

「名港中央大橋」の架設精度管理

川上 剛 司 機械鉄構事業本部橋梁事業部基本計画部
中村 善彦 機械鉄構事業本部橋梁事業部建設部

Accuracy Control System for Erection of “Meiko Central Bridge”

KAWAKAMI Takeshi
NAKAMURA Yoshihiko

“Meiko Central Bridge” is a 1 170 m long cable-stayed type bridge with a central span of 590 m and 3-span continuous steel box girder. The suspension cables are the double plane and 17 step type. In the construction of the bridge, an accuracy control system was used to provide the designed displacement profile and cable tension (force) for each step. The system consists of two basic systems: an analysis system using EWS and a personal computer and an automatic measurement system for measuring and collecting data. This allows integrated data processing for accurate erection work. The outline of the system and application to the erection work, and its results are described.

キーワード：斜張橋，架設精度管理，形状管理，自動計測システム，誤差，ケーブル張力，ケーブル振動，連通管，balancing架設，名港中央大橋

1. 緒 言

「名港中央大橋」は中央径間590 m (橋長1 170 m)，2面17段のケーブル配置をもつ国内最大級の鋼斜張橋である(第1図)。石播・日車・トピー共同企業体は本橋のうち東側の主桁・ケーブルの設計・製作・架設を担当した。本工区は、航路制限により海上にベントを設けることができないため側径間の閉合まで中央・側径間の両側の桁をバランスさせながら張り出し架設を行うbalancing架設工法が採用された。一般的に斜張橋はケーブルプレストレスを変えらることによって塔や桁の形状、部材力を変えることができることから、この構造特性を利用して設計段階において力学上合理的に



第1図 「名港中央大橋」
Fig. 1 “Meiko central bridge”

かつ経済性を考慮し、最適プレストレスが設定されている。しかし、設計・製作・架設の各段階で精度の向上を図っても、設計時に想定した主ケーブル張力・主桁および塔の完成時出来形形状や応力状態の所要値に対して誤差をもった結果となることは避けられず、最終工程の架設段階でいかに精度を確保するかが重要となる。近年、斜張橋の架設時の形状管理では、計測時の人的ミスをなくし、測定時間を短縮する目的で精度管理システムが用いられている。当社においても本工事をターゲットとして精度管理システムが開発された⁽¹⁾。これは、EWSとパソコンによる解析システムと各種計測センサー類により、測定からデータ採取まですべて自動化された測定システムを組み合わせた一括集中管理システムである。ここでは、本橋の出来形結果を踏まえて精度管理システムの使用例を紹介し、実施に際しての改良点を述べることにする。

2. 精度管理要領

2.1 精度管理方針

- (1) 計測、調整の回数はなるべく減らす。各架設ブロックの製作・架設誤差の影響を極力小さくするために、各段のケーブル架設ステップごとにシム調整を行う。ただし、調整はそのステップで架設されたケーブルのみとする。
- (2) 精度管理は外気温が最も安定する夜間に実施する。

(3) 精度管理では、主桁、塔の形状の精度確保を重視する。

(4) 誤差要因を定量的に把握し、完成形状を予測して調整を行う。

2.2 許容誤差と管理目標値

2.2.1 許容誤差

上部工の設計に際して以下の製作・架設誤差を見込んでいる。

(1) 主桁形状誤差

次の3方向の変位を強制的に閉合するための荷重を考慮している。

- ・鉛直方向の閉合誤差 : $\pm 100 \text{ mm}$
- ・水平方向の閉合誤差 : $\pm 50 \text{ mm}$
- ・ねじれ方向の閉合誤差 : $\pm 0.00625 \text{ rad}$

(2) 塔の倒れ誤差

斜張橋完成時の塔頂変位(倒れ誤差)により生じる付加荷重を考慮している。誤差は塔高($H = 190 \text{ m}$)の1/1 500としている。

- ・橋軸・橋軸直角の倒れ : $\pm 130 \text{ mm}$

(3) ケーブル張力導入誤差

死荷重(D) + ケーブルプレストレス力(PS)の10% {32~52.9 tf} を設計時に見込んでいる。

2.2.2 管理目標値

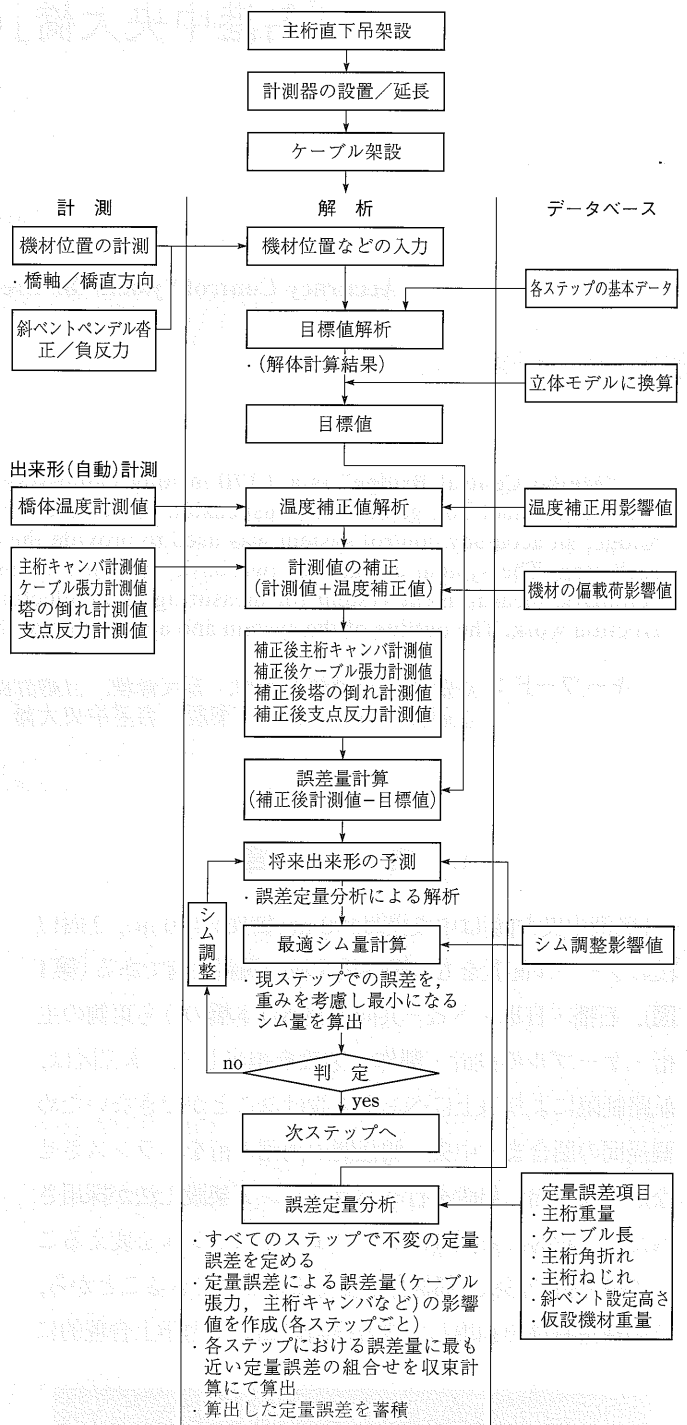
管理目標値は第1表のように設定したが、実施の際は形状を重視して、塔の倒れ、主桁キャンバについては表の管理目標値の1/2以内に誤差が収まるように管理した。ケーブル張力誤差は $D + PS$ の10%以内を目安とした。

2.3 架設精度管理のフロー

張出し架設の1サイクルごとに第2図に示す手順で精度管理を実施した。

2.4 計測要領

計測項目は、力学的に誤差の影響が顕著に現れるケーブ



第2図 架設時精度管理フロー

Fig. 2 Flow chart of accuracy control procedure

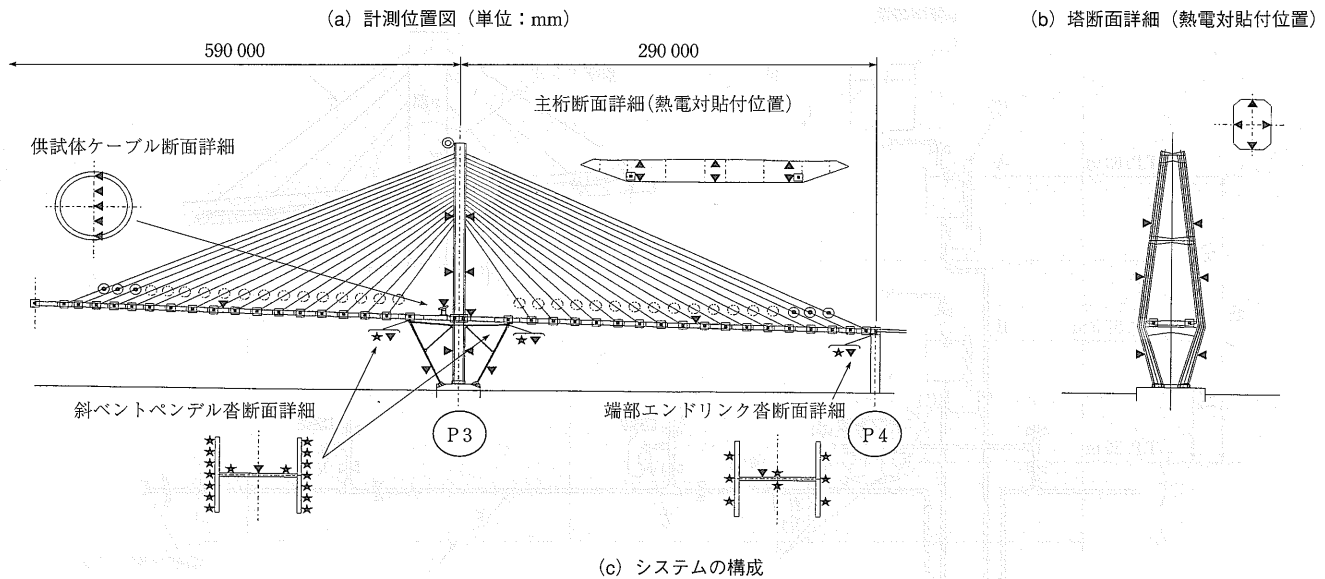
第1表 精度管理項目および管理目標値
Table 1 Items and target values of accuracy control

管理項目	管理目標値
塔の倒れ (橋軸方向の倒れ)	塔高 $H = 190 \text{ m}$ の 1/1 500
	$\Delta H_{sp} = \pm 190\,000 / 1\,500 = \pm 130 \text{ mm}$
主桁キャンバ	中央径間 $\Delta L_{cp} = \pm 590\,000 / 2\,000 = \pm 295 \text{ mm}$
	側径間 $\Delta L_{sp} = \pm 290\,000 / 2\,000 = \pm 145 \text{ mm}$
主ケーブル張力	各ケーブルの設計余裕張力 $\Delta T = 42 \sim 93 \text{ tf}$
弾性拘束(MCD)ケーブル張力	地震時に引張耐力を超えず、常時でゆるまない $\Delta T = -41 \sim 157 \text{ tf}$

ル張力、主桁変位、塔の変位と安全性の確認も含め斜バント支点反力の4項目とした。また、計測値の温度補正用に各部位の橋体温度を計測した。計測位置などのシステムの構成図を第3図に示す。また本橋の計測手法について二、三説明を加える。

2.4.1 主桁キャンバ計測

本橋の構造、工法の特徴からキャンバ計測では次のような問題点があった。



第3図 精度管理システムの構成

Fig. 3 Diagram of accuracy control system

① 本工区では主桁の高低差が架設時のたわみも含めると10 mを超え、高低差が非常に大きい。

② バランシング張出し架設であるため、架設の状況によって主桁先端で1 m以上の変動がある。

③ 大型仮設機材が桁上に配置され、必要な計測ポイントを桁上で計測できない。

このため光学式の測定器や鉛直ゲージを立てた連通管式では計測が困難である。

以上より、主桁キャンバ計測には圧力式連通管(第4図)を採用した⁽²⁾。各計測点の高さは、図のように基準タンクと各圧力センサの水頭圧の測定によるものである。この方式は半密閉タイプであるため、下式のように高さの算出には計測時の水の比重が影響する。計測期間が長く、気温の変化も著しいため比重を随時把握するのは困難である。よ

って、下式の H_g をあらかじめレベル測定器で測定して既知の値とし、この値と基準センサのゲージ圧から得られる水頭差より補正係数を求め、各測点の高低差を補正した。

$$P_{c1} = P_o + \gamma \cdot H_1 \dots\dots\dots(1)$$

$$P_{c1}' = \gamma \cdot H_1 \dots\dots\dots(2)$$

$$H_1 = P_{c1}' / \gamma \dots\dots\dots(3)$$

同様に

$$H_2 = P_{c2}' / \gamma \dots\dots\dots(4)$$

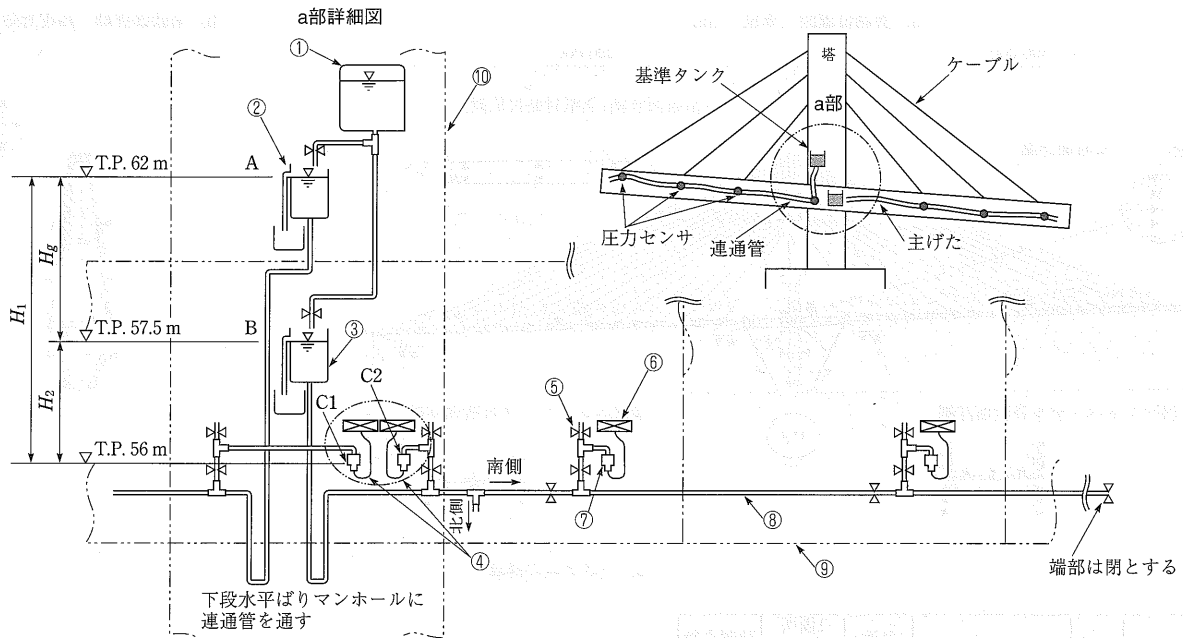
H_1, H_2 の差 H_g が既知であれば γ は簡単に求められる。

$$H_g = H_2 - H_1 = (P_{c2}' - P_{c1}') / \gamma \dots\dots\dots(5)$$

ここで、

P_o : 大気圧

P_{c1}, P_{c1}' : 中央径間の基準センサC1点の絶対圧, ゲージ圧



- (注) ①：給水タンク
 ②：基準タンク(中央径間側)
 ③：基準タンク(側径間側)
 ④：基準センサ(側径間/中央径間用)
 ⑤：エア抜きバルブ
 ⑥：インジケータ
 ⑦：圧力センサ
 ⑧：母管
 ⑨：主桁

第4図 圧力センサ方式による主桁キャンバ計測手法

Fig. 4 Measuring method for girder camber using pressure gauge sensor

P_{C2} , P_{C2}' : 側径間の基準センサC2点の絶対圧,
ゲージ圧

γ : 計測時の水の比重

H_1 : A~C1間の高低差

H_2 : B~C2間の高低差

(C1, C2点の高さは同じとする)

H_g : AB間の高低差(基準タンクの差)

なお、架設初期段階で圧力センサとレベル測定器で測定
の比較を行ったが、測定差は10 mm以内であった。

2.4.2 ケーブル張力計測

ケーブル張力測定は、ケーブルの常時微動波形を加速度
計にて計測し、振動法より張力を算出する方法を採用した。
本システムのケーブル張力の算定では、ケーブルの曲げ剛
性、サグ、傾斜角の影響を考慮しており⁽³⁾、1~6次の振
動数から張力を算出できる。本橋の周辺は年間を通じて風
が強く、ケーブル長が長くなるにつれ、高次モードの渦励
振が発生し始め、夜間計測の大きな障害となった。最長ケ
ーブル(C68:ケーブル長=316.5 m)で渦励振の共振振動
数を試算したところ、風速5 m/sでも振動数が5.5 Hzとな
り、15次以上のモードが卓越することがわかった。計測シ
ステムでは1~6次の振動モードに限定されているため、さ
らに選択の範囲を広げ、任意次数の固有振動数から張力の
測定ができるように改良を加えた。

2.5 シムの補正と誤差定量分析の手法

2.5.1 最適シム量計算

各架設ステップにおける目標値計算の結果と計測結果の
差から出来形誤差が求められる。出来形の誤差調整は架設
時の最上段ケーブルのシム量の調整により行われる。本来、
この誤差がゼロになるまで調整するのが望ましいが、計測
項目すべてについて誤差をゼロとするのは不可能である。
そこで、塔の倒れ、主桁キャンバ、ケーブル張力、ベント支
点反力のそれぞれの誤差に重み係数を乗じて無次元化し、
その無次元化された誤差の合計が最も小さくなるシム調整
量の組合せを収束計算によって求めた。

2.5.2 誤差定量分析

各ケーブル架設ステップではシム調整後に確認計測を行
い最終的な誤差を確認するが、この誤差量はステップが変
わり構造系が変わると前ステップでの誤差をそのまま当て
はめられなくなる。つまり、定性的には将来の誤差を予測
できるが、定量的な予測が困難である。しかしながら、シ
ム調整後の残留誤差を全ステップに共通な誤差として置換
することで、将来の出来形を予測することは理論的に可能
である。本橋の架設精度においては以上の理論を用いた「誤
差定量分析システム」を新たに加え、将来出来形予測を可能
とした。このシステムの手法の定義を以下に述べる。

まず、各ステップのシム調整時に測定される以下の誤差

を「計測項目誤差」とする。

- ・ 塔の倒れ誤差 (mm)
- ・ 主桁キャンバ誤差 (mm)
- ・ ケーブル張力誤差 (tf)
- ・ 支点反力誤差 (tf)

次に、すべてのステップにおける共通の誤差を「定量誤差」とする。「定量誤差」は橋体の構造寸法、重量などの誤差でありその項目を個々に挙げると膨大な量となる。そこで「計測項目誤差」の応答量が大きいものを試行錯誤的に選択した結果、以下の項目を抽出することとした。

- ・ 主桁の鋼重誤差 (t)
- ・ ケーブル長誤差 (mm)
- ・ 主桁の角折れ誤差 (mrad)
- ・ 主桁のねじれ誤差 (mrad)
- ・ 斜ペントペンデル脊長誤差 (mm)

この他に上載荷重誤差、閉合誤差を適宜追加した。

2.5.3 分析方法

「計測項目誤差」を「定量誤差」に置き換える方法は以下のとおりである。

- ① 線形骨組み解析プログラムを用い、任意のステップ(iステップ)の立体モデルを作成する。
- ② この立体モデルに「定量誤差」をそれぞれ荷重として載荷し、「計測項目誤差」に最も近づく組合せを求める。
- ③ 「定量誤差」の荷重の組合せにより計算された「計測項目誤差」が、シム調整後の測定による「計測項目誤差」に最も近づくように「定量誤差」の組合せを求める。

この解が得られる「定量誤差」の組合せは②で求めた応答値の逆マトリックスで求めることが可能と考えられるが、実際には各種の誤差により求められた解は非現実的な値となり、誤差量として適用できない。ここでは汎用表計算プログラムの収束計算機能を用いて「定量誤差」の組合せの解を求めた。

2.5.4 将来出来形予測

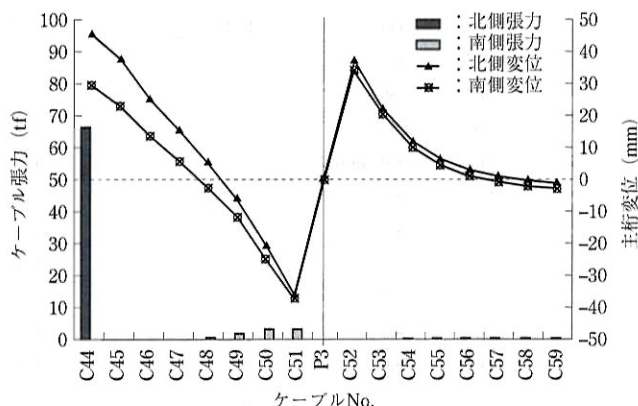
誤差定量分析により求めた「定量誤差」を蓄積し、将来の架設系モデルに荷重として載荷することで、将来の「計測項目誤差」すなわち将来出来形を予測することができる。本橋ではこの将来出来形予測を用いて次ステップで設計シムを挿入した場合の予測を行い、解析上で次回の最適シム量を想定した。そして、次ステップのケーブル架設にはあらかじめその想定したシム量を挿入し、夜間のシム調整作業の

軽減を図った。

3. 精度管理結果

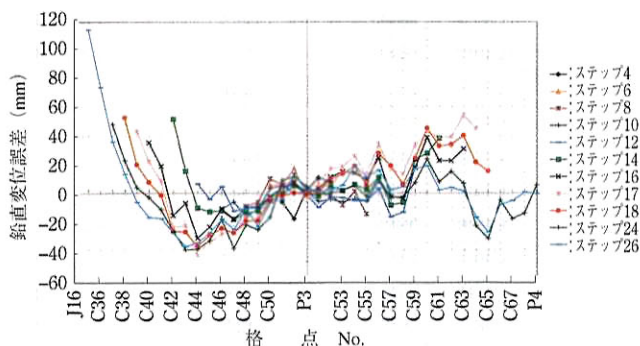
3.1 バランシング架設時における架設系の応答と誤差の推移

ケーブル8段目(C44)の北側ケーブルのシム応答値を第5図に示す。図は挿入シム量を100mmとしたときの応答値を表す。バランシング架設時ではケーブル段数が変わっても図のように単位シム量の応答量が理解しやすい。これはバランシング架設工法の利点の一つである。側径間閉合までの主桁キャンバ誤差(南側)の推移の結果を第6図に示す。ケーブル8段目架設以降は主桁先端が上にあがる傾向にある。主桁ブロック架設時に架設直前・直後の桁変位を計測したが、計測値は解析値とほとんど一致しており、主桁剛度と鋼重の誤差は微少であると思われる。この原因として、①溶接縮み量の誤差もしくは製作時の溶接キャンバの誤差②主桁ブロック製作長誤差③ケーブル製作長誤差、などが考えられる。



第5図 ケーブル単位シム(100mm)あたりの影響値 (8段目ケーブル架設時:ステップ18)

Fig. 5 Effect on cable force and girder deflection due to 100 mm thick cable shim plate (STEP 18)



第6図 張出し時の主桁変位誤差の推移

Fig. 6 Transition of errors in vertical displacement of cantilever segment

第2表 誤差定量分析結果

Table 2 Results obtained from quantitative analysis of error factors

誤差要因項目	点番	単位	分析結果	誤差要因項目	点番	単位	分析結果	誤差要因項目	点番	単位	分析結果
主桁死荷重誤差			0.426								
	C35北	635	-36.0		C52南	5652	-12.0		J40	63	-1.10
	C36北	636	12.1		C53南	5653	-9.2		J41	65	1.89
	C37北	637	2.2		C54南	5654	-7.1		J42	67	-1.03
	C38北	638	22.1		C55南	5655	-13.2		J43	69	1.51
	C39北	639	-28.7		C56南	5656	-28.2		J44	71	-1.95
	C40北	640	6.2		C57南	5657	-14.2	主桁角折れ	J45	73	1.10
	C41北	641	15.1		C58南	5658	-32.7		J46	75	-0.36
	C42北	642	-4.5	ケーブル長	C59南	5659	-6.9		J47	77	-1.78
	C43北	643	-20.4		C60南	5660	-18.3		J48	79	1.13
	C44北	644	-19.9		C61南	5661	-16.3		J49	81	0.24
	C45北	645	8.3		C62南	5662	-26.6		J17	3	-0.56
	C46北	646	6.2		C63南	5663	-7.7		J18	5	-0.12
	C47北	647	-6.1		C64南	5664	-17.5	mm長い	J19	7	0.54
	C48北	648	15.2		C65南	5665	3.1		J20	9	0.46
	C49北	649	4.4		C66南	5666	5.3		J21	11	-0.09
	C50北	650	6.4		C67南	5667	-3.6		J22	13	0.20
	C51北	651	-13.1		C68南	5668	-28.4		J23	15	0.01
	C52北	652	-3.9		中央径間, 北	402	-40.9		J24	17	-0.37
	C53北	653	-4.0	MCD長	中央径間, 南	5402	-42.1		J25	19	0.81
	C54北	654	-4.4		側径間, 北	403	21.8		J26	21	-0.96
	C55北	655	-9.2		側径間, 南	5403	18.3		J27	23	-0.51
	C56北	656	-11.1		中, 北		10.8		J28	25	1.73
	C57北	657	-9.4	斜ベント ペンデル長	中, 南		5.7		J29	27	-0.42
	C58北	658	-32.1		側, 北		-3.6		J30	29	-0.08
	C59北	659	4.2		側, 南		2.0		J31	31	-0.12
ケーブル長	C60北	660	-3.0		J17	3	1.26		J32	33	0.05
	C61北	661	-26.2		J18	5	0.75		J33	35	-0.43
	C62北	662	-16.7		J19	7	-2.20	主桁ねじれ	大ブロック1	37	0.07
	C63北	663	5.3		J20	9	-0.66		大ブロック2	41	0.15
	C64北	664	-31.2		J21	11	-0.80		大ブロック3	45	-0.40
	C65北	665	-2.8		J22	13	-1.94		大ブロック4	49	0.34
	C66北	666	28.7		J23	15	1.85		J34	51	-0.28
	C67北	667	10.4		J24	17	-1.56		J35	53	-0.04
	C68北	668	-2.9		J25	19	-0.72		J36	55	0.48
	C35南	5635	-46.3		J26	21	-1.91		J37	57	0.01
	C36南	5636	-9.1		J27	23	1.41		J38	59	-0.31
	C37南	5637	5.5		J28	25	-2.00		J39	61	0.46
	C38南	5638	-15.0	主桁角折れ	J29	27	1.39		J40	63	-0.32
	C39南	5639	-39.2		J30	29	-0.74	mmrad山折	J41	65	-0.60
	C40南	5640	-11.7		J31	31	-1.51		J42	67	0.17
	C41南	5641	13.1		J32	33	1.56		J43	69	-1.00
	C42南	5642	7.5		J33	35	-0.24		J44	71	0.30
	C43南	5643	-16.4		大ブロック1	37	0.19		J45	73	1.11
	C44南	5644	-6.3		大ブロック2	41	0.10		J46	75	-0.04
	C45南	5645	1.4		大ブロック3	45	0.22		J47	77	-0.72
	C46南	5646	9.2		大ブロック4	49	-0.73		J48	79	0.99
	C47南	5647	-1.0		J34	51	0.90		J49	81	-0.31
	C48南	5648	12.3		J35	53	-1.18	閉合JOINT伸び		mm長い	99.7
	C49南	5649	21.7		J36	55	1.44	閉合JOINT高さ		mm西高い	-228.6
	C50南	5650	16.1		J37	57	-1.68	閉合JOINT角折れ		mmrad山折	0.05
	C51南	5651	-3.6		J38	59	1.68	閉合JOINTねじれ		mmrad南下	-0.47
					J39	61	-1.94				

3.2 誤差定量分析結果と将来出来形の予測

3.2.1 誤差定量分析結果

2.5.2で述べた誤差定量分析の最終ステップにおける結果を第2表に示す。分析の結果、主要な誤差要因は、桁の角折れとケーブル長(ケーブル定着点間の距離)であると考えられる。

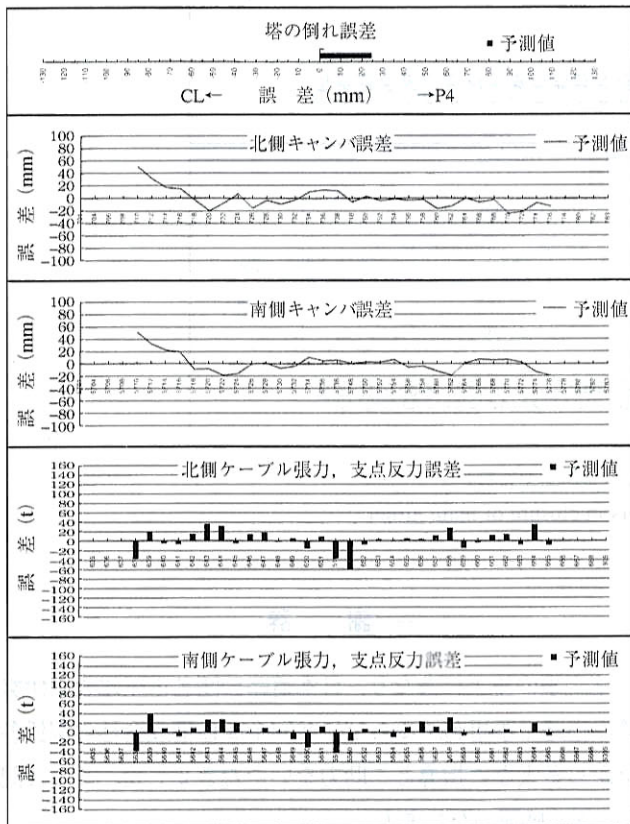
3.2.2 将来出来形予測の結果

側径間閉合直前のステップ18(ケーブル14段架設完了時)における出来形予測値と実測結果を第7図と第8図に示す。

2.5.4で述べた将来出来形予測プログラムを用いて次ステップの出来形を予測し、ケーブル架設時にあらかじめシム調整を行った。その結果、ケーブルのシム調整を実施した26本のうち夜間計測で再調整を行ったケーブルは15本であり、本プログラムは夜間シム調整作業の軽減に貢献できた。

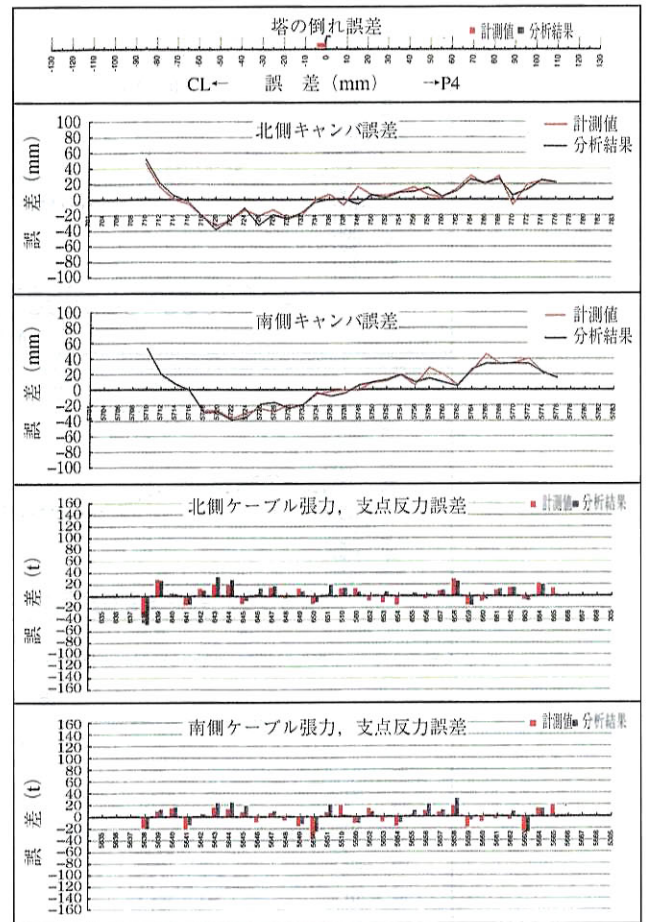
3.3 閉合後の出来形

第9図は中央径間閉合後の出来形形状である。主桁および塔の形状、ケーブル張力とも管理目標値内に十分おさまっており、出来形形状については良い結果が得られた。



第7図 ステップ18の出来形予測値

Fig. 7 Predicted errors of main girder profile at STEP 18



第8図 ステップ18の実測結果

Fig. 8 Results of errors of main girder profile at STEP 18

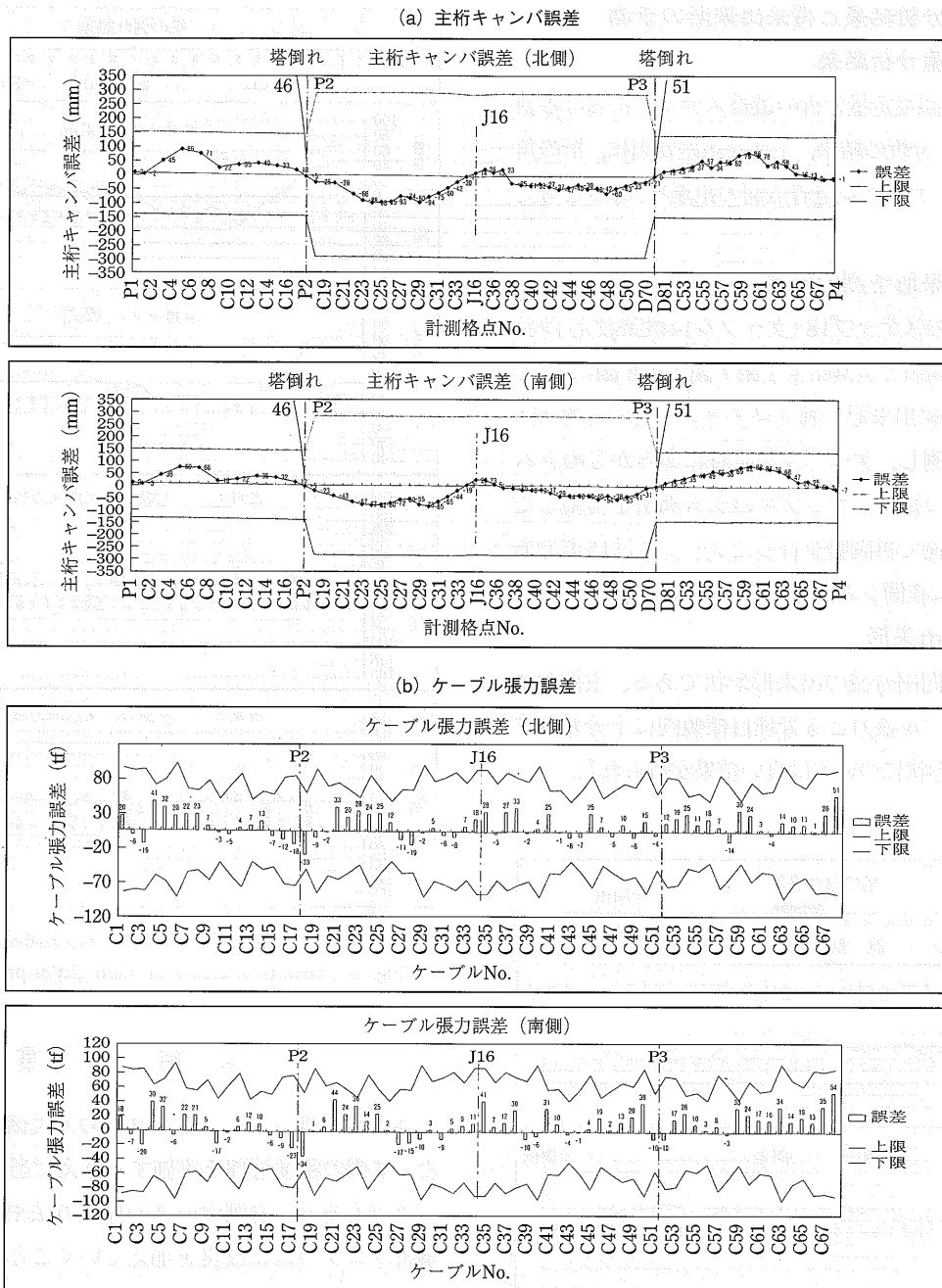
4. 結 言

本精度管理システムを今回初めて実橋で本格的に使用した。本橋の精度管理を実施するうえで当初予測していなかった点もあり、計測データの採取方法や補正方法、そして解析プログラムに改良を加えていくことでシステムとしての完成度が増した。今後、計測機器やコンピュータの進歩によりさらにシステムは向上するであろう。しかし、本橋のような厳しい架設環境の中での計測・出来形管理については、現場に従事する我々技術者の経験による判断にゆだねられるところも多い。

今後は、架設精度管理システムだけでなく斜張橋の架設エキスパートシステムとしてさらに範囲を広げたシステムの構築に取組む予定である。

参 考 文 献

- (1) 田中健治, 谷 郁男, 近藤俊行, 川上剛司, 島田忠幸: 斜張橋の架設精度管理システムの開発 石川島播磨技報 橋梁特集号 1995年4月 pp. 104-108



第9図 最終出来形図(主桁中央径間閉合後)

Fig. 9 Results of girder profile errors in closure of main girder

- (2) 島田忠幸, 市川健生, 川上剛司, 中村善彦: 圧力センサーを用いた斜張橋の形状計測 IIC REVIEW No. 15 1996年4月 pp. 33-37
- (3) 島田忠幸: ケーブルの高次振動モードの固有振動数測定値からの張力測定法について 土木学会論文集 No. 501/I-29 1994年10月 pp. 163-171

— 謝 辞 —

本工事の施工にあたり、日本道路公団名古屋建設局伊勢湾岸道路工事事務所ならびに共同企業体構成会社の関係各位から多大なご指導とご助力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。