

(8) 斜張橋の形状管理に関する基礎的研究

STUDIES ON CABLE ADJUSTMENT SYSTEM OF CABLE STAYED BRIDGES UNDER CONSTRUCTION

田中俊明* 林 健治** 酒井吉永*** 井田 亨**** 古畑 晃*****

by Toshiaki TANAKA , Kenji HAYASHI , Yoshinaga SAKAI
Toru IDA and Akira HURUHATA

ABSTRACT

On cable stayed bridges, the designed stresses and cambers of girder and tower can be determined reasonably by prestressing the cables. As such bridges, however, are highly statically indeterminate, various errors to be caused at each construction stage produce serious effects on stresses and cambers. Generally, in cable stayed bridges, cable tensions must be adjusted to minimize various errors. In this paper, some simulations are carried out to prove the efficiency and applicability of the conjugate gradient method and weighted least square method as the estimation methods of optimum cable adjustments in view of the structural characteristics. Moreover, the availability of the estimation method is verified through the performance test of the cable adjustment system using a model bridge.

KEY WORDS : Cable Stayed Bridge, Optimum Cable Adjustment, Construction, Simulations, Model Test

1. はじめに

斜張橋は、主桁や主塔の形状および断面力がケーブル張力に鋭敏であるので、設計時において想定された構造系を実現するためには適正なケーブル張力の導入が必要とされる¹⁾。そのため、斜張橋では、一般に、架設段階からケーブル張力やキャンバーの計測値が設計計算値(管理値)に対して許容値内に入るようにシム調整を行い、架設形状の管理が実施されている²⁾⁻⁶⁾。したがって、架設時の形状管理において考慮すべき量として、ケーブル張力や着目点のキャンバーの残留誤差(計測値と管理値との差)があり、これらの誤差を可能なかぎり軽減することがシム調整の主な目的である。

最適シムの算定法として種々の方法²⁾⁻⁵⁾が提案され、架設シミュレーション解析および実橋への適用を通してその妥当性が検証されているが、その収束性および架設精度との関係についてはあまり検討されていないようである。本論では、最適シムの算定に共役勾配法²⁾と最小自乗法³⁾を用い、架設シミュレーション解析を通してこれらの手法の有効性を比較・検証し、その特性を明らかにする。また、最適シム算定法の収束性を、模型橋を用いた形状管理システムの性能評価実験により検討し、実橋への適用性を確認する。

* トビー工業(株)鉄構事業部設計部主査

** トビー工業(株)第一技術研究所主査

*** トビー工業(株)鉄構事業部設計部

**** トビー工業(株)鉄構事業部設計部

***** トビー栄進建設(株)架設本部架設工事事

2. 最適シム算定法

斜張橋の架設形状管理において、シム調整量に影響を及ぼす因子としてケーブル張力の残留誤差および着目点のキャンバーの残留誤差が挙げられる。一般に、最適シムの算定には、ケーブル張力の残留誤差を最小化する方法が採られている^{2), 5)}が、同法では主桁のキャンバーや塔の倒れを許容値内に抑えることができない場合もあることが指摘されており³⁾、その点を改良する手法としてキャンバーの残留誤差を考慮した最適化法⁵⁾と、ケーブル張力とキャンバーの残留誤差を考慮した最小自乗法に基づく最適化法³⁾が提案されている。ここでは、これらの手法の概要を述べることにする。

2.1 共役勾配法に基づく最適化

いま、 i 番目のケーブルを単位量 ($\Delta s_i = 1$) だけ調整したときの j 番目のケーブルの張力変化量を X_{ij} とすると、 X_{ij} を係数とする行列 X を用いてシム調整量 Δs による張力変化量 ΔT は次式で与えられる²⁾。

$$\Delta T = X \Delta s \quad (1)$$

ここに、ケーブル本数を n とすると、 ΔT と Δs は次式のようにになる。

$$\Delta T = \{\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_n\}^T, \quad \Delta s = \{\Delta s_1, \Delta s_2, \dots, \Delta s_n\}^T \quad (2)$$

シム調整量 Δs がケーブル長の誤差のみに起因している場合には、 Δs は式 (1) により決定することができるが、式 (1) を用いてシム量を決定すると、一般には、過大なシム量となることが多い²⁾。そこで、このような問題点を解決する方法として、各ケーブル張力の残留誤差 ε_i がその許容値 $\varepsilon_{\max}$ を超えない、という制約条件の下に Δs のノルムを最小にする ε_i を求めることにより、最適なシム調整量 Δs を決定する (共役勾配法に基づく) 方法が提案されている²⁾。すなわち、

$$\Delta s = X^{-1} (\Delta T + \varepsilon) \quad (3)$$

ここに、 ε は次式で与えられる。

$$\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n\}^T, \quad |\varepsilon_i| \leq \varepsilon_{\max} \quad (4)$$

つぎに、斜張橋のような柔な構造物では、架設の最終段階でキャンバー調整を必要とする場合があり、キャンバーの残留誤差 Δd に着目して、式 (3) と同様な方法によりシム調整量を決定する方法⁵⁾が提案されている。すなわち、

$$\Delta s = Y^{-1} (\Delta d + \varepsilon) \quad (5)$$

である。ここに、 Y は、 i 番目のケーブルを単位量だけ調整したときの任意点 j の変位 Y_{ij} を要素とする正則な行列である。

以上のケーブル張力とキャンバーに着目して独立に求めたシム調整量 (それぞれ Δs_1 、 Δs_2 とする) の加重平均を実際の調整量 (Δs) とする方法⁵⁾が提案されている。いま、ケーブル張力調整理論によるシムの重みを w とすると、 Δs は次式で与えられる。

$$\Delta s = w \Delta s_1 + (1 - w) \Delta s_2 \quad (6)$$

2.2 最小自乗法に基づく最適化

上述の最適化法では、予めケーブル張力やキャンバーの許容誤差を設定し、解を繰り返し計算により求めなければならない。このような点を改良したものが最小自乗法による最適シムの算定法であり、適切に選ばれた管理項目 (ケーブル張力、桁や塔の形状、断面力) の誤差応答を可能な限り零に近付けることがシム調整の目的である³⁾。

いま、シム量の変化に対応する管理項目の応答値を Z 、系の応答に対する影響度を表す行列 (影響マトリックスと呼び、 X 、 Y に対応する) を K とすると、

$$Z = K \Delta s \quad (7)$$

となる。ここで、ケーブル本数を n 、管理項目の数を m ($> n$) とすると、影響マトリックス K は m 行 n 列の矩形行列であり、直接、上式を解くことはできない。そこで、上式に対して最小自乗法を適用するととも

に、各管理項目の残留誤差をバランスよく減少させる、あるいは、設計者の希求水準を満足させるために重みを導入する。すなわち、重みを対角要素に並べた m 次元対角行列を P とすると、重み付き最小自乗法の正規方程式は次式で与えられる。

$$K^T P K \Delta s = K^T P Z \tag{8}$$

上式から明らかなように、繰り返し計算を実施することなく、この連立方程式を直接解くことにより最適シム調整量 Δs が求められる。

3. 架設シミュレーション解析

上述の解析手法の有効性を検証するために、図-1に示す解析モデル（次章の模型橋の最終架設ステップを想定した）を用いた数値シミュレーション（同図に節点番号とケーブル番号等を表示した）を実施する。桁やケーブル等の断面諸元を表-1の通りとし、解析条件として計測張力が管理値よりも10%小さい場合を考える。

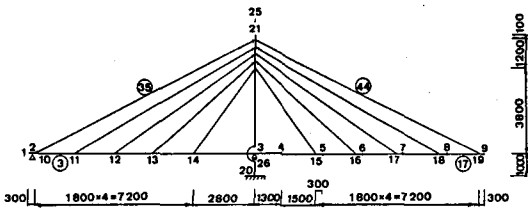


図-1 解析対象

表-1 断面諸元

	断面種 (m^2)	断面二次モーメント (m^4)	ヤング率 (ton/m^2)
桁	9.356×10^{-1}	1.331×10^{-4}	2.1×10^7
塔	3.120×10^{-1}	3.740×10^{-4}	2.1×10^7
ケーブル	2.124×10^{-5}	—	2.0×10^7

3.1 ケーブル張力調整理論

実用性から許容張力差の最大値 $\epsilon_{\max}$ について検討する。ここで、反復解に対して修正解の比が $1/100000$ 以内のとき、収束するものとした。図-2、図-3はそれぞれ $\epsilon_{\max}$ の増加に伴うシム調整量（ $\epsilon_{\max}=0$ におけるシム自乗和で無次元化した）と、残留張力差（ $\epsilon_{\max}=0.1$ の残留張力差の自乗和で無次元化した）の変化を示す。 $\epsilon_{\max}$ の増加により、シム調整量は減少し、逆に残留張力差は増加する。シム調整量と残留張力差を少なくするには松村ら²⁾が指摘するように $\epsilon_{\max} \cong 0.05$ が概ね適切である。

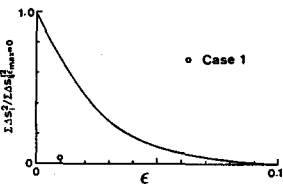


図-2 許容誤差とシム調整量

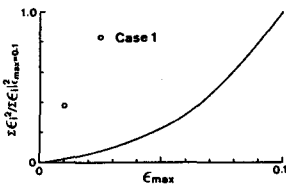


図-3 許容誤差と残留張力差

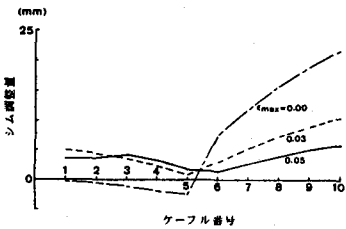


図-4 各ケーブルのシム調整量

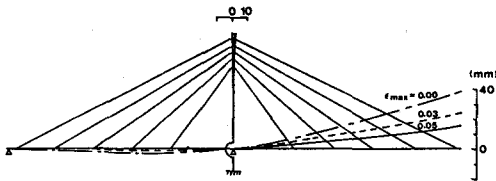


図-6 許容誤差に伴うキャンバーの変化

図-4、5は $\epsilon_{\max}=0.00, 0.03, 0.05$ における各ケーブルのシム調整量と張力変化量を示す。 $\epsilon_{\max}=0.05$ では、シム調整量

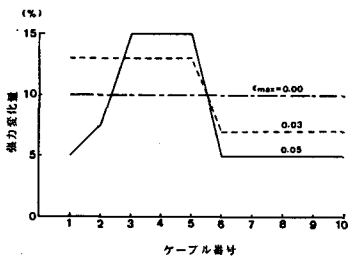


図-5 各ケーブルの張力変化量

は各ケーブル共にほぼ一定の値となっているが、残留誤差はケーブル2を除き $\pm 5\%$ となっている ($\varepsilon_{\max} = 0.00$ では、張力変化量が10%であるので、解析条件から明らかなように残留誤差は0%である)。図-6は、 $\varepsilon_{\max}$ をパラメータとしてキャンバー変化量の差異を調べたものである。 $\varepsilon_{\max} = 0.00$ では、極めて大きなキャンバー変化 (スパンの 1/500 を超える) を生じ、このような調整は実用的でないことが明らかである。しかしながら、 $\varepsilon_{\max} = 0.05$ ではキャンバーもかなり小さくなり、より実際の値を与える。なお、本計算例では $\varepsilon_{\max}$ が大きくなると反復回数は増加し、当然ではあるが $\varepsilon_{\max} = 0$ のとき1回、 $\varepsilon_{\max} = 0.05$ では2~3回、 $\varepsilon_{\max} = 0.10$ のとき約100回であった。

つぎに、張力変化量行列 X の要素について検討する。 X は次式のようになる。

$$X = \begin{pmatrix} 30.660 & -7.758 & -6.885 & -5.577 & -3.780 & 0.949 & 0.764 & 0.646 & 0.609 & 0.618 \\ -7.758 & 38.119 & -7.833 & -6.953 & -5.236 & 1.636 & 1.240 & 0.936 & 0.761 & 0.669 \\ -6.885 & -7.833 & 47.772 & -9.023 & -7.678 & 2.830 & 2.068 & 1.447 & 1.050 & 0.807 \\ -5.577 & -6.953 & -9.023 & 61.123 & -11.215 & 4.732 & 3.386 & 2.272 & 1.541 & 1.079 \\ -3.780 & -5.236 & -7.678 & -11.215 & 83.433 & 7.113 & 5.039 & 3.317 & 2.184 & 1.459 \\ 0.949 & 1.636 & 2.830 & 4.732 & 7.113 & 82.317 & -12.618 & -9.156 & -6.631 & -4.948 \\ 0.764 & 1.240 & 2.068 & 3.386 & 5.039 & -12.618 & 59.394 & -10.877 & -8.781 & -7.236 \\ 0.646 & 0.936 & 1.447 & 2.272 & 3.317 & -9.156 & -10.877 & 65.697 & -10.020 & -9.062 \\ 0.609 & 0.761 & 1.050 & 1.541 & 2.184 & -6.631 & -8.781 & -10.020 & 35.636 & -10.458 \\ 0.618 & 0.669 & 0.807 & 1.079 & 1.459 & -4.948 & -7.236 & -9.062 & -10.458 & 27.479 \end{pmatrix} \quad (9)$$

X の1~7行までは対角要素が他の要素の絶対値の総和より大きくなっているが、8~10列では小さく、対角優位の条件を満足しない。シム調整の誤差がケーブル長のみに依存する場合には、 X はシム調整量と線形関係が成立する (式(1)より) が、キャンバー誤差やその他の誤差が混入する場合には、誤差調整の観点からは、単にその影響度 (あるいは重み) を表していると言っても過言でない。そこで、 X の対角要素に重みを導入し、対角優位とすることを考える。これにより、各々の誤差を平滑化し、収束速度を早めることが期待される。

式(9)の対角要素に1.34~1.83の適当な重みを乗じる。上式を用いて解析した結果をCase1とし、前掲の図-2、図-3にその結果 ($\varepsilon_{\max} = 0.01$) を示している。ケーブル張力の残留誤差は、若干大きくなるが、シム調整量は非常に小さくなっている。また、このシム調整によるキャンバー変化量の最大は、桁自由端側で5mm以下であり、さらには、反復回数が別途実施した結果を含めても1~3回と、収束性は良好であった。以上の結果から、本計算例の範囲内では、対角要素に重みを導入する手法は有効である。

3.2 キャンバー調整理論

キャンバー調整の対象を、ケーブル番号6~10に対応する桁の鉛直方向変位と、塔の水平方向変位とし、桁側で計測値が管理目標値よりも自由端で5mm大きな値となっている場合 (塔基部で零であり、直線的に変化するものとする) を考える。解析の結果、 $\varepsilon_{\max} = 0.01$ とした場合、ケーブル番号6、7で1mを超えるシム調整を必要とし、また、反復回数は78と非常に多く、本計算例では、式(5)に基づくキャンバー調整は有効でない (式(10)に示すように、キャンバー変化量行列 Y の対角要素が非対角要素よりも小さな値となっており、収束性は張力調整理論よりも悪い)。

3.3 最小自乗法に基づく調整理論

ケーブル張力の管理値と計測値は3.1節の場合と同じとし、キャンバー調整の対象を3.2節の桁側と同一とした。ここで、キャンバー変化量行列 Y は次式で与えられる。

$$Y = \begin{pmatrix} 0.120 & 0.199 & 0.283 & 0.367 & 0.453 & -0.162 & -0.180 & -0.199 & -0.218 & -0.236 \\ 0.105 & 0.180 & 0.259 & 0.340 & 0.421 & -0.158 & -0.172 & -0.188 & -0.207 & -0.224 \\ 0.078 & 0.142 & 0.212 & 0.285 & 0.359 & -0.141 & -0.155 & -0.169 & -0.183 & -0.197 \\ 0.034 & 0.083 & 0.140 & 0.202 & 0.264 & -0.119 & -0.129 & -0.139 & -0.148 & -0.156 \\ -0.025 & 0.003 & 0.043 & 0.088 & 0.134 & -0.086 & -0.091 & -0.096 & -0.101 & -0.106 \\ 0.184 & 0.231 & 0.242 & 0.237 & 0.228 & 0.030 & 0.030 & 0.029 & 0.028 & 0.027 \\ 0.162 & 0.257 & 0.313 & 0.346 & 0.377 & 0.021 & 0.022 & 0.022 & 0.022 & 0.021 \\ 0.122 & 0.227 & 0.332 & 0.419 & 0.497 & 0.014 & 0.015 & 0.016 & 0.017 & 0.018 \\ 0.091 & 0.189 & 0.316 & 0.455 & 0.588 & 0.009 & 0.011 & 0.013 & 0.015 & 0.017 \\ 0.070 & 0.159 & 0.282 & 0.461 & 0.650 & 0.006 & 0.008 & 0.011 & 0.014 & 0.018 \end{pmatrix} \quad (10)$$

式(9)の X の対角要素の最大値に対する上式の Y の対角要素の最小値の比は約1/7500と非常に小さい。

それゆえ、適切な重みの導入が必要となる。いま、ケーブル張力の重みを w_t 、キャンバーの重みを w_c とする。 w_c/w_t の増加に伴うシム調整量の変化を図-7に示す。 w_c/w_t の増加とともにシム調整量は急激に減少し、 $w_c/w_t \approx 25$ を境として徐々に増加する。シム調整のみの観点からすると、重み係数比 $w_c/w_t = 25$ のとき最適であると言える。

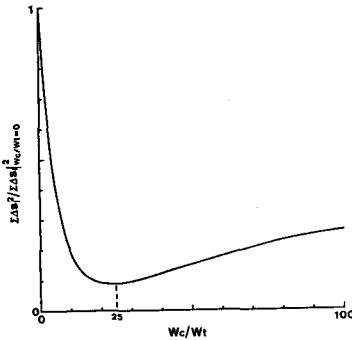


図-7 重み係数比とシム調整量

図-8はケーブル張力の重みを1とし、キャンバーの重みを0～50と変化させた場合の各ケーブル張力の変化量を示す。ここで、キャンバーの重みが0の場合は、3.1節の張力調整のみの場合に相当する。当然のことではあるが、重みが0の場合、各ケーブルの張力変化量はすべて10%（残留誤差0%）である。重みが大きくなるに従い、桁の張り出し部のキャンバーを拘束するため、逆に、ケーブル張力の残留誤差は大きくなる。図-9はシム調整によって生じるキャンバーの変化量を示す。キャンバーの重みを大きくすることにより、キャンバーの値をかなり小さくすることができる。

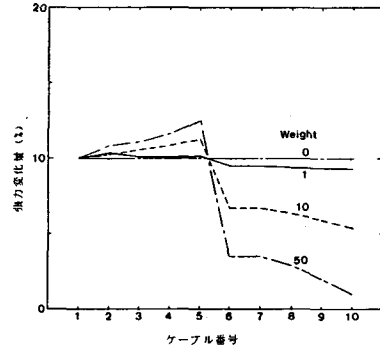


図-8 重み係数比とケーブル張力

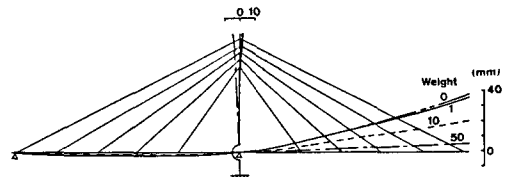


図-9 重み係数比の増加に伴うキャンバーの変化

以上の計算結果から明らかなように、ケーブル張力の調整を厳しくするとキャンバーの残留誤差が大きくなり、逆に、キャンバー調整を厳しくすると、ケーブル張力の残留誤差が増大する。したがって、架設シミュレーションを実施し、適切な条件（許容誤差や重み）を予め設定することが肝要である。本計算例では、張力調整理論と最小自乗法のいずれが有効であるかを明確にすることはできない。また、いずれの方法を用いても1回の計算で最適解が得られるという保証はない。しかしながら、種々の残留誤差を徐々に低減することができることは明らかであり、数回の調整で実用上十分な調整ができるものと期待される。

4. 形状管理システムの性能評価実験

斜張橋の架設形状管理を精度良く、しかも現場という制約条件の厳しい環境下で迅速に、実施するためには、架設段階での部材の剛性および荷重状態を正確に把握し、管理目標値を設定すること、ケーブル張力やキャンバーを精度良く測定すること（自動計測システムの開発）、目標値と計測値から最適なシム量を決定する解析システムを構築すること、および、これらのシステムを有機的に結合し、管理作業の統合化を計る（形状管理支援システムの開発）とともに、よりフレキシブルなシステムを構築することが不可欠である。著者らはこのような形状管理システムを開発し、今回、実橋規模に近いモデルを用い、最適シム算定法の妥当性および収束性を検証することを主な目的として、システムの性能評価実験を実施した。以下では、その概要を説明する。

4.1 実験方法

模型橋の一般図を図-10に示す。一面ケーブルの3径間連続斜張橋であり、張出し架設を想定して片側のみをモデル化した。桁、塔およびケーブルに使用した材料あるいは部材の断面諸元は表-1の値と同じである。ケーブル定着位置を基準として、製作時の精度を各定着位置について $\pm 1\text{mm}$ とし、特に、面外方向の変形を可能な限り抑えた（これは、最適シム算定システムの検証を主な目的としているので、製作誤差がシステム検証の障害とはならないようにするためである）。

実橋では、一般に、ケーブル張力の測定には加速度計が、桁のキャンバーや塔の倒れは3次元座標測定装置が使用されているが、上述の理由により模型橋ではケーブル張力をロードセル（シム挿入のための治具を試作し、 0.05mm の単位でシムを導入することができ、また、予め張力測定の予備試験を実施した結果から、電気出力により張力を測定することができる）とひずみゲージにより、桁のキャンバーを高精度変位計により、塔の倒れをセオドライトと傾斜計により測定した。また、熱電対により桁やケーブルの温度を、ひずみゲージにより桁や塔の応力を測定し、その値を監視した。これらのデータはデジタル自動静ひずみ計を介してマイコンに転送され、処理される。

式(9)の影響マトリックスの対角要素の単位は、シム量が 1mm （単位）の場合、 kg となる。ここで、ケーブル番号5に着目すると、シム導入単位が 0.05mm であるから $83.43 \times 0.05 = 4.17\text{kg}$ となり、これは表-3のSTEP-6の設計張力に対して0.6%の値となっている。したがって、測定誤差やシム導入誤差等が無視できる場合には、シム調整を繰り返すことにより、ケーブル張力の残留誤差を設計張力の0.6%に近い値まで抑えることが可能となる。なお、架設の初期段階（例えばSTEP-2）では、この値は1.4%である。

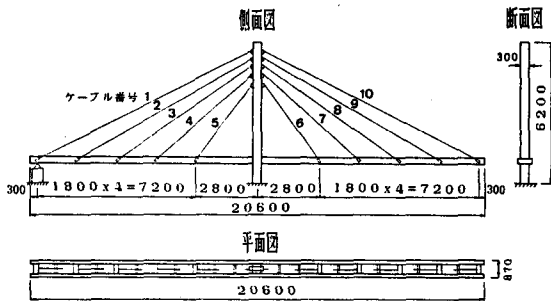


図-10 模型橋の一般図

4.2 架設ステップと管理項目

架設ステップを図-11に示すように選定した。ここで、模型橋では、鋼材を使用しているため、剛性が寸法比に比べてかなり高くなっている。そこで、実橋の変形状態に近付けるために、カウンターウェイトを同図に示すように載荷した。なお、STEP-6については有限変位解析を実施したが、片持ち端の鉛直方向変位について非線形解は線形解よりも最大0.5%、大きな値となっただけであり、非線形性は非常に弱く、以下の解析では無視することとした。

つぎに、管理目標値には、本州四国連絡橋公団の岩黒島橋で採用された値⁶⁾を参考に表-2に示すようなより厳しい値を用いた。桁のキャンバーは主径間長（模型橋では20m）の $1/4000$ 、塔の倒れは塔の高さの $1/2000$ 、ケーブル張力は許容張力の5%以内の誤差、ケーブルと桁あるいは塔の温度差は 1°C 以内（温度差が 1°C 以内であれば、それが形状管理パラメータに及ぼす影響は小さく、無視して差し支えない）とした。

4.3 解析結果の精度

STEP-1において、予め載荷試験および継手（各架設ステップにおいて桁と桁をボルトにより接合する）性能試験を実施し、表-1の桁と塔の剛性がほぼ妥当なものであることを確認した。

表-2 管理目標値

項目	管理目標値	
	本四公団	模型橋
キャンバー	$\delta \leq \pm (25 + 0.25(L-50))$ L: 支間長 (L=24.5, 2: 跳出距離) 岩黒島橋: 中央径間420m $\delta \leq \pm 117.5\text{mm}$ $\delta/L = 1/3574$	$\delta = 10\text{mm}$ $\delta/L = 1/4000$ $\delta \leq \pm 5\text{mm}$
塔の倒れ	$\delta \leq \pm H/2000$ H: 塔高 岩黒島橋: 148.1m $\delta \leq \pm 75\text{mm}$	$\delta \leq \pm H/2000$ 塔高6.1m $\delta \leq \pm 3\text{mm}$
ケーブル張力	許容張力の5%以内の誤差	同左
温度変化		ケーブルと桁の温度差 1°C 以内
応力	参考値として計算値と比較	同左

つぎに、この結果を受けてさらに、完成系についてケーブル番号1～3に単位シムだけ導入したときの各ケーブル張力の変化を調べた。その結果を図-12の(a)～(c)に示す。ここでは、単位シムを導入した箇所のケーブル張力変化量 X_{ij} で無次元化した値について解析結果（この値は式(1)のケーブル張力変化量行列 X の要素と一致する）と実験結果を比較している。両者は良好に一致（誤差1%以内）し、表-1の断面諸元や支持条件などの解析仮定の妥当性は明らかである。

4.4 実験結果と考察

最適シム算定法には、3.1節で述べた張力調整行列 X の対角要素に重みを導入した手法を用いた。表-3は、ケーブル張力の残留誤差に着目して、各ステップにおけるシム調整量、初期計測張力、調整後の計測張力、設計張力（管理目標値）および設計張力に対する調整後の計測張力の比を示したものである。各ステップともに調整により残留張力差が3%以内となっている。初期設計張力と設計張力を比較すると、架設の初期段階ではその差が大きく、完成系に近づくに従い、その差は小さくなる。また、残留誤差も完成系の方が小さくなる傾向がある。

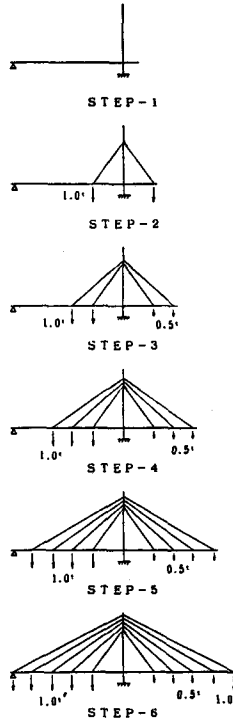


図-11 架設ステップ

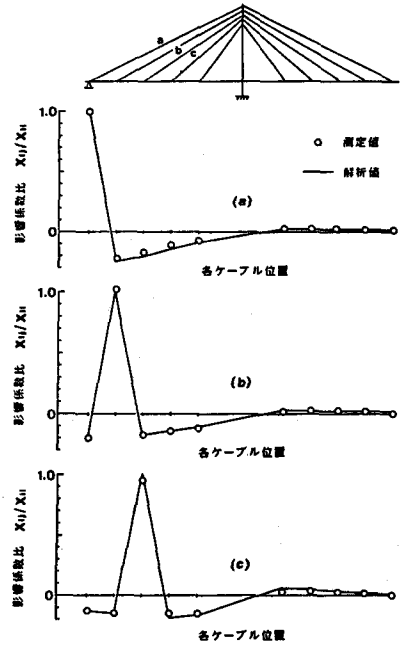


図-12 単位シム量による各ケーブルの影響値

表-3 各架設ステップのシム調整量とケーブル張力

ケーブル番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
設計最大張力		827	908	972	954	739	836	1194	1112	1217	1258
架設段階	STEP-2					-0.90 420 250 244 (1.02)	-1.00 507 374 374 (1.00)				
	STEP-3				-0.50 367 344 338 (1.02)	-0.35 314 365 377 (1.02)	-0.25 298 327 336 (0.97)	0.80 374 395 408 (0.97)			
	STEP-4			-0.30 404 378 391 (0.97)	-0.70 486 484 501 (0.97)	-0.45 456 467 482 (0.99)	-0.25 538 519 525 (0.99)	0.70 704 668 682 (0.97)	0.75 408 443 456 (0.97)		
	STEP-5		-1.60 551 481 477 (1.01)	-0.40 563 604 602 (1.00)	-0.75 642 670 677 (0.99)	-0.45 546 588 590 (1.00)	-0.60 656 643 643 (1.00)	0.25 885 874 872 (0.99)	0.05 713 681 691 (0.99)	1.35 658 709 725 (0.98)	
	STEP-6	-1.25 876 835 827 (1.01)	-2.10 901 915 908 (1.01)	-0.55 951 978 972 (1.01)	-0.85 940 951 954 (1.00)	-0.55 728 737 739 (1.00)	-0.35 846 844 836 (1.00)	0.55 1199 1187 1194 (1.00)	0.35 1126 1115 1112 (1.00)	2.15 1225 1218 1217 (1.00)	1.15 1204 1241 1258 (0.99)

図-13は、製作時の状態からシム調整を実施した場合と、シム調整終了時から強制的にケーブル番号1と10のシム量を5mmアップさせた場合およびダウンさせた場合について、調整回数が増加すると、残留張力差がどのように変化するかを調べたものである。いずれの場合も1回目の調整で許容値内に入り、数回の調整で残留誤差が急激に減少する。また、初期の残留誤差が20%と、かなり大きな場合でも1回の調整でほぼ満足の状態になる。以上のように、ケーブル張力の残留誤差から判断する場合、本最適シム算定法は妥当で

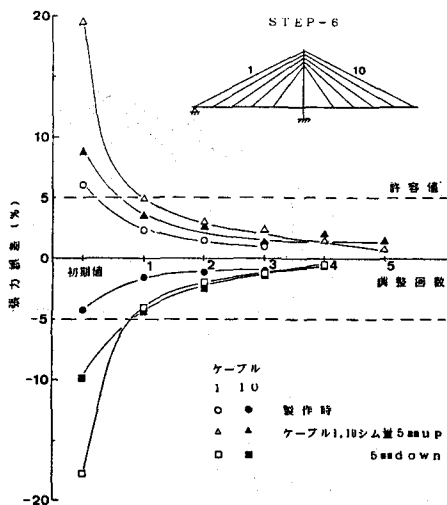


図-13 調整回数の増加に伴う残留張力差の変化

あり、算定システムとして実用上十分な性能を有することが確認された。なお、シム導入の基本単位(0.05mm)から判断すると、STEP-6では残留張力の誤差限界は設計張力に対して約0.6%であり、図-13の結果は明らかにこのことを満足するものである。したがって、管理値の解析誤差や計測誤差等が無視できる場合には、ケーブル張力の導入精度はシム導入の基本単位に依存する。また、シム調整回数の増加とともに残留張力差は誤差限界に収束する。

つぎに、図-14は各ステップにおけるシム調整前後の桁や塔の形状を示す。各ステップともにシム調整前後において桁のキャンバーや塔の倒れは許容値内にあり、製作誤差を小さくすることにより、キャンバー誤差を十分小さくできるものと推察される。図-15は、図-13と同様に製作時の状態からシム調整を実施した場合と、シム調整終了時から強制的にケーブル番号1と10のシム量を5mmアップさせた場合およびダウンさせた場合について、調整回数の増加によりキャンバー誤差がどのように変化するかを調べたものである。キャンバー誤差についても調整によりその値を小さくすることができ、本最適シム算定法は有効であると考えられる。なお、図中に解析による推定結果も併せて示しているが、実験結果と良好に一致していることから、架設シミュレーションの有効性を示すものと判断される。

以上の結果から、本最適シム算定システムの有効性は明らかである。

5. まとめ

本論では、斜張橋の架設シミュレーション解析を実施し、共役勾配法および最小自乗法に基づく最適シム算定法の妥当性を検証するとともに、最適シムの算定に関する2、3の検討を行った。また、実橋規模に近

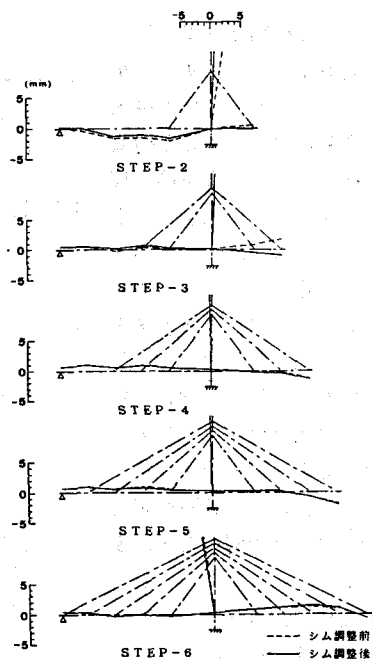


図-14 シム調整によるキャンバー変化

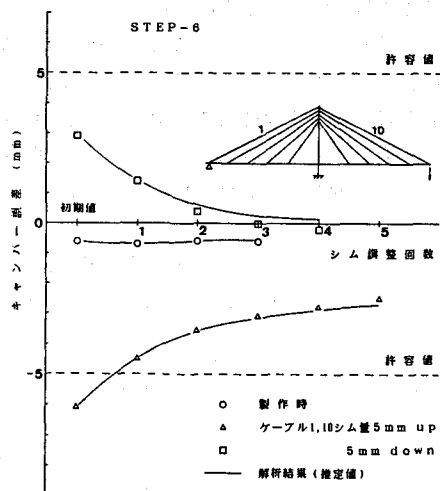


図-15 調整回数に伴う残留張力差の変化

い模型橋の架設形状管理実験を行い、最適シム算定法の収束性および適用性に関する検討を実施した。その結果を要約すると次のとおりである。

(1) ケーブル張力の調整を厳しくするとキャンバーの残留誤差が大きくなり、逆に、キャンバー調整を厳しくするとケーブル張力の残留誤差が増大する。本研究の範囲内では、キャンバー調整理論の適用は妥当でない。また、張力調整理論と最小自乗法のいずれが有効であるかを明確にすることはできない。

(2) 影響マトリックスの対角要素に重みを導入した方法は、張力調整理論を適用した場合と比較して有効であり、また、収束性も良好である。但し、重みの導入値については今後十分な検討を要する。

(3) 本実験の範囲内では、本最適シム算定法は良好な収束性を示し、その有効性は明らかである。

(4) ケーブル張力の導入精度は、シム導入の基本単位に依存する。

参 考 文 献

- 1) 長井正嗣、赤尾宏、佐野信一郎、井澤衛：3径間連続マルチケーブル斜張橋の基本形状決定に関する一考察；土木学会論文集、No.362(1985)、pp.343-352
- 2) 松村博、新家徹、頭井洋、寺西功：斜張橋のケーブル張力計測と張力調整；橋梁と基礎、79-8(1979)、pp.30-36
- 3) 藤澤伸光：斜張橋架設時のシム決定方法；橋梁と基礎、84-9(1984)、pp.17-22～84-10(1984)、pp.41-45
- 4) 加地健一、井上幸一、谷川浩司、富田昇、板谷哲秀：斜張橋の架設精度管理システム；三菱重工技報、Vol.24、No.4(1987)、pp.364-369
- 5) 高橋功、斉藤孝志、吉岡国彦、岸野勝：ぼたん橋の設計と施工；橋梁と基礎、83-2(1983)、pp.14-19
- 6) 銭広幸壮、石倉善弘、竹中昌一、滝口一：岩黒島橋架設工事報告；横河橋梁技報、No.17(1988)、pp.123-138