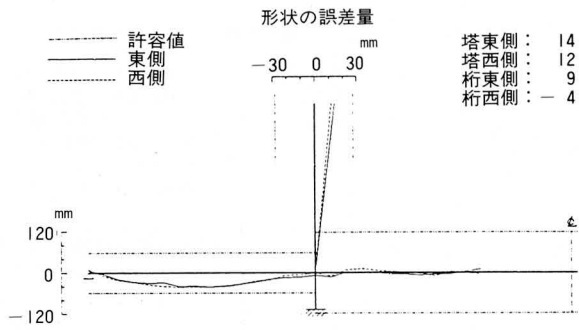
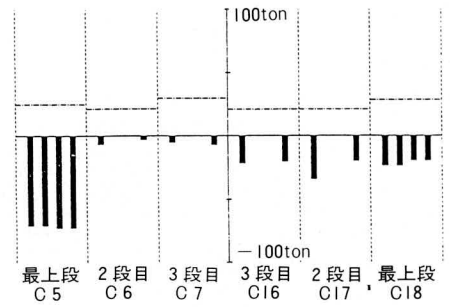


図-16 (1) シム量のトライアル計算および調整結果 (その1)

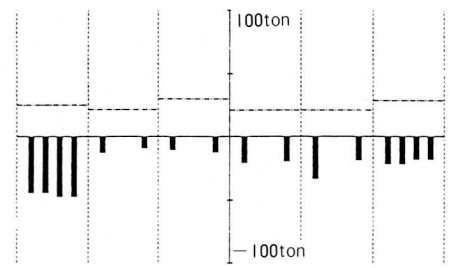
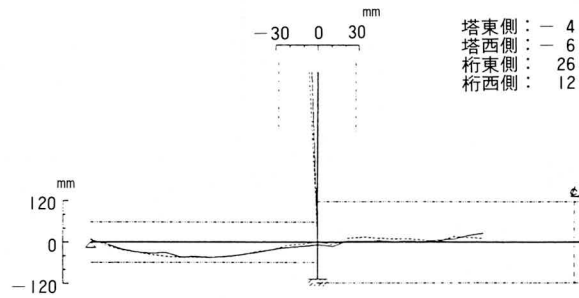
No.1-3
(重み係数：
桁形状のみ5.0)



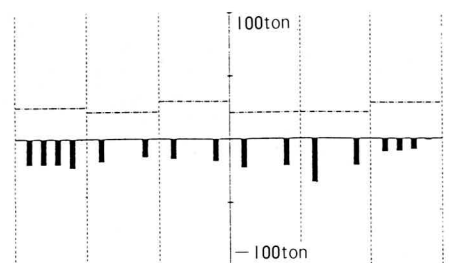
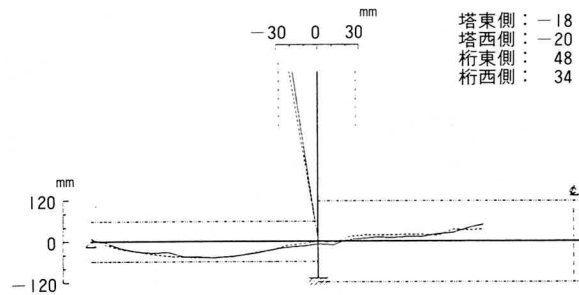
張力の誤差量



No.1-4
(重み係数：
塔倒れのみ5.0)



No.1-5
(任意シム量)



調整後計測結果

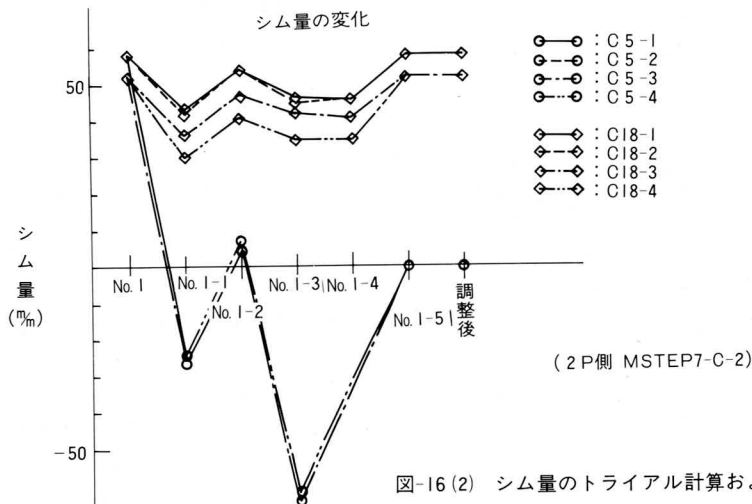
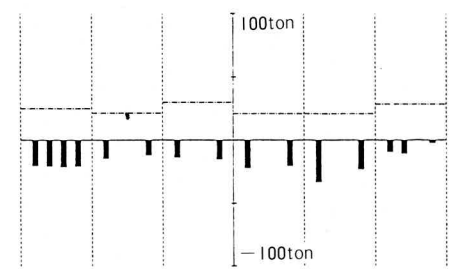
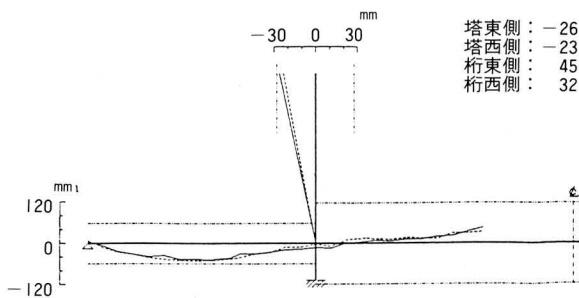


図-16(2) シム量のトライアル計算および調整結果 (その2)

6. あとがき

現在(61年9月)、架設ステップが途中の段階である。今後、架設が終了し、システムの結果が出揃った段階で、各種データの報告をしたいと思います。

途中の段階ではありますが、ここまでで判ったことは、本システムを櫃石島橋のようなマルチケーブル型の長大斜張橋で使用することは、充分メリットがあると思われる。

しかし、ケーブル段数の少ない、それほど規模の大きくない斜張橋にまで、リアルタイムの管理システムを使用することは、経済性からも、また良い精度を確保する面からも、必要かどうか疑問である。

本報告が、今後の資料として、何らかの役に立てば幸いである。

最後に、本業務は本州四国連絡橋公団第二建設局児島工事事務所第五工事、第三工事の指導のもとに、櫃石島橋上部工共同企業体が行なったことを記します。

<参考文献>

- 1) 櫃石島橋上部工共同企業体：櫃石島橋上部工架設精度管理要領書、昭和61年3月
- 2) 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、土木学会論文報告集 第294号、1980年2月

グラビア写真説明

小谷大橋

小谷大橋は昭和62年8月暫定開港が予定される新青森空港へのアクセス道にある。青森市と弘前市を結ぶ幹線道路青森浪岡線の改築にともない、この道路は整備を急いでいた。長さ1.7kmが有料事業として施工され、その中にある本橋は青森県道路公社より昭和60年2月に製作が発注され、昭和61年12月に架設完了をみた。(製作竣工60年12月)本橋は新青森空港の玄関口に位置し橋長302m幅員10m総重量1298t、型式は3径間連続鋼鈹桁と逆ローゼ桁であり各1連で構成されている。この逆ローゼ桁は空港の雨水排水用の調整池をとまたぎするため、支間が150mあり、大規模な橋である。青森の空の玄関口に、池上を飾る美しいアーチ桁は、空港を訪れる人々の心をなごませてくれるものと思う。そればかりでなく地域発展に役立つ、文字通り橋渡しの役目を近い将来果してくれることを期待している。(斉藤)

江戸川橋梁

本橋は、鋼床版複線下路トラス橋であるが、従来の鋼床版下路トラス橋に比べて、床組の取付け構造に特徴がある。架設工法は、最初の第1スパンはベント架設で、あとの6スパンは、トラベラークレーンによるキャンチレバー架設工法で施工された。

鋼床版に、架設時応力(主構作用)が残ることを防ぐために、鋼床版と縦桁・横桁の継手の高力ボルト孔に余裕をもたせて製作し、キャンチレバー架設時には、仮ボルト接合とし、主構が単純支持となった時点で高力ボルトの本締めを施工した。架設時に上記の効果を確認するために応力測定を行った。また高力ボルトの耐力についても試験により確認されている。(田中)