

【論文・報告】

# 本州四国連絡橋・櫃石島橋の 架設精度管理と架設時振動試験

Accuracy Control and Vibration Test during Construction  
of HITSUISHIJIMA Cable-Stayed Bridge

西岡 武雄\*  
Takeo NISHIOKA

宮本 義雄\*\*  
Yoshio MIYAMOTO

片山 哲夫\*\*\*  
Tetsuo KATA YAMA

高田 英一\*\*\*\*  
Eiichi TAKATA

西 正明\*\*\*\*\*  
Masaaki NISHI

小泉 正司\*\*\*\*\*  
Masashi KOIZUMI

## 1. まえがき

斜張橋の設計では、ケーブルに任意のプレストレスを与えて、桁・塔などの応力改善が計られるが、それらはケーブルの製作長、桁・塔の製作形状寸法によって目標値に反映される。しかし、以下に述べるような要因によって各種誤差が生じることは避けられず、場合によっては設計目標値の許容限界を超えることも予測される。

- ① 死荷重、部材剛度などの計算仮定誤差
- ② ケーブル・桁・塔の製作・架設誤差
- ③ 部材温度も含む各種測定誤差

斜張橋のような高次不静定構造物では、これらの誤差によって生じる応力（ケーブル張力を含む）や変形を、できるだけ低く抑え、しかもバランス良く調整されることが大切である。

本文は、本州四国連絡橋・櫃石島橋（マルチファン型

3径間連続・道路鉄道併用斜張橋、図-1参照）<sup>2),3)</sup>の中央径間張出し架設時に採用された、精度管理手法とその管理結果について報告するものである。

なお、代表的な架設段階においては、張出し架設時の固有振動数、振動モード、および、対数減衰率の実測値を求め、理論計算結果、あるいは、既往の試験結果と対比させて、桁の耐風安定性の検証などを行ったので、その結果についても報告する。

## 2. 基本管理方針

本橋の架設手順は、まず、塔下部を大ブロック化し、大型クレーン船により一括架設した後、側径間部の桁も同様に大ブロック架設し、その後、橋上に設置したトラベラクレーンにより塔上部の架設を行った。中央径間の桁は、ケーブルを架設しながら1パネルづつ面材で張出し架設し、中央径間の中央で閉合した（図-2参照）<sup>1),3)</sup>。

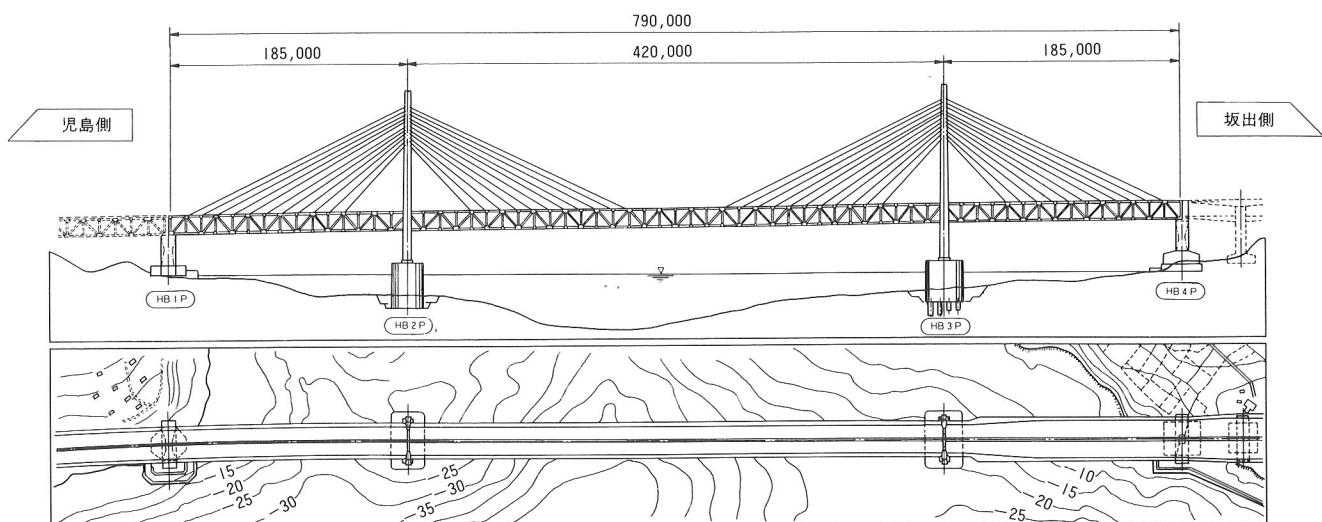


図-1 一般図

\*川田工業(株)工事本部部長 \*\*川田工業(株)富山工事部工事課課長 \*\*\*川田工業(株)技術本部設計部長 大橋課係長 \*\*\*\*川田工業(株)富山工事部工事課 \*\*\*\*\*川田工業(株)東京工事部計画課 \*\*\*\*\*川田工業(株)大阪支社設計課

中央径間の張出し架設時においては、架設精度の向上と工期短縮を目標に、下記の管理基本方針を立てた。

- ① 1架設段階ごとに、形状および張力の測定を行い、設計値（以下管理値と言）との偏差を明確にし、必要な場合にはケーブルのシム量調整を行う。
- ② 測定および調整作業は1晩で行い、架設作業のクリティカルに入れない。
- ③ 橋体の主要部分には歪ゲージを取り付け、異常な応力発生の有無を監視する。
- ④ 以上の管理を行って、桁閉合をスムースに行い、所定のプレストレスを桁に導入する。
- ⑤ 閉合後の形状・張力の調整は原則として行わない。
- ⑥ 現場にコンピュータを導入し、測定結果をリアルタイムに処理し、調整シム量の計算等が可能なシステムを構築する。

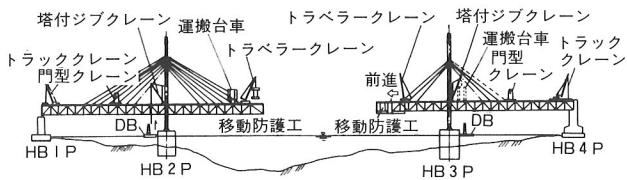


図-2 中央径間張出し架設概要図

### 3. 構造特性

本橋は道路・鉄道併用橋であり、既往の道路単独斜張橋に比べて桁剛度が極めて大きく、特に張出し架設時の挙動など、過去の事例があまり参考にならないことが予想され、種々の構造特性検討を行って、精度管理手法の細部方針を決定するものとした。

解析結果（抜粋）は、表-1および図-3に示すようであり、以下に述べるように考察し、それぞれ管理要領に反映した。

#### (1) 桁剛度の誤差影響

桁の仮定剛度に一律+5%の誤差がある場合の解析結果を、表-1のCASE-1に示す。桁剛度の誤差は、特に張出し架設時の桁先端変位量に大きく影響するため、実剛度の確認が必要である。

#### (2) 桁の死荷重誤差の影響

桁の死荷重に一律+5%の誤差がある場合の解析結果を、表-1のCASE-2に示す。死荷重誤差は、完成系においても形状・張力に大きな誤差を与えるため、死荷重の精算を綿密に行って、完成時の誤差予測値を把握しておく必要がある。

#### (3) 桁先端の載荷荷重の影響

張出し架設時の桁先端に、+100tonの集中荷重を載荷した場合が、表-1のCASE-3であり、先端荷重は形状や張力に大きく影響するため、荷重位置や強度計算は慎

重に行う必要がある。なお、表-1以外の検討結果では、側径間部の荷重影響は比較的小さいことがわかった。

#### (4) 立体構造物としての特性

中央径間架設最上段の東側ケーブルのみを、+10ton引込んだ場合の解析結果が、表-1のCASE-4である。2面ケーブルの片方のケーブル長を変更すると、構造全体がねじれるため、シム調整量の計算等は立体構造物としての取扱いが必要である。ただし、荷重の偏載については相当に大きな荷重でないかぎり、無視できる。なお、これらの解析では立体魚骨モデルを適用し、線形化有限変位理論を使用した。

#### (5) 温度応答

部材相互の温度差の影響を調べた結果が、表-1のCASE-5・6である。特に形状に与える影響が大きく、取扱い如何によっては各種誤差量の評価を誤る恐れがある。したがって、各種管理測定は部材温度の安定する夜間とし、かつ、部材温度の測定を行って、形状・張力などの測定値に対する温度補正（標準温度20°C）を精度良く行う必要がある。

#### (6) 単位シムによる応答

各架設段階の構造系において、最上段ケーブルのシム量を単位量(10mm)だけ変化させたとき、ケーブル張力や形状がどの程度変化するかを調べた。また、ケーブル余裕張力には、許容張力と設計最大張力の差や、設計時に製作・架設誤差として見込んだ余裕張力がある。これらの余裕張力に対して、シム厚の標準を50mm、変動分として±50mmを考えたときに、張力や形状をどの程度修正可能かを調べた。解析結果は図-3のようであり、以下のことがわかった。

- ① 張力+10tonにより、桁先端は1~2mm程度持ち上がる。
  - ② シム+10mmにより、当該ケーブルの張力は、15~20ton(2本ケーブル当り)程度増え、また桁先端は、1.5~3.5mm程持ち上がる。
  - ③ 桁先端変位のシム応答は、側径間より中央径間、下段より上段ケーブルの方が多少大きめであるが、全体的に鈍感である。
  - ④ 張力のシム応答は、下段ケーブルの方が敏感である。
  - ⑤ ケーブル張力の余裕は、40~120ton(2本ケーブル当り)程度である。
  - ⑥ 許容張力内でのシム挿入可能量は、20~50mm程度である。
  - ⑦ 桁先端の形状修正可能量は、5~18mm(桁先端を持ち上げる場合)である。
- 以上のように、ケーブル余裕張力と桁剛度の関係より、桁先端でもあまり大きな形状修正量は期待できない。

表-1 構造特性の検討（その1）

| 検討<br>ケース     | 架設<br>段階     | 6段目ケーブル<br>架設完了系  | 閉合直前の系   | 完成系   |
|---------------|--------------|---|--|---|
|               |              | S6 C1   | S11 C11  | S11 C11   |
| CASE-1<br>変形量 | (Ton/ケーブル1本) | 3mm<br>15mm   | 3mm<br>15mm  | 4mm<br>15mm   |
|               |              | S6 = -1 C6 = -2<br>S2 = +2 C1 = +2                          | S11 = -2 C11 = -3<br>S6 = +1 C6 = +1<br>S2 = +2 C1 = +3  | S11 = +1 C11 = ±0<br>S6 = +1 C6 = +1<br>S1 = +1 C1 = +1             |
| CASE-2<br>変形量 | (Ton/ケーブル1本) | 19<br>59  | 26<br>42   | 25<br>84  |
|               |              | S6 = +1.1 C6 = +1.2<br>S2 = +1.6 C1 = +1.1                  | S11 = +2.2 C11 = +2.2<br>S6 = +1.1 C6 = +1.1<br>S2 = +1.4 C1 = +0.9  | S11 = +1.7 C11 = +1.3<br>S6 = +1.0 C6 = +1.1<br>S1 = +1.1 C1 = +1.2 |
| CASE-3<br>変形量 | (Ton/ケーブル1本) | 67<br>40  | 38<br>227  | —   |
|               |              | S6 = +2.3 C6 = +2.4<br>S2 = +1.6 C1 = +0.8                  | S11 = +3.1 C11 = +3.4<br>S6 = +0.9 C6 = +0.9<br>S2 = +0.4 C1 = -0.3  | —   |
| CASE-4<br>変形量 | (Ton/ケーブル1本) | 東側: -0.5<br>西側: +0.5<br>S2 = +1.0<br>C6 = +5.0<br>C1 = -2.0 | (東側) S11 = +0.5<br>S10 = +0.5<br>S2 = ±0<br>C11 = +5.0<br>C10 = -1.0<br>C1 = -0.5<br>(西側) S11 = +0.5<br>S10 = +0.5<br>S2 = ±0<br>C11 = ±0<br>C10 = ±0<br>C1 = -1.0 | —   |
|               |              | S6 = ±0.5 C6 = ±0.5<br>S2 = ±1.0 C1 = -1.0                  | S6 = ±0.5 C6 = ±0.5<br>S2 = ±1.0 C1 = -0.5   | —   |
| CASE-5<br>変形量 | (Ton/ケーブル1本) | 47<br>52  | 13<br>32   | 22<br>90  |
|               |              | S6 = +1.2 C6 = +1.3<br>S2 = +3 C1 = +3                      | S11 = +1.6 C11 = +1.3<br>S6 = +1 C6 = +1<br>S2 = -5 C1 = -1  | S11 = +1.0 C11 = +6<br>S6 = ±0 C6 = +1<br>S1 = -2 C1 = -2           |
| CASE-6<br>変形量 | (Ton/ケーブル1本) | 18<br>7   | 26<br>10   | 20<br>70  |
|               |              | S6 = -4 C6 = -4<br>S2 = -7 C1 = -6                          | S11 = -3 C11 = -3<br>S6 = -2 C6 = -1<br>S2 = -5 C1 = -5  | S11 = -6 C11 = -8<br>S6 = -2 C6 = -2<br>S1 = -5 C1 = -4             |

#### 4. 精度管理要領

精度管理フローを図-4に示す。

##### (1) 管理項目と許容値

管理項目は、桁・塔の形状とケーブル張力の3種類とした。許容値を表-2に示す。

エンドリンク、タワーリンクおよび、主構上下弦材の代表部分や塔基部には歪ゲージを取り付け、応力測定を行うものとしたが、これらは有害な応力発生を監視するために利用し、直接的な管理項目とはしなかった。

また、部材温度を測定し、形状・張力などの測定値を温度補正するために、東西主構上下弦材および鋼床版下面の代表部分、塔柱南北面、ダミーケーブルに温度センサーを取付けた。

##### (2) シム量について

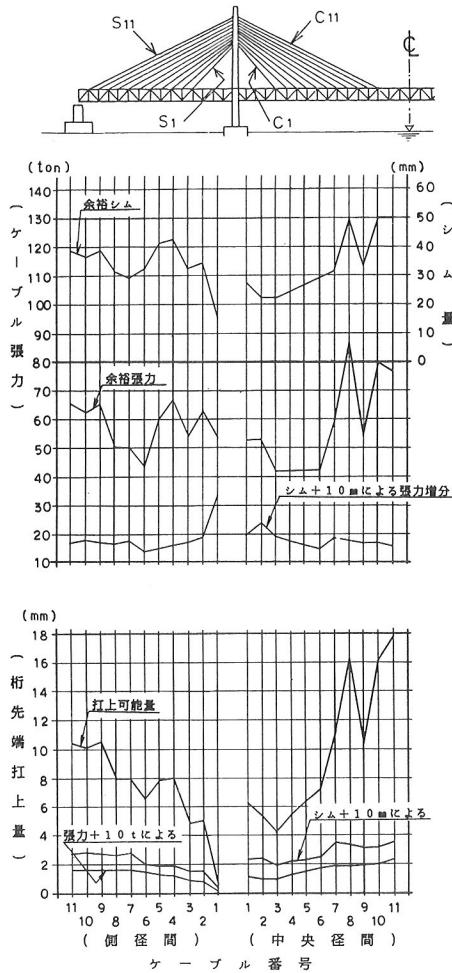


図-3 構造特性の検討（その2）

表-2 管理項目と許容値

| 管理項目                 | 許容値   | 備考                                  |
|----------------------|---|-------------------------------------|
| 桁キャンバー               | 1P~2P; ±59mm<br>2P~3P; ±118mm<br>3P~4P; ±59mm | ±125±0.25(L=50)<br>(mm)<br>L: 支間(m) |
| 塔の倒れ                 | 2P; ±28mm<br>3P; ±29mm                        | H/5000 (mm)<br>H: 塔高 (mm)           |
| ケーブル張力<br>(2ケーブルあたり) | 2P; +41.8~+124.4t<br>3P; +38.9~+109.1t        | 製作・架設誤差張力(SD+E)<br>と余裕張力の和          |

ケーブルは塔側定着点においてジャッキで引込み、シムプレートを挿入して定着される。シムの厚さは標準(設計値)で50mmであり、構造上は-50mm~約+150mmの調整が可能である。

シム厚は、以下に述べる段階および手順によって決定するものとした。

- ① 桁・塔およびケーブルの製作情報を基に、標準シム厚を変更( $T_1 = 44\sim 67\text{mm}$ )したものを作成した。
- ② ケーブル定着時に挿入するシム量を1次シム量(原則的には $T_1$ )とした。
- ③ 夜間の測定結果に基づいて計算されたシム調整量を2次シム調整量とした。

なお、シム厚の構成は、20, 9, 6mmの組合せとした。

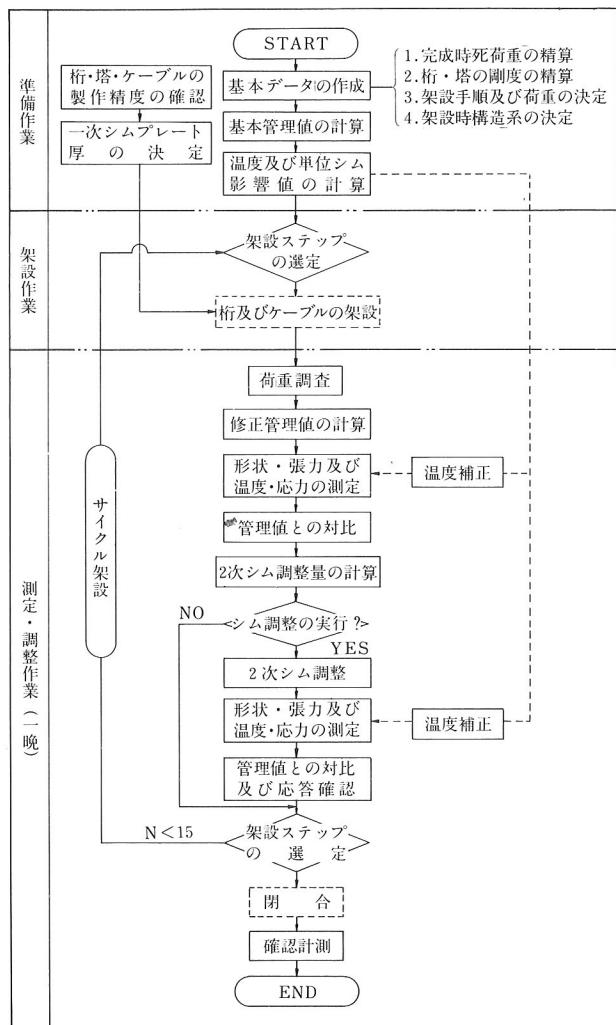


図-4 精度管理フロー

### (3) ケーブルの調整本数

各架設段階ごとにシム調整により誤差修正を行うが、誤差量の程度によっては、多段ケーブルを調整することも考えられる。しかし、測定・調整作業を1晩で終了し、架設工程の支障にならないこととしたため、時間工程より最上段ケーブル8本までの調整とした。

#### (4) ケーブル張力の測定本数

測定項目（形状・張力・温度・応力）の中では、張力測定が最も測定時間が長くなることが予測された。各架設段階ごとに、それまでに架設された全てのケーブルについて、張力を測定するのが最善であるが、時間の制約から合計16本（最上段全8本、その下2段の外側ケーブル8本）とした。これらは最上段ケーブルのシム調整の張力への影響は、上3段までが比較的大きいと言う構造特性の検討結果より採用した。

## (5) 管理システムおよび適用例

これらは文献 4) を参照されたい。

## 5. 各種試驗結果

設計で仮定した荷重や剛度の確認および、各種管理方

針に対する実橋の応答を検証するために、種々の実橋試験を行った。結果を以下に要約する。

### (1) 衍剛度の確認

側径間部の桁架設完了後に、桁形状の測定や振動試験を行い、桁の剛度は主構格点のガセット、二次部材および付属物等の影響により、設計値より約5%大きいことを確認し、本管理システムの管理値計算に反映した。

## (2) 重量（荷重）の計算精度

側径間部の桁大ブロック浜出し、および架設時に、大型クレーン船の荷重計を利用して、荷重計算精度の検証を行った。その結果 1~2% 程度の誤差で計算できることを確認した。

### (3) 振動法によるケーブル張力の測定

ケーブル張力の測定には振動法を採用したが、その妥当性を検証するためにジャッキの油圧と比較した。その結果、本橋のケーブルでは $2.5\sim3.0\%$ 程度の誤差があり、振動法の計算張力の方が大きく算出されることを確認した。

#### (4) 橋体のシム応答

下段ケーブルの架設時張力（引込み力）は大きく、予め長く製作したケーブルを架設・定着し、その上段ケーブルを架設することにより、下段ケーブルの張力を減少させてから再引込みを行い、所定のシムを挿入して張力を導入した。橋体のシム応答は、この再引込み時に測定し、桁・塔の形状変化および張力変化は理論値と良く一致し、解析方法や各種測定方法、並びに全体の管理手法の妥当性を確認した。

## (5) 橋体の荷重応答

中央径間架設先端に設置されたトラベラクレーンと移動防護工の移動およびトラベラクレーンのブーム旋回を行い、載荷荷重を変動させ、橋体の荷重応答を調べた。その結果、荷重変動の大きいトラベラクレーンの移動時で、荷重応答は比較的良好であることを確認した。

しかし、桁の剛度に比べて試験荷重が小さいこと、試験は日中（荷重変動作業のための夜間照明による船舶への影響や騒音に配慮して）に実施したことなどにより、温度の影響が大きく、測定値の評価が難しかった。

## (6) 測定精度について

桁形状の測定は水管式水準測量、塔の倒れ測定にはレーザーセオドライト、ケーブル張力の測定では振動法をそれぞれ採用した<sup>4)</sup>。これらの測定精度を温度測定誤差(温度補正量の誤差)も含めて種々検討し、本システムにおける測定最大誤差量は、ほぼ表-3に示すように考え、管理方針に反映した。具体的には桁先端および塔の形状誤差が管理値に対して±10mm以上であればシム調整を行うものとし、それ以内であればケーブル張力の誤差が大きくない限り、調整は行わないものとした。

表-3 測定誤差量(最大値)  
(mm, ton)

| 測定項目      | 測定最大誤差量 |
|-----------|---------|
| 桁先端の形状測定  | ± 10    |
| 側径間の桁形状測定 | ± 5     |
| 塔頂の水平変位測定 | ± 10    |
| ケーブル張力の測定 | ± 5     |

## 6. 管理経緯および管理結果

### (1) 管理経緯

昭和61年4月より開始したケーブル架設は、約5ヶ月半後の9月中旬に176本全てを架設完了し、9月25日には桁の閉合を終えた。この間、架設のサイクルに合わせて測定およびケーブルのシム量の調整を積み重ね、各種誤差の修正を行った。9月26日夜間には閉合後の測定を行い、管理項目（張力、桁・塔の形状）と許容値に対して特に問題がないことを、応力測定結果も踏えて確認し、一連の管理作業を終了した。

張出し架設当初における桁先端の形状誤差量は、2P桁先端で約80mm、3P側先端で約40mm、何れも上がりぎみの誤差であった。このとき、塔の倒れ誤差は、2Pで東西共に側径間側に約80mm、3Pの場合は、±20mm程度で東西の塔がねじれていた。また、ケーブル張力は側径間側、中央径間側を問わず管理値に比べて5～15%の張力減であった。

以上のように、当初予想よりも誤差が大きかったため、2P側ではケーブル3段目、3P側では2段目まで誤差の推移を追跡するものとし、この間に前記試験等を行って各種データーを収集した。

実際のシム調整の開始は、2P側ではケーブル4段目、3P側3段目で行い、この時点では、それまでの未調整の下段ケーブルを含めた多段ケーブルを対象にシムトライアルを行い、決定された調整シム量を施工した。その後は計画通りに架設サイクルごとの測定・調整を実施した。なお、調整シム量の判断基準は、以下の通りとした。

- ① 特に鉄道併用橋であり、列車の走行性に着目し、桁形状誤差の改善に努めた。
- ② 桁閉合をスムースに行い、桁に所定のプレストレスを導入すべく、2P側、3P側の桁キャンバーができるだけ対称となるように努めた。
- ③ ねじれ誤差は、桁のねじれ剛性が大きいことから、改善することは極めて難しく、このため東西のケーブル張力のアンバランスが目立たない範囲での改善とした。
- ④ ケーブル張力の測定は、各架設段階で最上段から3段までにとどめているために、それより下段のケーブル張力については、計算上で追跡することになる。このため管理値を上回る張力誤差の限界は、余裕張力の50%を目安にして調整し、多少余裕を残す

ものとした。なお、管理値を下回る張力誤差量は、上限の余裕張力と同程度を目安にした。

- ⑤ 塔は比較的敏感に応答するが、誤差が累積すると、他の管理項目（張力・桁形状）との兼ね合いもあり、改善が容易ではなくなるのでその都度倒れ、ねじれともに改善に努めた。
- ⑥ 1架設サイクルごとに、全ての管理項目に対して誤差量を改善し、満足できる結果を得ることは難しく、常に残りサイクル数（調整回数）を意識して、その段階での調整量を判断した。

表-4に、測定およびシム調整の時間工程の実績を示す。

表-4 時間工程の実績

| 作業項目             | 時刻 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 0 | 2 | 4 |
|------------------|----|----|----|----|----|----|---|---|---|
| 荷重調査             |    | ■  | ■  |    |    |    |   |   |   |
| 修正管理値の計算         |    |    |    | ■  |    |    |   |   |   |
| 桁及び塔の形状測定        |    |    |    |    | ■  |    |   |   |   |
| ケーブル張力の測定        |    |    |    |    | ■  | ■  |   |   |   |
| 管理値との対比及びシムトライアル |    |    |    |    |    | ■  | ■ |   |   |
| シム調整             |    |    |    |    |    |    | ■ | ■ |   |
| 桁及び塔の形状測定        |    |    |    |    |    |    |   | ■ |   |
| ケーブル張力の測定        |    |    |    |    |    |    |   | ■ | ■ |
| 管理値との対比及び応答確認    |    |    |    |    |    |    |   |   | ■ |

### (2) 調整結果

図-5に桁先端の形状誤差の測定結果を、表-5には2P側桁先端形状に着目した調整量の予測値と応答結果を示す。図-5より、2P側桁先端の形状誤差は当初より大きく、しかも架設段階が進むにつれて増加傾向となった。最初のシム調整を実施した、MSTEP 4-C-2では、113mmあった誤差量を、53mmにまで修正したものであったが、その後も上がりぎみの傾向をたどった。しかし、調整を重ねることにより、閉合直前には3P側の誤差と同程度まで修正することができた。

一方、3P側の桁先端の形状誤差量は2P側に比べて小さく、±40mm程度で推移した。したがって2P側では桁先端を下げるための調整が主であったのに対して、3P側では誤差の累積を避け、常に現状維持に努めるような調整であった。

なお、表-5に示すように、桁先端の形状修正に対するシム応答は非常に良好であった。

### (3) 桁閉合時の形状等測定結果

中央径間の張出し架設時に行った測定および調整作業の成果は、桁閉合時に全て現われる。このため一連の閉合作業の重要なポイントにおいて各種測定を行って、作業手順の確認および、安全性の確認を行うとともに、架

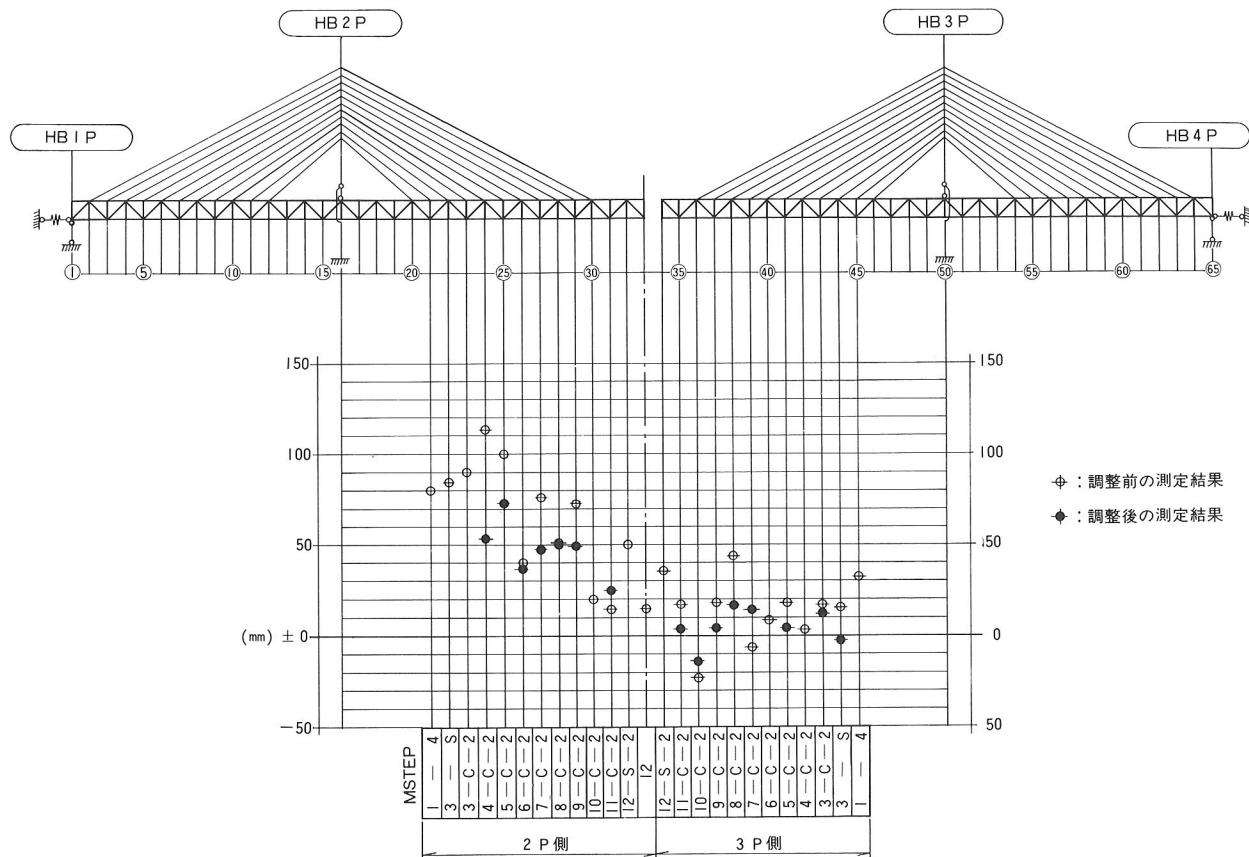


図-5 桁先端形状誤差の推移

表-5 桁先端の形状調整(変化量)結果(2P側)  
(mm)

|        | 応答予測値 |      | 応答結果 |      | 応答誤差 |     |
|--------|-------|------|------|------|------|-----|
|        | 東主構   | 西主構  | 東主構  | 西主構  | 東主構  | 西主構 |
| 4-C-2  | -51   | -53  | -60  | -64  | -9   | -11 |
| 5-C-2  | -28   | -28  | -27  | -28  | +1   | ±0  |
| 6-C-2  | -8    | -9   | -2   | -2   | +6   | +7  |
| 7-C-2  | -28   | -28  | -31  | -30  | -3   | -2  |
| 8-C-2  | -1    | -5   | ±0   | ±0   | +1   | +5  |
| 9-C-2  | -31   | -33  | -24  | -29  | +7   | +4  |
| 11-C-2 | +7    | +9   | +10  | +7   | +3   | -2  |
| 合 計    | -140  | -147 | -134 | -146 | +6   | +1  |

設精度の確認を行った。結果は以下に述べる通りである。

- ① 閉合部材を架設した段階での、閉合点における主構上下弦材の相対高さ誤差は、上弦材東側5mm、西側24mm、下弦材東側7mm、西側15mmであった。
- ② 閉合点の平面ズレ（橋軸線の相対差）は約20mmであり、ズレ修正のための特別な設備は必要としなかった。
- ③ 閉合のための荷重調整（トラベラクレーンの移動）は、全て計画通りに実施できた。
- ④ 下弦材の引込み力（閉合力）はN=330ton/片主構当たりであり、設計値通りのプレストレスを桁に導入した。

#### (4) 閉合後の確認測定（管理結果）

桁閉合後の形状および張力の測定結果（誤差）を図-6に示す。桁形状誤差は、1P～2Pの側径間で約50mm、

3P～4Pが45mm程度で何れも下がりぎみの誤差であり、中央径間の誤差は±20mm程度であった。

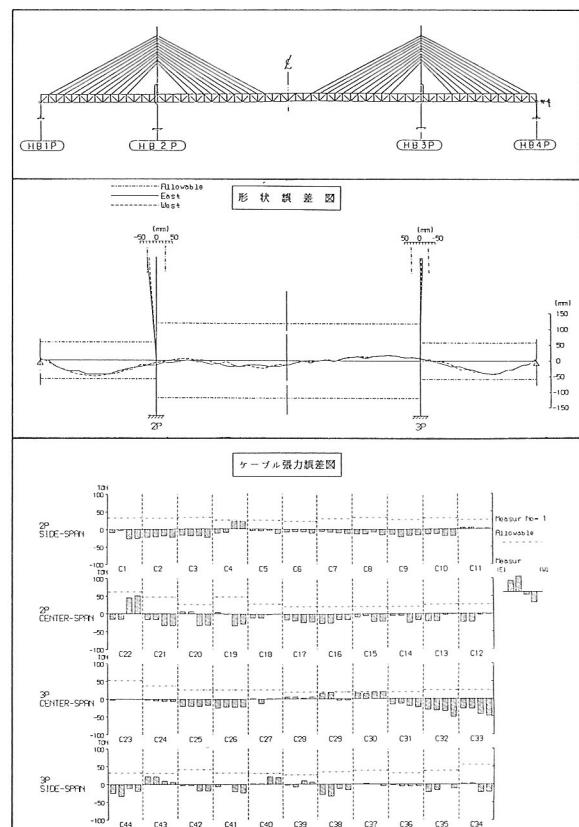


図-6 閉合後の測定結果

図-6によると、側径間の誤差が目立つが、中央径間だけの張出し架設を行う場合には、架設完了した側径間の桁剛性が大きいため、側径間の桁形状を修正することは極めて難しく、積極的に誤差改善に努めることができなかつた結果である。

当初誤差の大きかった2P塔の形状も許容値内となり、また3P塔にはほとんど誤差がなくなった。

ケーブル張力では、許容誤差張力の上限値を超したものはない。誤差比率は176本のケーブルのうち数本については10%程度のものもあるが、形状修正を主体にした管理であったにもかかわらず、結果として全体平均4.9%（完成時死荷重張力に対する比率）の誤差張力であった。

なお、図-6に示す誤差張力が、完成時まで残留するものと考えて、桁・塔などの主要部材に生ずる応力度を照査し、問題となるような作用力は生じないことを確認した。

## 7. 架設精度管理の考察

本橋で採用した張出し架設時架設精度管理手法は、製作・仮組み立て段階で把握できなかつた各種誤差を、架設誤差も含めて1架設段階毎に遂時修正し、誤差の累積を避け、理想的な閉合状態を得ることを目標としたものである。張出し架設当初には2P側の桁先端形状誤差は80mm、3P側が40mmであり、特に2P側については架設の進行につれて誤差量も累積し、最大113mmとなつた。これらを塔の形状やケーブル張力の誤差量も含めて、架設段階毎にシム調整を重ね、誤差量の改善に努めることにより、閉合前には2P側15mm、3P側40mm程度にまで改善された。

この結果、閉合作業では荷重調整も計画通りに実施され、所定のプレストレスを桁に導入することができた。

また、主要な部材の応力についても常に監視したため、架設時に大きな作用力が生じる場合の安全性が確認された。

架設段階ごとの精度管理を実施することにより、以上のように大きな問題発生もなく、中央径間の桁および、ケーブル架設は無事終了し、当初の管理目標を充分に達成された。

本橋は、道路・鉄道併用橋であり、斜張橋としては過去にあまり例を見ない桁剛度の大きな構造である。管理手法の計画当初には、

- ① 桁上弦材と鋼床版が一体となった合成構造<sup>2)</sup>であり、桁剛度の評価が難しい。
- ② 桁剛度が大きいために、ケーブルシム量の変化（シム調整）に対応する桁変位量が小さく、ケーブル余裕張力との関連から、桁・塔の形状修正に大きな期待ができない。

③ 船舶航行の頻繁な海上での工事であり、測定・調整作業に必要な充分な照明が確保できない。

などの問題が提起され、多少不安を残して着手したものであったが、管理結果は充分な精度が得られ、工期短縮の一翼を担つたと同時に、システム実体の実用性を確認できた。

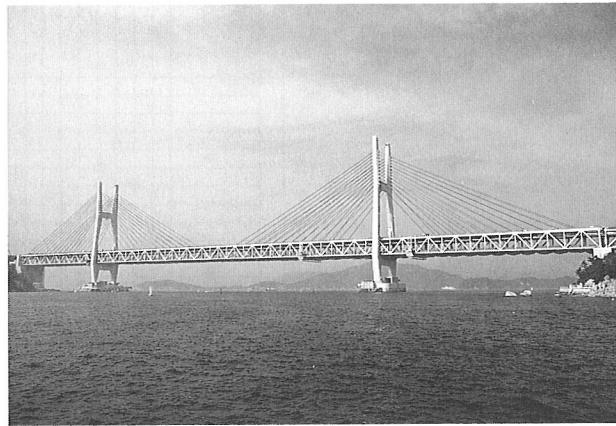


写真-1 塔足場撤去後の櫃石島橋

## 8. 架設時振動試験

本振動試験は、架設精度管理システム用の加速度計を併用したことにより測定チャンネル数が限定され、また、通常の架設作業と架設精度管理計測の間隙を縫つて測定を行わなければならないなどの種々の制約下で実施したものである。さらに、加振方法についても、自然風の他、各種の現場架設用クレーン、運搬用移動台車、トラック、および作業員40名による飛びはねなどにより加振し、起振機などの特別の機器は使用していない。したがつて、本試験は簡易測定の域を脱していないが、以下に報告するように、当初の目的を十分満足する成果が得られた。

### (1) 試験目的

本振動試験の目的は、代表的な架設段階における固有振動数、周期、モード、および、対数減衰率の実測値を求め、理論計算結果、あるいは、既往の試験結果と対比させて、主に主構トラスの耐風安定性について検討することである。

### (2) 試験方法

試験対象架設段階と振動加速度測定位置を図-7に示す。これらの架設段階において前述した加振方法により加振し、それにより発生した振動加速度を加速度計で測定した。計測は、各架設段階ごとに数ケースずつ実施した。これらのうち解析は、現場において予備解析を行い、その結果から比較的良好な記録が得られたと判断されたケースについて行った。

データ解析方法は、測定された加速度よりスペクトル解析を行い、パワースペクトル密度、フーリエスペクト

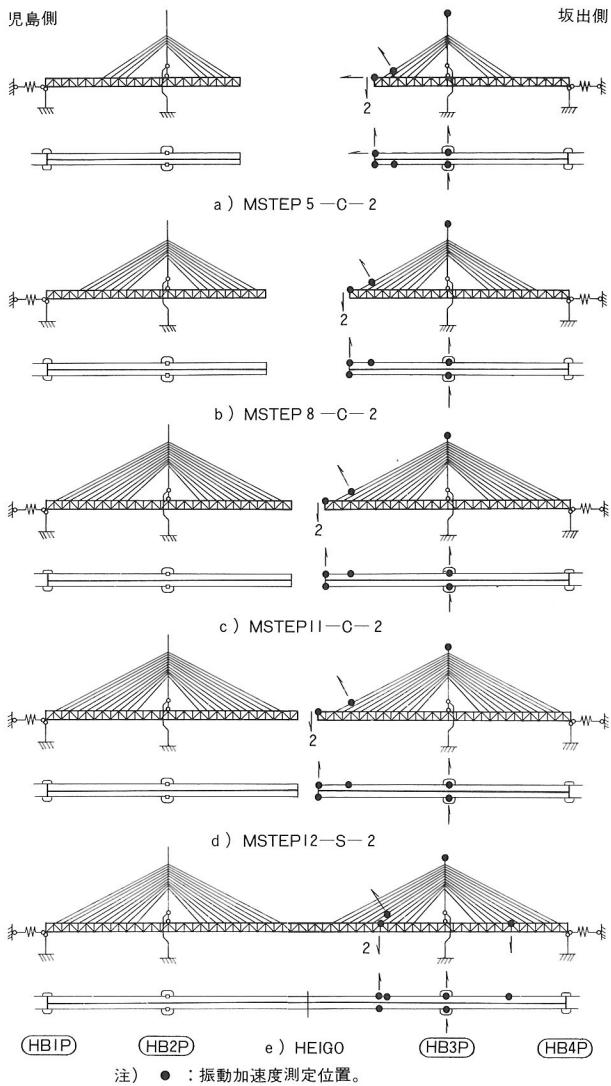


図-7 試験対象架設段階および振動加速度測定位置

ル、位相スペクトル等の各種スペクトルを算出し、これらの値より共振振動数と対数減衰率、および、共振振動モードの実測値を求めた。

### (3) 試験結果とその考察

#### a) 測定結果と理論計算値との比較

各架設段階での共振振動数と対数減衰率の測定結果と、立体骨組モデルに適用して固有振動解析計算の計算値を含めて表-6に示す。測定結果の共振振動数については各モードごとの平均値、対数減衰率については平均値と範囲を示している。

各架設段階での共振振動数は、どの架設段階においても測定値のバラツキが非常に少なく安定していた。したがって、これらの測定値の平均値が固有振動数であると考えられる。固有振動数の測定値と計算値を比較すると、測定値が計算値を下回るもののが若干見受けられるものの、測定値と計算値とは大きな差異はなかった。架設段階に伴う固有振動数の変化の傾向も良く一致しているこ

表-6 振動数の測定値と計算値の比較と対数減衰率の測定値

| 架設段階            | 振動モード     | 振動数 (Hz) |       |         | 対数減衰率(測定値) |             |
|-----------------|-----------|----------|-------|---------|------------|-------------|
|                 |           | 測定値      | 計算値   | 測定値/計算値 | 平均         | 範囲          |
| MSTEP<br>5-C-2  | H 1       | 0.355    | 0.582 | 0.61    | 0.057      | 0.059~0.056 |
|                 | V 1       | 0.488    | 0.465 | 1.05    | 0.045      | 0.060~0.035 |
|                 | TO1       | 0.776    | 0.704 | 1.10    | 0.028      | 0.031~0.025 |
|                 | H 2       | 1.050    | 1.124 | 0.93    | 0.015      | 0.016~0.015 |
|                 | V 2 (未確認) | 1.221    | —     | —       | —          | —           |
|                 | T 1       | 1.476    | 1.229 | 1.20    | 0.033      | 0.041~0.025 |
| MSTEP<br>8-C-2  | H 1       | 0.316    | 0.402 | 0.79    | —          | —           |
|                 | V 1       | 0.438    | 0.420 | 1.04    | —          | —           |
|                 | TO1       | 0.773    | 0.676 | 1.14    | 0.024      | 0.035~0.020 |
|                 | H 2 (未確認) | 1.099    | —     | —       | —          | —           |
|                 | V 2       | “        | 1.128 | —       | —          | —           |
|                 | T 1       | 1.447    | 1.136 | 1.27    | 0.013      | 0.014~0.013 |
| MSTEP<br>11-C-2 | H 1       | 0.308    | 0.294 | 1.05    | —          | —           |
|                 | V 1       | 0.410    | 0.407 | 1.01    | —          | —           |
|                 | TO1       | 0.772    | 0.647 | 1.19    | 0.020      | 0.021~0.020 |
|                 | H 2 (未確認) | 1.070    | —     | —       | —          | —           |
|                 | V 2       | “        | 1.001 | —       | —          | —           |
|                 | T 1       | 0.840    | 0.972 | 0.86    | 0.021      | 0.044~0.019 |
| MSTEP<br>12-S-2 | H 1       | 0.283    | 0.270 | 1.05    | 0.055      | 0.061~0.045 |
|                 | V 1       | 0.390    | 0.373 | 1.05    | 0.047      | 0.047       |
|                 | TO1       | 0.762    | 0.644 | 1.18    | 0.021      | 0.021~0.020 |
|                 | H 2 (未確認) | 1.057    | —     | —       | —          | —           |
|                 | V 2       | “        | 0.952 | —       | —          | —           |
|                 | T 1       | 0.883    | 0.919 | 0.96    | —          | —           |
| HEIGO           | H 1       | 0.407    | 0.406 | 1.00    | 0.050      | 0.050       |
|                 | V 1       | 0.463    | 0.443 | 1.05    | 0.041      | 0.041       |
|                 | TO1       | 0.772    | 0.643 | 1.20    | —          | —           |
|                 | H 2 (未確認) | 0.755    | —     | —       | —          | —           |
|                 | V 2       | “        | 1.114 | —       | —          | —           |
|                 | T 1       | 1.065    | 0.915 | 1.16    | 0.019      | 0.019       |

注) H 1 : 水平曲げ 1 次振動 V 1 : 鉛直曲げ 1 次振動  
 TO1 : 塔面内曲げ 1 次振動 H 2 : 水平曲げ 2 次振動  
 V 2 : 鉛直曲げ 2 次振動 T 1 : ねじれ 1 次振動  
 対数減衰率の空白は、パワースペクトルのピークが小さく算定ができない場合を示す。

とから、ほぼ妥当な値が得られたものと考えられる。

振動モードは、測定値と計算値が良く一致していた。

対数減衰率は、測定値のバラツキが比較的少なく安定しており、良好な結果が得られた。

また、今回の測定の特徴としては、ケーブル振動の桁や塔への連成振動が受けられたことである。この一例を図-8に示す。これらの図から、特にねじれ 1 次振動に対応するピーク付近に生じる数個のピーク量の相対的な大小は、加振方法の異なる 3 種類の場合の測定では微妙に変化していることが分かった。

これを、鎖状ケーブル計算モデルを用いて主桁のねじれ 1 次振動と 2 段目のケーブルの 2 次（逆対称 1 次）振動の連成に着目して、理論計算により求めた固有振動数を表-7に、固有振動モードの図化結果を図-9に示す。これらの図より、ケーブル振動と主桁および塔の振動が連成する場合には、その影響を配慮して対数減衰率を求める必要があることが分った。

#### b) 主構トラスの耐風安定性について

今回測定された固有振動数、対数減衰率をもとに、岩黒島橋主構トラス風洞実験結果<sup>7)</sup>を参考にして、本橋の耐風安定性について検討した結果が、表-8のとおりで

ある。この結果より、風洞実験は一様流状態であること、実橋と模型との差異などから直接対比はできないものの、HEIGO段階を始めとして、たわみやねじれの限定振動発振風速、ねじれ発散振動発振風速は、岩黒島橋の風洞模型実験から予想されるそれらの値と比べ、ほぼ同程度か若干上回ることが推定された。

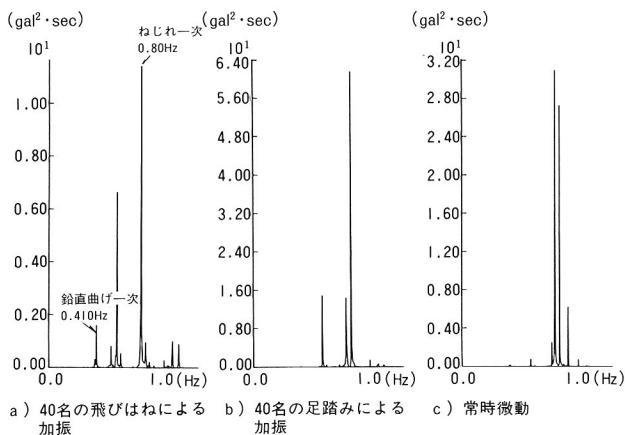


図-8 ケーブル振動の桁や塔への連成(MSTEP11-C-2)

表-7 主桁のねじれ1次振動に着目した固有振動数の計算結果(MSTEP11-C-2)

| No. | 振動状況                        | 振動数    |
|-----|-----------------------------|--------|
| 1   | ケーブルと主桁の連成振動 <sup>(注)</sup> | 0.9704 |
| 2   | ケーブル振動のみ                    | 0.9767 |
| 3   | "                           | 0.9769 |
| 4   | "                           | 0.9770 |
| 5   | "                           | 0.9770 |
| 6   | "                           | 0.9770 |
| 7   | "                           | 0.9770 |
| 8   | "                           | 0.9783 |
| 9   | ケーブルと主桁の連成振動                | 0.9932 |

注) : 4本のストランドの2次振動が組合わされている。

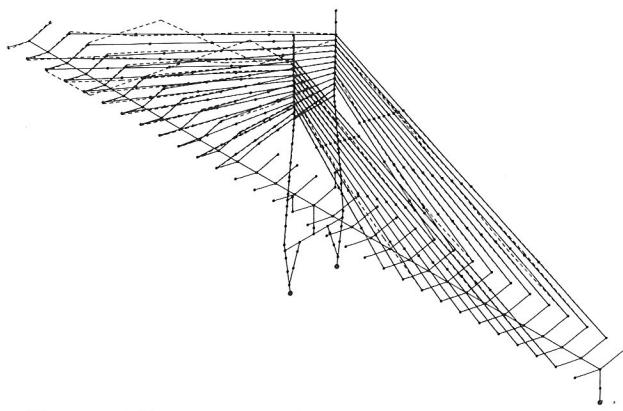


図-9 主桁のねじれ1次振動と2段目ケーブルの2次振動の一例(MSTEP11-C-2)

表-8 各架設段階の限定振動、発散振動発振風速(推定)

| 振動形態 | 項目           | 架設段階      |           |           |           |           |
|------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      |              | 5-C-2     | 8-C-2     | 11-C-2    | 12-S-2    | HEIGO     |
| たわみ  | 振動数(Hz)      | 0.488     | 0.438     | 0.410     | 0.390     | 0.463     |
|      | 限定期振動発振風速(%) | 21.4~31.1 | 19.2~27.9 | 17.9~26.1 | 17.1~24.9 | 20.3~29.5 |
| ねじれ  | 振動数(Hz)      | 1.476     | 1.447     | 0.840     | 0.883     | 1.065     |
|      | 発振風速(限定期)    | 50.5~59.0 | 49.0~57.3 | 27.9~32.6 | 29.3~34.2 | 35.3~41.3 |
|      | (m/S) 発散     | 149.6     | 146.6     | 85.1      | 89.5      | 107.9     |

## 9. あとがき

櫃石島橋は、昭和62年9月末日現在、架設用の下面ネットが撤去され、道路部の舗装および下路部の鉄道レール敷設工事が進められており、今後、完成系での振動試験や列車走行試験を経て、63年3月には完成する予定である。

本文は、斜張橋の張出し架設時の精度管理手法と管理結果および架設時の振動試験結果を報告したものであり、今後の各種架橋工事の参考になれば幸いである。

なお、本橋の張出し架設を中心とした工事報告については、次回に報告する予定である。

最後に、本工事の施工に当たり御指導を賜わった本四公団児島工事々務所第5工事、第3工事の方々並びに共同企業体のメンバーである三菱重工業株、日本鋼管株、株宮地鐵工所、日本橋梁株の関係各位に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団編：櫃石島橋上部工架設工事・応力等測定工事報告書、1987.
- 2) 西岡・片山・小泉：本州四国連絡橋・櫃石島橋の製作設計、川田技報、Vol.5, 1986.
- 3) 原・西岡・高田・宮本・片山・多田：本州四国連絡橋・櫃石島橋製作及び桁大ブロック架設、川田技報、Vol.6, 1987.
- 4) 西岡・片山・内海・前田・町田・越後：本四斜張橋櫃石島橋の面材架設時施工管理システムの開発、川田技報、Vol.6, 1987.
- 5) 金沢・佐藤・武山：櫃石島橋の形状管理、本四技報、No.42, 1987.
- 6) 金沢：櫃石島橋上部工の架設、土木技術、Vol.42, No.7, 1987.
- 7) 本州四国連絡橋公団第二建設局、三菱重工業株式会社：岩黒島橋（斜張橋）主構トラス大型風洞実験（その2）、（その3）、昭和56年2月。