

斜張橋（新万代橋）の架設時の精度管理

Precision Control in the Construction of a Cable-Stayed Bridge (Shinyorozuyobashi Bridge)

by Hiroyoshi Noto and Hisao Yamashita

能 登 宥 愿* 山 下 久 生**
Hiroyoshi NOTO Hisao YAMASHITA

Summary

Various inconsistencies arising during the design, manufacture and construction of a structure influence its form, cable tension and stresses. These inconsistencies cause the final result to differ from what had been intended. As the main tower of this cable-stayed bridge is rigidly connected to its main girder, in contrast to ordinary bridges of this type in which the main tower is not connected with the main girder, the bridge has unique structural characteristics. Inconsistencies in the bridge, therefore, must be strictly controlled.

1. まえがき

新万代橋は茨城県水戸市的那珂川下流に架かる橋梁である。本橋は1面ケーブルで、主塔は主桁に剛結された単独柱の3径間連続鋼斜張橋である。精度管理は平成3年8月～10月に各段のケーブルの架設に合わせて行われている。

2. 概 要

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、鋼桁自重最小化を目指した最適プレストレスが設定されている。そこで、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。

また本橋は主塔が主桁と分離した一般的な斜張橋と異なり、主塔が主桁に剛結されているため、独特の構造特性を有している。これらを考慮して、誤差を所要の範囲内でバランスよく収める必要がある。そこで良い品質、安全性の確認、工程のスムーズな進捗を目標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を行った。

3. 管理方針

主塔の主桁への剛結、1面ケーブル等の要素に着目して構造特性調査を行い、そのデータと現場の作業条件・施工性・安全性を考慮して管理方針を次のように決めた。

- ① 計測・調整は各段ケーブル張渡し時と閉合時の7ステップについて行う。
- ② 計測当日、架設時荷重の重量、位置、有無の最終チェックを行い、管理値の修正をする。
- ③ ケーブル張力、主桁の鉛直変位（振りを考えて上・下流の2ラインの値）、主塔の倒れを管理項目とし、主桁・主塔の応力を安全性の確認項目とする。
- ④ 計測時期が夏から冬に跨るので、最適計測時間を温度の経時計測から決定する。また必要に応じて計測値を温度補正する。
- ⑤ 張力計測は振動法とし、計測振動数による計算張力の補正はジャッキ法による。
- ⑥ 調整対象とするケーブルは当該ケーブルとその下段ケーブルとする。

4. 計測項目と管理値の許容値

計測項目はケーブル張力、主桁の鉛直変位、主塔の倒れ（橋軸方向変位）、橋体温度、外気温、橋体の部材断面応力の6項目である。各項目の計測位置を図-1に、計

* 技術本部先行技術研究室課長

** 技術本部設計部設計第2課

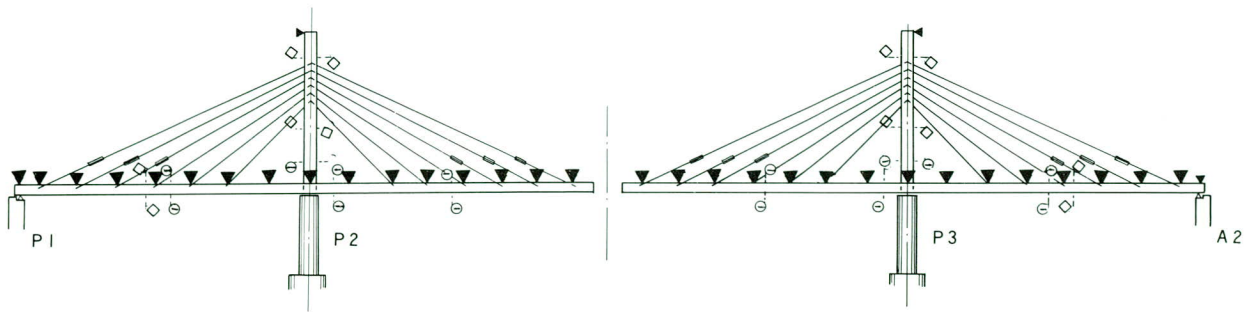


図-1 新万代橋一般図および計測位置図

- ▼：変位測点（閉合直前
桁 2×16=32、塔 1）
- ◇：温度測点（桁 2×6=12、塔 2×4=8
ダミーケーブル 2×2=4）
- ：ケーブル張力測点（6点）
- ⊖：応力度測点（桁 2×6=12、
塔 1×4=4）

表-1 計測項目と管理値の許容値

	計測方法	管理値の許容値
ケーブル張力	サーボ加速度計 (常時微動法) 振動法の補正は ジャッキ法	$\Delta T = T_a - (T_d + T_l)$ ΔT ：余裕量
主桁形状 塔の倒れ	光波式測角測距儀に よる計測	$L/1000$ $H/1000$
橋体温度	主桁・塔のBox内、 共試体ケーブルに熱 電対を貼付	
外気温	主塔・塔のBox内外 面に熱電対を貼付	
断面応力	軸部添付式歪ゲージ を貼付	

測方法を表-1に簡単に示す。

管理項目となるケーブル張力、主桁の鉛直変位、主塔の倒れの許容値は表-1に示す通りである。

5. 精度管理システム

本システムは構造特性計算、管理値・影響値計算の事前解析システムと計測およびその処理を行う計測システムとその計測結果と管理値を対比して、最適シム量の決定を行う解析システムとから構成されている(図-2、-3参照)。

事前解析では、クレーン、軌条等の仮設荷重の偏載による振れ量も算出できるように、構造モデルを立体とし、ケーブルをカタナリーとして有限変形解析を行っている。

構造特性計算では、構造系の形状特に主塔が主桁に剛結していることに着目して、ケーブル長の変化、剛性の差異、荷重の大きさと偏載、荷重としての自然条件の変化等に基因する力学的諸量が求められている。

各種計測値は部材の一樣温度変化、部材断面の温度差

による影響を補正し、ケーブル張力はさらにケーブルの曲げ剛度、ソケットの支持条件等の補正を行っている。

最適シム量の計算方法にはいくつかの方法が用意されている。本橋ではケーブル張力、主桁の変位、主塔の倒れの重みを工学的判断により決定し、最小二乗法を用いてシム量を求めている。さらに施工性を考慮した調整対象ケーブルにシム量変化を集約して最適シム量を決めている。

6. 構造特性計算

構造特性は主桁、主塔の剛性、鋼重、温度等の誤差と特定のケーブル長の誤差に対して、各架設ステップのケーブル張力と主桁鉛直変位の変化について述べる。これらの変化の状態は、主桁中央径間張出し時(Step 1~6)と閉合時(Step 7)で性質を異にしているので、項目を分けて述べる。

(1) 主桁中央径間張出し時

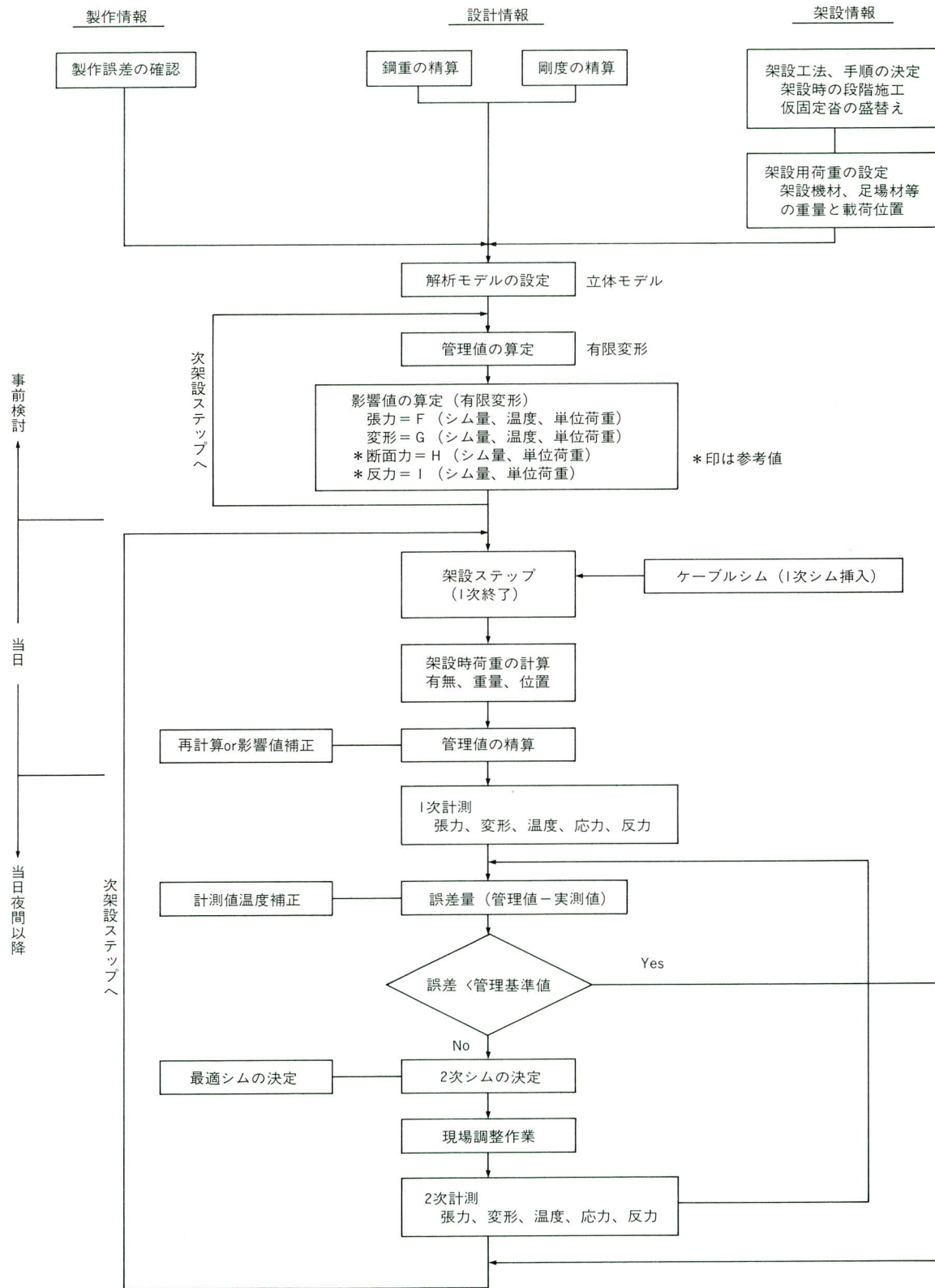


図-2 精度管理フロー

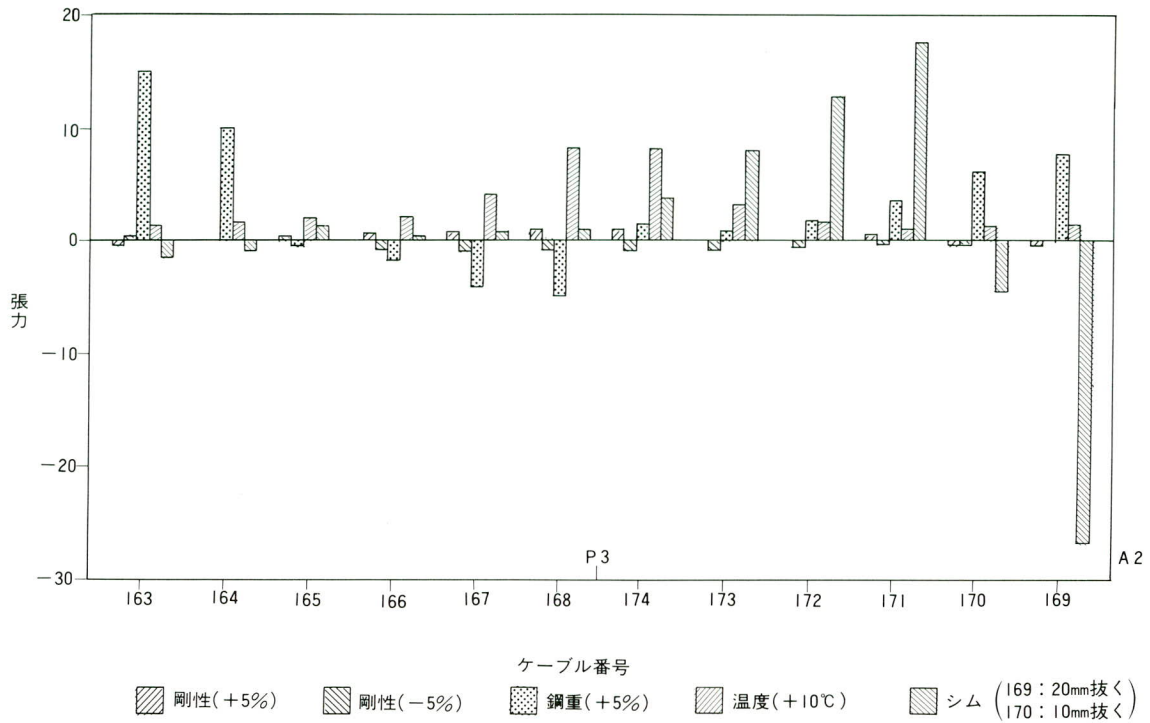


図-4a ケーブル張力の変化(STEP-6)

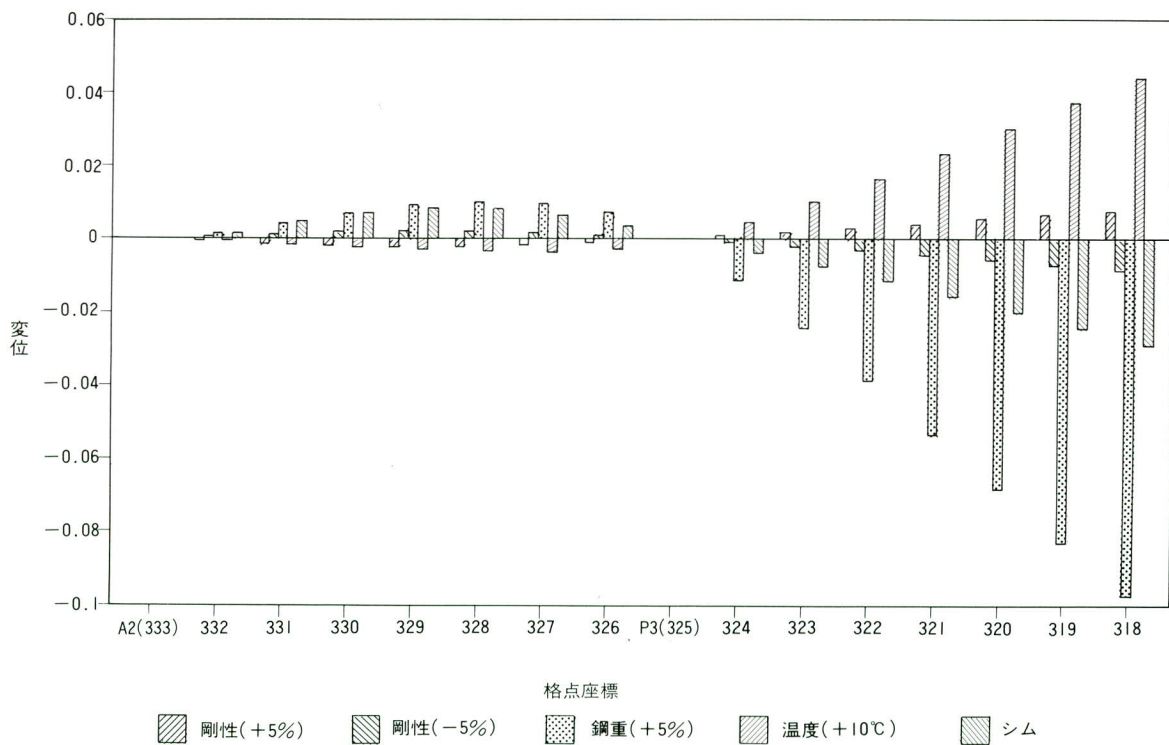


図-4b 桁のキャンバー変化(STEP-6)

張出し時の各架設ステップとも、鋼重、温度、ケーブル長の誤差による構造特性は類似の性質をもっているが、剛性の誤差については主桁の鉛直変位のみStep 3迄とStep 4以降では性状が逆転している。ケーブル張力については、剛性5%増で殆どのケーブルの張力は微かに増加(1~2 ton)している。鋼重5%増では、Step 3で全てのケーブル共(下から3段迄)2~7 ton位張力が減少する。ステップが進むにつれて、張出し先端のケーブルから張力が増加し、Step 6の先端ケーブル(図-4 a)で最大となり、15 ton位増加(中央径間の下3段のケーブルのみ2~5 ton位減少)となっている。

主桁の形状は、鋼重に対して、先端で大きく鉛直下向きに変形し、側径間ではステップの進行につれてその値の1/5~1/8位上向きに変形している。

温度10℃増加では、下段ケーブルがどのステップでも10 ton弱増加し、上段にいくほど変化がなくなる。主桁の形状は張出し先端部にいくほど大きく鉛直上向きに変形し、側径間では微かに鉛直下向きに変形する(図-4 b)。

ケーブル長の変化(シム量の変化)については、側径間のケーブルを緊張すると側径間の主桁が鉛直下向きに、緩めると主桁が鉛直上向きに変形する。この一見奇妙な現象の一因は塔が主桁に剛結していることによる。しかし、主桁が閉合されるとこの性質も多少変わってくる。

(2) 主桁の中央径間での閉合時

主桁閉合時のStep 7では、剛性5%増に対して、ケーブル張力は張出し時と殆ど同様であり、主桁の変形形状もStep 4~6と同様である。

鋼重5%増に対して、ケーブル張力は張出し時と異なり、殆ど変化がない。主桁の鉛直変形はStep 6より多少小さくなっているが各径間での最大値は、中央径間で80 mm弱鉛直下方に、側径間で10mm位鉛直上方に生ずる。

温度10℃増加に対して、ケーブル張力は最大10 ton弱増加する。主桁の鉛直変形は中央径間のみ顕著であり、最大34mm位鉛直上向きに生じている。

ケーブル長の変化については、側径間のどのケーブルが長くなるかによって、側径間の主桁が鉛直方向に上がったり、下がったりする。即ち、塔付近部(下段)のケーブルを緊張し、端支点側(上段)のケーブルを緩めると側径間の主桁は効果的に鉛直上向きに変形する(図-5 a、-5 b参照)。

7. 計測結果、最適シム決定および考察

精度管理は各段ケーブル張渡し後と主桁の中央径間閉合後の合計7ステップについて行われた。ケーブル張渡

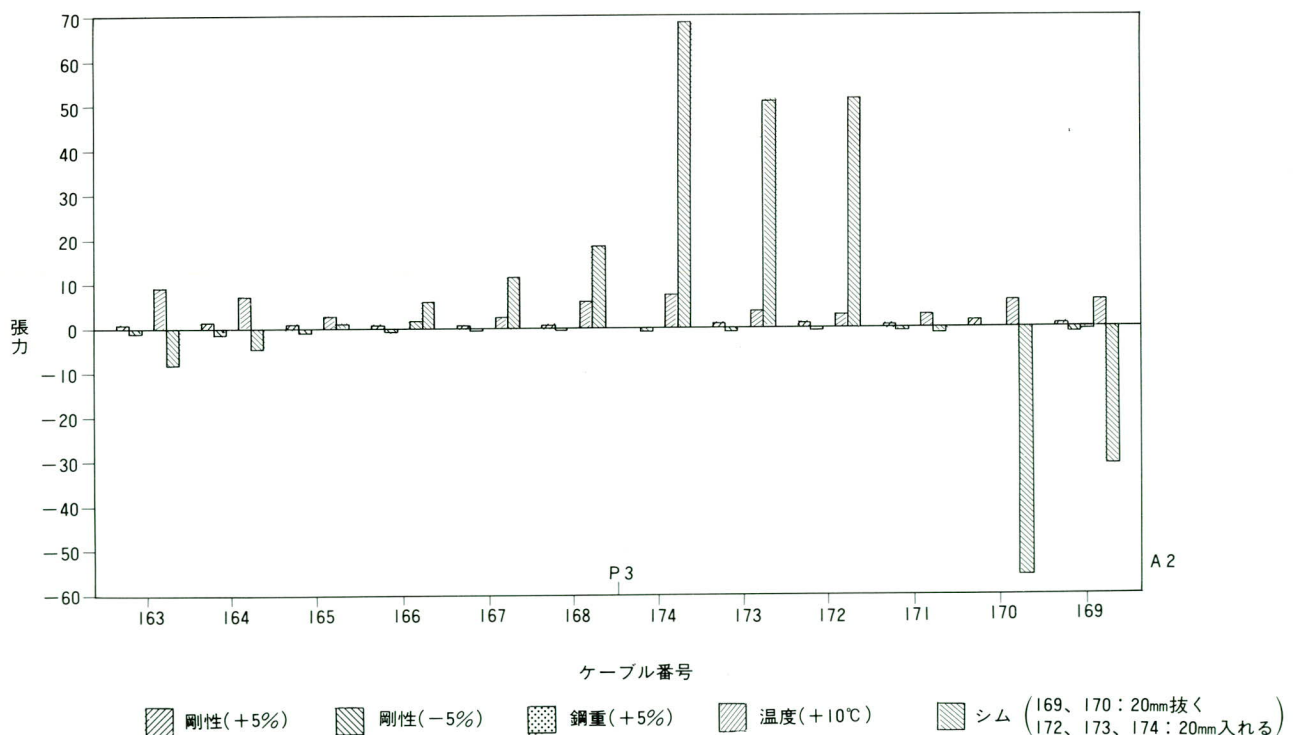


図-5a ケーブル張力の変化(STEP-7)

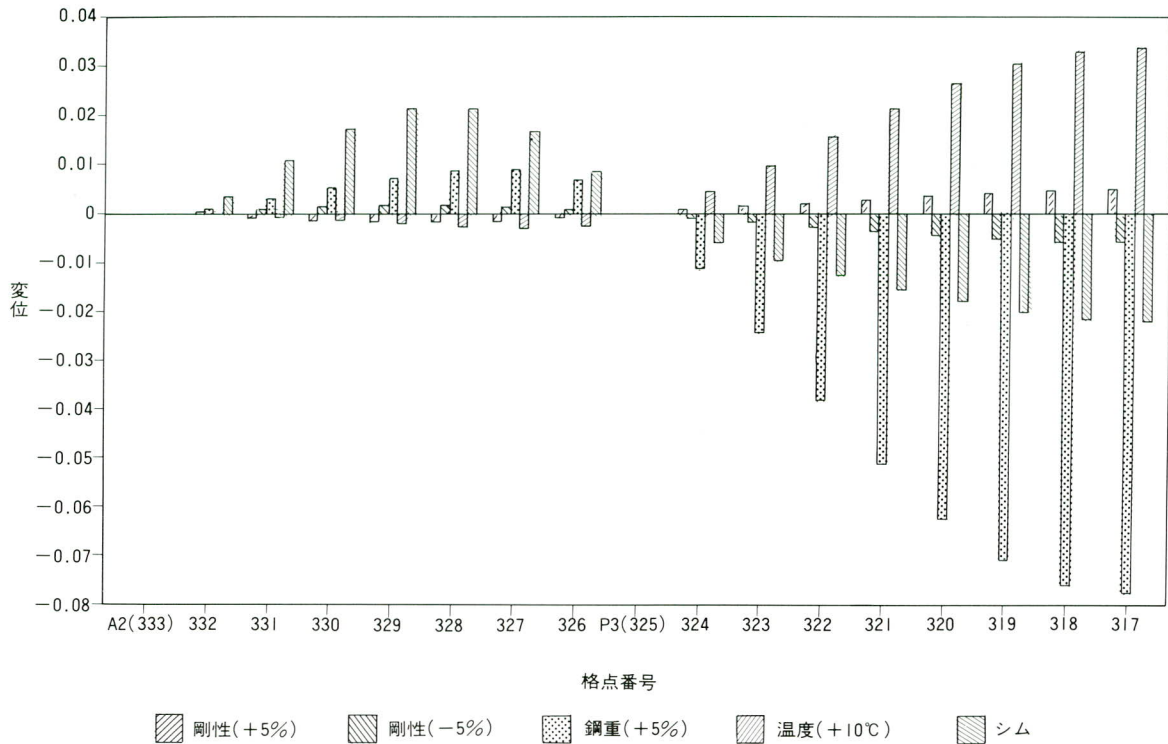


図-5b 桁のキャンバー変化(STEP-7)

表-2 ケーブル張力 誤差

(単位 ton)

ケーブルNO	1-1	2-1	2-2	3-1	3-2	4-1	4-2	5-1	6-1	6-2	MI-1	MI-2
151											-10.15	-19.75
152											-18.92	-25.72
153											11.34	4.54
154											-16.68	-2.98
155											23.63	19.63
156											4.14	5.04
162											-11.61	-3.61
161											7.27	12.67
160											-2.05	-2.25
159											6.07	12.87
158											13.91	-13.09
157											11.96	11.96
163									9.91	-5.87	13.15	18.59
164								-30.01	-45.22	-34.96	-25.45	-15.17
165						-18.42	-15.09	-12.05	-11.19	-10.64	-7.56	-1.65
166				-39.99	-4.48	-10.38	-16.12	-4.17	-5.42	-2.09	-5.53	4.24
167		1.52	17.88	25.62	7.71	11.50	11.00	18.29	16.15	18.77	14.67	22.78
168	-31.16	-71.92	-11.00	-0.16	-15.61	-15.89	-15.88	-12.12	-12.01	-12.51	-18.35	-4.81
174	-47.76	-28.21	-32.25	-42.36	-23.27	-22.52	-14.77	-2.33	0.74	1.76	7.86	44.67
173		-65.98	-34.48	-57.93	-33.69	-35.19	-27.17	-9.44	2.71	4.73	0.77	43.58
172				2.99	-32.66	-39.80	-31.83	-11.14	1.95	2.64	6.34	41.19
171						-5.05	-34.28	-11.66	-3.74	-3.75	6.15	-19.11
170								-50.65	-21.04	-19.58	-19.14	-43.93
169									-64.01	-61.28	-59.36	-39.60

表-3a 主桁の鉛直変位 誤差

測線番号 I	測線名 (下流側)										誤差: 単位(mm)	
格点 NO	1-1	2-1	2-2	3-1	3-2	4-1	4-2	5-1	6-1	6-2	M1-1	M1-2
201											- 2.1	-14.1
202											-18.8	-24.6
203											-36.3	-43.0
204											-48.0	-51.1
205											-45.9	-54.9
206											-37.7	-46.2
207											-25.1	-29.1
208											- 9.8	-16.2
209											8.0	1.0
210											25.2	21.7
211											32.6	36.4
212											41.1	39.8
213											51.5	39.3
214											60.5	43.1
215											67.6	50.2
216											74.8	63.4
217											48.2	52.2
218									24.0	22.7	28.0	27.0
219								75.8	39.1	36.9	31.1	29.1
220						93.8	108.6	80.8	51.4	49.2	46.2	50.2
221				101.6	93.8	80.7	94.6	75.2	47.8	49.7	49.3	45.3
222		45.1	68.8	77.6	70.3	66.0	74.9	59.7	38.2	40.1	40.5	37.5
223	27.5	37.7	49.2	55.0	50.5	40.8	55.8	44.1	32.1	28.2	29.7	26.7
224	20.9	27.3	28.5	35.8	31.0	22.7	31.7	28.0	17.8	18.8	18.8	14.8
225	3.0	10.0	7.0	5.0	4.0	- 1.0	3.0	1.0	0.0	- 1.0	- 4.0	- 7.0
226	-26.8	-30.4	-31.5	-38.1	-35.2	-40.7	-39.7	-36.9	-35.2	-32.2	-34.9	-34.9
227	-49.2	-57.1	-62.2	-71.4	-68.5	-75.4	-70.4	-70.2	-64.3	-62.3	-63.4	-57.4
228	-63.1	-75.5	-76.7	-92.5	-86.6	-94.9	-90.9	-90.0	-82.2	-83.1	-80.1	-69.1
229	-58.5	-73.4	-73.4	-88.6	-85.7	-95.2	-91.3	-92.2	-81.4	-82.3	-80.7	-68.7
230	-51.6	-66.3	-64.3	-80.8	-75.9	-85.8	-84.8	-82.0	-74.9	-74.9	-74.9	-63.9
231	-38.8	-52.3	-50.3	-61.8	-57.8	-63.9	-61.9	-64.0	-57.5	-57.5	-58.2	-48.2
232	- 5.4	-13.0	-14.0	-15.3	-15.3	-18.4	-16.4	-21.2	-19.1	-18.0	-16.3	-13.3
233	- 0.6	- 3.3	- 6.3	- 6.4	- 5.4	- 7.6	- 5.6	- 8.8	- 9.0	- 8.0	- 6.1	- 6.1

し時は設計シム量を挿入している。

(1) 計測結果

ケーブル張渡し開始直前の側径間架設完了時点では、P1橋脚側、A2アバット側の両側径間共下がり気味である。各々の値としては、河川部のA2側の方がベントの少ないこともあり、陸上部のP1側より、その量が多少大きかった。

各段張渡し時の調整後も含めた計測値を誤差量(=計測値-管理値)で表すと、ケーブル張力は表-2、主桁の鉛直変位、塔の倒れは表-3a、-3b、-4となる。この結果より、側径間はケーブル張渡し直前と同じく、下がり気味であり、それに呼応して中央径間張出し部は上がり気味である。

構造特性計算からも明らかなように、主塔と主桁が剛

結しているため張出し時はケーブル長変化による側径間の鉛直上向きの変形に対する感度が鈍い。そのことが調整後の結果からいえる。

張力、主塔の倒れについては、誤差量も大きくなく、ケーブル長変化に対する感度も鈍くはない。調整した架設ステップが、表-2、-4の(I-2)に示されている。

閉合時は張力、主桁形状、塔の倒れの全体のバランスを計りながら、側径間特にA2側の側径間の主桁形状の修正に重きを置いた。図-6、-7にその結果を示す。

張力は側径間の一部のケーブルを除いて、非常に良い精度が得られている。また主桁、塔の部材断面の応力は概ね解析値と対応がとられており、架設時の安全性の確認が得られた。

表-3b 主桁の鉛直変位 誤差

測線番号 2	測線名 (下流側)										誤差：単位(mm)	
格点 NO	1-1	2-1	2-2	3-1	3-2	4-1	4-2	5-1	6-1	6-2	MI-1	MI-2
301											- 2.1	- 6.1
302											-18.8	-25.6
303											-36.3	-49.0
304											-48.0	-57.1
305											-45.9	-56.9
306											-37.7	-42.2
307											-25.1	-22.1
308											- 9.8	- 7.2
309											8.0	1.0
310											25.2	10.7
311											32.6	15.4
312											41.1	14.8
313											51.5	10.3
314											60.5	23.1
315											67.6	40.2
316											74.8	69.4
317											68.2	68.2
318									73.8	73.5	44.0	49.0
319								104.2	98.9	93.7	39.1	41.4
320						103.2	118.0	88.0	49.7	53.5	39.2	43.2
321				102.9	95.1	80.0	93.9	74.8	39.5	44.4	32.3	38.3
322		50.2	78.9	80.7	76.6	59.8	74.7	61.0	37.5	35.4	28.5	32.5
323	54.3	37.8	57.3	54.7	51.2	40.1	55.1	47.2	27.1	25.2	24.7	21.7
324	42.4	27.7	35.9	35.9	32.1	16.6	27.6	27.9	14.6	15.6	14.8	11.8
325	5.0	6.0	8.0	4.0	4.0	- 1.0	3.0	2.0	- 2.0	- 2.0	- 1.0	- 4.0
326	-19.5	-20.1	-24.2	-29.8	-26.9	-33.4	-28.4	-29.5	-25.9	-26.9	-25.9	-24.9
327	-42.5	-52.5	-54.6	-65.7	-62.8	-71.7	-66.7	-64.4	-60.6	-56.6	-55.4	-48.4
328	-62.9	-75.5	-78.5	-95.2	-88.3	-97.7	-93.7	-91.7	-83.9	-83.8	-81.1	-69.1
329	-59.8	-75.4	-74.4	-91.6	-85.7	-97.3	-93.4	-88.2	-82.5	-81.4	-80.7	-68.7
330	-47.1	-62.6	-60.6	-76.0	-71.1	-80.1	-78.1	-78.2	-72.0	-71.0	-68.9	-57.9
331	-31.3	-44.5	-42.5	-55.0	-50.0	-58.2	-55.2	-56.1	-53.6	-51.6	-50.2	-42.2
332	-10.0	-20.2	-17.2	-22.6	-21.6	-24.6	-22.6	-23.4	-22.3	-20.2	-22.3	-20.3
333	4.7	- 2.6	- 1.6	0.2	- 2.8	- 2.9	0.1	- 0.1	- 3.3	- 0.3	- 3.2	- 2.2

表-4 主塔の変位 誤差

格点 NO	1-1	2-1	2-2	3-1	3-2	4-1	4-2	5-1	6-1	6-2	MI-1	MI-2
121	89.4	81.3	61.8	83.8	65.4	64.4	65.5	50.0	30.3	29.1	29.0	32.0

格点 NO												
110											-35.3	-34.5

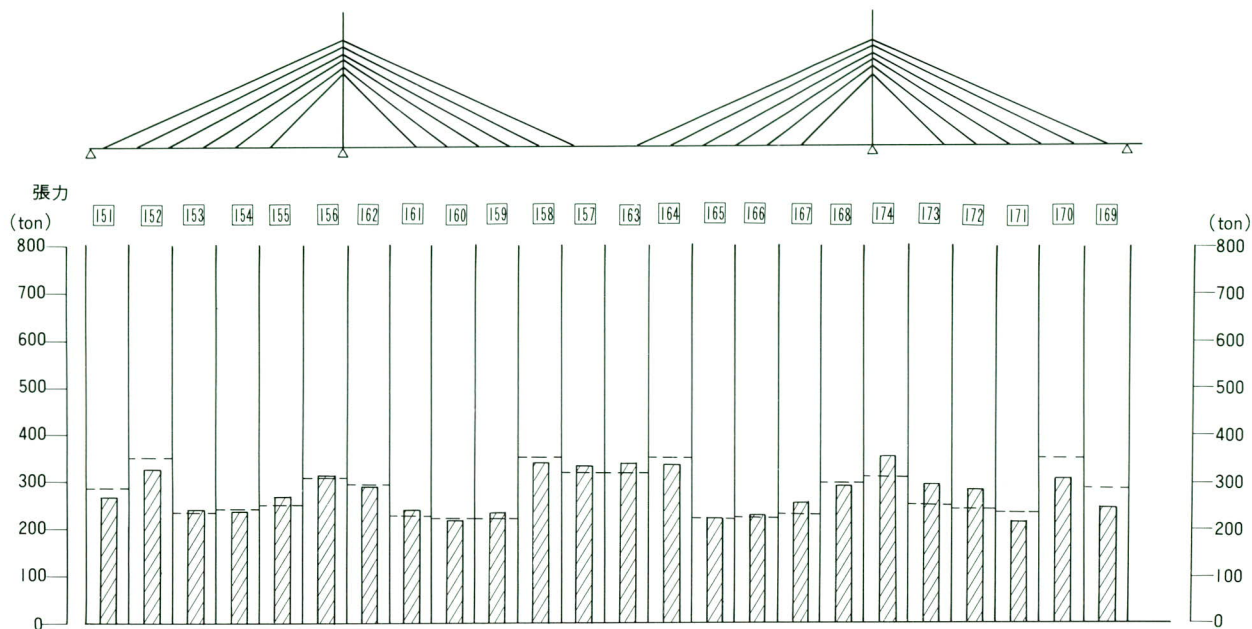


図-6 張力図 M STEP1-2

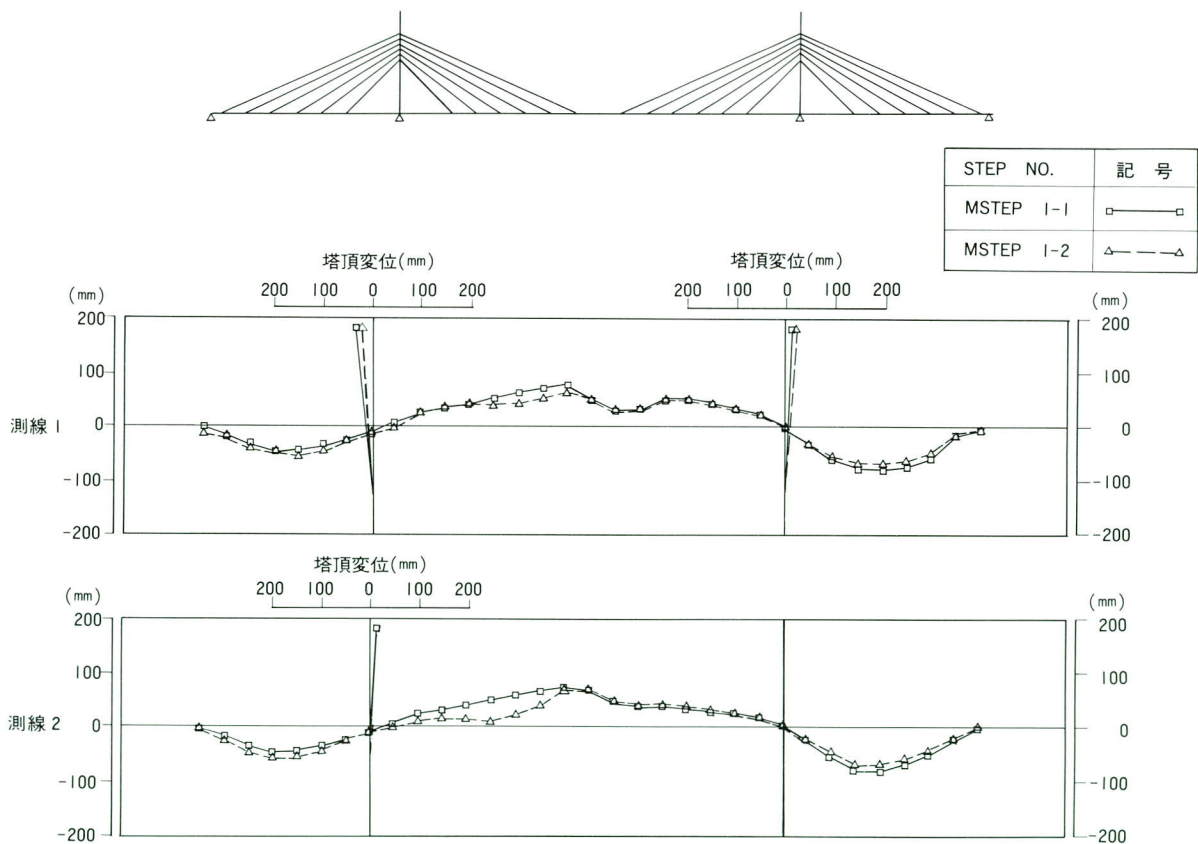


図-7 形状誤差図

(2) 最適シム決定および考察

最適シム決定では、重み付き最小二乗法を用いている。各ケーブル張渡し後、計測結果を基にした前述の誤差状

況および構造特性計算結果より、側径間の主桁形状を他の項目より重みを大きくして、当該ケーブルとその直下のケーブルの最適シム量を決定した。

閉合時は調整対象ケーブルの範囲を全体に拡げて、最

適シム量を計算し、その結果を用いて工学的に有意なシム量を現場の作業性を考慮して任意シム法によって決定した。

計測値の挙動、構造特性計算より、構造系としては当然のことながら、主塔と主桁を切離した方がシム量変化に対する形状変化の感度が良いといえる。

8. まとめ

現場でのシム調整量は、そこに至るまでの設計、製作、架設等の精度が基準になる。ケーブル張力、主塔の倒れ、主桁の形状等、全体のバランスの関係上、側径間の垂れ下がり傾向が認められたが、精度的には計画した値の中に収まった。

9. あとがき

本稿を執筆するに際して、茨城県水戸土木事務所の皆様にご協力戴いたことを紙上を借りて感謝いたします。

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) 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
- 3) 能登、西森、松田; 川津大橋(ニールセン橋)の架設時の精度管理、第46回年講概要集(1) 1991
- 4) 能登、町屋、山下; 新万代橋の架設時の精度管理、第47回年講概要集(1) 1992

グラビア写真説明

神戸高架橋

近年、現場工事の省力化・工期短縮・安全性の向上、更には環境保全への配慮から種々の試みがなされている。本橋の構造自体は極く一般的な連続鉄桁であるが、この様な試みの一環として一部分(4径間連続の部分)に塗装を上塗りまで工場で行う、いわゆる全工場塗装を採用している。3径間部分は下塗りのみを工場で行う通常の施工とし、両者の経年変化を追跡することによって塗模の性能面での全工場塗装の優位さを立証しようと計画されたものである。(高崎)

グラビア写真説明

香椎高架橋

本橋は福岡地区の交通緩和のために計画された有料の都市高速1号線である。博多湾の眺望はなかなかよい。この1号線は、昭和55年10月に香椎まで開通した。しかし、北九州へ延びる国道3号線上に位置し、又学園都市で東のベッタウンに隣接しているため、開通時よりも大幅な交通量増大を解消するために車の流れを分散する必要が発生した。その為、約1km延長する事になった。これが香椎高架橋そのものである。現場は一日中車輛が絶えないため夜間作業で交通規制がとられたが、安全面では問題なく自負する処である。平成5年4月2日に係わりがあった方々の切望の思いを込めて誕生の産声を上げようとしている。(矢野) 躍動を続ける横浜みなとみらい21計画の先陣を切って、中区北仲通りに出現した。横浜の代表的な建築であった生糸検査所を取り壊して、その跡地に建てたものである。低層部ファサードは、横浜市民の要望を入れて、生糸検査所の面影を偲ばせるレンガ造り様になっている。最近、この様に近代建築の中に、大正、昭和初期の様式を取り入れる方法が全国で行われるようになってきた。機能優先の時代から、昔の良い物は残そうという人々の心の落ち着きを示すものなのだろうか。横浜には、今も県庁、税関、開港記念館、県立博物館、郵船ビル等、大正、昭和初期の古い建築物が多い。これら歴史のあるビルと、当合同庁舎及び付近に最近完成した県警本部庁舎等の大型、高層、多機能ビルは、時代の移り変わりを見事に対比させてくれる。後年このビルの脇には、地下鉄みなとみらい線が通る事になっており、この付近も港に付随した倉庫の街から近代的オアシス街に変容しようとしている。