

多目的計画法を用いた斜張橋の架設時精度管理システム に関する研究

STUDIES ON THE MANAGEMENT SYSTEM OF CABLE STAYED BRIDGES UNDER CONSTRUCTION USING MULTIOBJECTIVE PROGRAMMING METHOD

古川浩平*・井上幸一**・中山弘隆***・石堂一成****

By Kohei FURUKAWA, Kohichi INOUE, Hirotaka NAKAYAMA and Kazushige ISHIDO

The designed stresses and cambers of cable stayed bridges must be determined based on its designed values by adjusting cable lengths under construction. To adjust the cables, many requirements such as cambers, cable tensions, workabilities and so on must be simultaneously taken into consideration. This results in difficulty to determine the optimum cable adjustments on the balance of these requirements. In this study, an attempt is made to determine the optimum cable adjustments by applying the multiobjective programming method. Some simulations are carried out to demonstrate the efficiency and applicability of the method developed herein. The results show that the proposed method is very reliable and available to determine the optimum cable adjustments.

Keywords: cable stayed bridge, multiobjective programming, management system, cable adjustment

1. 緒 言

斜張橋は架設時にケーブル張力および橋梁のたわみ形状(キャンパー)が、その架設段階における計画値に一致するようにケーブルの定着点間距離の調整(シム調整)を行っている。このような架設精度管理を主要な架設段階で行うことにより、完成時に所定の精度で設計時の応力状態、たわみ形状の実現を図っているのである。

この架設精度管理において考慮すべき量には、精度に関するものとしてケーブル張力の残留誤差とキャンパーの残留誤差、作業性に関するものとしてシム調整量とシム調整箇所数がある。厳密には、桁および塔の応力度も管理すべきであるが、現実には架設中に各部応力を計測することが困難であること、また、ケーブルに所定の張力が導入されていれば桁や塔も所定の応力状態にあると考えられることから、一般には桁および塔の応力度は直接には管理の対象としていない。そして上述の考慮すべ

き量はいずれもできる限り小さいことが望ましいものである。すなわち、数理計画法でいう目的関数として設定され得るものであるが、一般に精度を優先すれば作業性が犠牲になり、逆に作業性を優先すれば精度が低下するという互いに相反する性質をもっている。この両者が適切にバランスしたシム調整量を求める必要があるが、この解を見出すことは容易ではない。

最近、シム調整量の算出に数理計画法を適用しようとするいくつかの試みがなされるようになってきた^{1),2)}。これは、架設精度管理に関する各項目がいずれも最小化を図るべき目的であるという考えに基づくものであるが、合理性あるいは実用性の観点から考えると、改善すべき点が残されている。

文献1)においては精度については目的とせず、ケーブル張力の許容誤差を制約条件として、この範囲内で目的関数であるシム調整量の二乗和を最小化している。この方法は一見作業性になり重点を置いているように思えるが、シム量調整点 i, j でのシム調整量が 20 mm と 0 mm という解と 10 mm と 10 mm という均一化された解では後者の方が目的関数値が小さくなるために、この解が得られる可能性が高く、真に作業性の向上につながっていない。実際には、シム調整量が 10 mm でも 20 mm でも作業労力や時間に大差はなく、調整を行う必要

* 正会員 工博 山口大学助教授 工学部建設工学科
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

** 正会員 工修 三菱重工業(株) 広島製作所鉄構部橋梁設計課
(〒733 広島市中区江波沖町)

*** 工博 甲南大学教授 理学部応用数学科
(〒658 神戸市東灘区岡本 8-9-1)

**** 工博 三菱重工業(株) 技術本部システム技術部 CAD・CAM 技術課 (〒652 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)

があるか否かが重要なのである。さらに、この研究ではキャンパーの誤差は直接扱われておらず、張力とキャンパーの両誤差を扱う場合に問題がある。

これに対し文献2)では、ケーブル張力とキャンパーの残留誤差を考慮し、これらをともに無次元化した二乗和を目的関数としている。この場合、無次元化したとはいえ本来物理的な意味の異なるものの二乗和を目的関数としており合理性に欠けると、これらを目的関数にするときの重みの決定に問題があると考えられる。たとえば張力とキャンパーのどちらを重視するかといった問題に対してあらかじめ明解に答えることは難しい。また、作業性については注意が払われておらず、施工不可能な過大なシム調整が算出されることを、その二乗和をさらに目的に加えることで防ぐといった程度で実用的ではない。

以上のように、現在提案されているシム調整量算出法が実用性あるいは合理性の観点から問題が残されていると思われる最大の原因は、本来多目的問題であるシム調整量算出問題を単一目的の問題として扱っていることにあると考えられる。架設精度管理に考慮すべき4種類の量、すなわち、ケーブル張力の残留誤差、キャンパーの残留誤差、シム調整量およびシム調整箇所数は全体として最小化したいのは当然であるが、さらに各ケーブル張力あるいは各キャンパー着目点1つ1つについても、その応答も考慮したうえで意思決定者は最適化を行いたいと考えているはずである。これを単一目的の数値計画問題として扱う以上、おのおのの値についての注意が払えず、全体として考えるか、あるいは物理的な意味を無視して目的を設定するしか方法がないのが実情であろう。

本研究では、本来多目的であるシム調整量算出の問題は多目的計画法の問題として扱うべきであるという立場に立ち、実用的かつ合理的な手法を提案する。多目的計画法の解法は数多いが^{3),4)}、意思決定者の選好関数の決定が難しく、構造最適化への応用は少ない⁵⁾⁻⁷⁾。本研究では、選好関数を決定する必要がないため、構造最適化では現在最も実用的と考えられる『満足化トレードオフ法』^{7),8)}を適用し、最適化を行う。

また、調整箇所数については、これを直接目的関数とすれば混合整数計画法を用いて解く必要があるが、本研究で提案する方法では調整箇所数の減少は制約条件と希求水準を利用して行うこととした。混合整数計画法を適用すれば問題は数学的に明解になるが、一般に収束が悪く、取り扱いが困難である。調整箇所数を目的から除外すれば後で述べるようにサブシステムの最適化に線形計画法が適用でき、計算時間の大幅な短縮化が可能となる。さらに大型計算機を使用せず架設現場でのマイクロコンピュータ等により精度管理が可能になるという実用上の

メリットもあり、調整箇所数を目的関数からはずしている。

以下、2. では多目的計画法の一つである満足化トレードオフ法について簡単に述べ、3. では多目的計画問題としての最適シム量算出の定式化を行い、4. でシミュレーション結果を示す。最後に5. で結論を述べる。

2. 満足化トレードオフ法

多数の目的関数 $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$ を最小化しようとする場合、一般にはすべてを同時に最小化するような解は得られない。したがって多目的最適化では、ある目的をそれ以上改善しようとするには他の目的を犠牲にせざるを得ないというぎりぎりの状態を考慮することになる。このようなぎりぎりの状態を Pareto 最適状態とよび、その状態を実現する解を Pareto 解とよぶ。一般に Pareto 解は唯一ではなくある集合となって存在する。

一方、意思決定者がある目的関数をどこまで実現したいかという水準（これを希求水準とよび \hat{f}_i で表わす）を各目的関数について設定し

$$f_i(x) \leq \hat{f}_i \dots \dots \dots (1)$$

を満たす解を満足解とよぶことにすると、満足解も唯一ではなくある集合となって存在する。意思決定解は、これら Pareto 解と満足解の積集合、満足 Pareto 解の中に存在するはずである。満足化トレードオフ法ではこの満足 Pareto 解の中から1つの解を選び出すための尺度として満足度というパラメーターを導入している。この満足度は現在の解に対する意思決定者の満足度を表わすものであり、これがすべての目的について同程度になったものが意思決定解の候補として求まる。意思決定者はこの解に対し不満足であれば希求水準を再設定して新たな満足 Pareto 解を求める。このように、希求水準の再設定を繰り返して満足 Pareto 解の中から意思決定解を見出そうとするのが満足化トレードオフ法である⁸⁾。言い換えれば、満足化トレードオフ法では、意思決定解の探索の過程で得られたいかなる解もそのときの希求水準に対する Pareto 解になっており、したがって満足できる解を求めようとして、ある目的の水準を高めようとするればその代わりに水準が低くなる目的があり、解の探索は各目的の改善と緩和、すなわちトレードオフによって進められることになる。

このトレードオフにおいて、意思決定者は価値判断を要求されるがこれは可変である。すなわち、得られた解が当初の考えからみれば満足すべきものであったとしても、全体のバランスからさらに改善したいと思うことがあるかもしれないし、逆に不満足なものであっても、もはやそれ以上改善はできないものと考え妥協することも

あるかもしれない。いずれにしても、意思決定者は、全体のバランスを把握しながら容易に納得のできる解に到達することが可能である。構造設計における意思決定者は一般に設計の熟練者であることが多く、設計に関する各要因を見比べながら上記の作業を容易に行い得る。

満足化トレードオフ法のアルゴリズムは以下に示すとおりである。

ステップ1 理想点の設定

各目的関数について、理想点 $(f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)$ を設定する、ただし、 f_i^* は十分小さい数で現実を考慮する必要はない。

ステップ2 希求水準の設定

各目的関数について希求水準 \hat{f}_i^k (k は第 k 回目の希求水準を示し、最初は $k=1$) を意思決定者に尋ねる。希求水準は実際の状況を考慮した現実的な値とするが、実行可能性が厳密にチェックされたものでなくてもよい。

ステップ3 Min-Max 解

$$\omega_i^k = 1 / (\hat{f}_i^k - f_i^*) \text{ として Min-Max 問題}$$

$$\text{Min } Z \dots \dots \dots (2)$$

$$\omega_i^k (f_i - f_i^*) \leq Z \quad (i=1, 2, \dots, n) \dots \dots \dots (3)$$

を解き、この解を x^k とする。Min-Max 問題の解は最悪成分を改善しようとするため、すべての目的を均一化するという解釈ができる。 $\omega_i^k (f_i - f_i^*)$ は f_i の理想点への正規化された非達成度とみることができるから、この解は各目的の満足度が同程度となったものとなっている。

ステップ4 トレードオフ

$f_i(x^k)$ を意思決定者に提示し、満足であれば実行を終了する。不満足であれば各目的を、もっと水準を高めたい目的、そのために犠牲にしてもよい目的および現状のままでもよい目的にクラス分けしてもらおう。さらに、その改善あるいは緩和する目的に対して、新たな希求水準 \hat{f}_i^{k+1} を設定しステップ3へ戻る。

このように、希求水準を入力する段階で意思決定者である設計者の意図や経験をうまく取り入れることができる。

3. 多目的計画問題としての最適シム調整量算出法

(1) 目的関数と制約条件

架設精度管理において考慮すべき量として

- ① 各ケーブル張力の残留誤差
- ② 各着目点のキャンパーの残留誤差
- ③ 各ケーブルのシム調整量
- ④ シム調整箇所数

があるが、本研究では計算時間、取り扱いの容易さを考

慮して線形計画問題として定式化をするため、直接目的関数とするのは①、②および③とし、④の減少という要求の実現については別途考慮するものとする。その手法に関しては(3)で述べる。

いま、シム調整を行う際のケーブル剛性の変化を無視して構造に線形性を仮定すると、シム調整に対するケーブル張力およびキャンパーの影響値を使用することができる。したがって、ケーブル張力の残留誤差とキャンパーの残留誤差はシム調整量の1次関数として表わすことができる。

n をケーブル本数とし、 $\Delta T_i (i=1, 2, \dots, n)$ をケーブル張力の計画値と実測値との差とする。また、第 k ケーブルに単位長さのシム調整を行ったときの第 i ケーブルの張力変化を X_{ik} とすると、各ケーブルに $\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_n$ だけシム調整を行った場合にケーブルに残留する張力誤差は

$$p_i = |\Delta T_i - \sum X_{ik} \cdot \Delta l_k| \quad (i=1, 2, \dots, n) \dots \dots \dots (4)$$

と表わされる。

一方、キャンパーについて、 m をその着目点の数、 $\Delta Z_j (j=1, 2, \dots, m)$ をその計画値と実測値との差とする。また、第 k ケーブルに単位長さのシム調整を行ったときの第 j 着目点のキャンパー変化を Y_{jk} とすると、各ケーブルに $\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_n$ だけシム調整を行った場合のキャンパーの残留誤差は

$$q_j = |\Delta Z_j - \sum Y_{jk} \cdot \Delta l_k| \quad (j=1, 2, \dots, m) \dots \dots \dots (5)$$

と表わされる。

さらに、シム調整量については

$$r_i = |\Delta l_i| \quad (i=1, 2, \dots, n) \dots \dots \dots (6)$$

なる目的関数として取り扱うと同時に、ケーブル定着部の構造などから決まるシム調整量の上・下限制約条件

$$\Delta l_{li} \leq \Delta l_i \leq \Delta l_{ui} \quad (i=1, 2, \dots, n) \dots \dots \dots (7)$$

を考慮しなければならない。ここに $\Delta l_{li}, \Delta l_{ui}$ はおのおの第 i ケーブルのシム調整量の下・上限値である。

なお、実際はこれらの実測値に計測誤差が含まれているが本研究ではこの誤差を無視して以下の計算を行う。

(2) 満足化トレードオフ法における Min-Max 問題への変換

前述の式(4)~(6)の $2n+m$ 個の目的関数および式(7)の n 個の制約条件を2. 満足化トレードオフ法のアルゴリズムのステップ3で示した Min-Max 問題に変換する。これは理想点に最も近い許容解を求める問題となる。式(4)~(6)をそれぞれ最小にする Δl_i をみつけるために

$$D_i = (f_i - f_i^*) * \omega_i = (f_i - f_i^*) / (\hat{f}_i - f_i^*) \dots \dots \dots (8)$$

なる満足度とよばれる補助的スカラー量 D_i を導入する。この満足度の導入により、 p_i, q_j, r_i のように、物理的意味の異なる多数の目的を同一レベルで扱えるよう

になり、先の多目的の問題はある希求水準に対して、どの目的も同程度に満足され、かつ、満足度が最大である解を求めようとする問題に帰着される。すなわち満足度 D_i を最適化 (D_i の最大値を最小にする) する単一目的の問題に置換され、従来の計画法による取り扱いが可能となる。この結果、先の $2n+m$ 個の目的関数を有する多目的計画問題は以下のように定式化できる。

目的関数 $F=D \rightarrow \min \dots\dots\dots (9)$

制約条件 $D_i \leq D \quad (i=1, \dots, 2n+m) \dots\dots\dots (10)$

$\Delta l_{vi} \leq \Delta l_i \leq \Delta L_{vi} \quad (i=1, \dots, n) \dots\dots\dots (11)$

その際、収束の容易さを考慮すると、線形計画法による最適化が最も有利である。しかし式(4)~(6)の目的関数で絶対値をとっているため、このままでは線形計画法としての定式化は行えない。そこで非負の補助変数 $p_i^+, p_i^-, q_j^+, q_j^-, r_i^+, r_i^-$ を導入し、次のように定式化を行う。

① 目的関数 (最小化)

$$F = D + \alpha \left(\sum \frac{p_i^+ + p_i^- - p_i^*}{\hat{p}_i - p_i^*} + \sum \frac{q_j^+ + q_j^- - q_j^*}{\hat{q}_j - q_j^*} + \sum \frac{r_i^+ + r_i^- - r_i^*}{\hat{r}_i - r_i^*} \right) \rightarrow \min \dots\dots\dots (12)$$

② 制約条件

$$\frac{p_i - p_i^*}{\hat{p}_i - p_i^*} \leq D \quad (i=1, \dots, n) \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{q_j - q_j^*}{\hat{q}_j - q_j^*} \leq D \quad (j=1, \dots, m) \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{r_i - r_i^*}{\hat{r}_i - r_i^*} \leq D \quad (i=1, \dots, n) \dots\dots\dots (15)$$

$$p_i = p_i^+ + p_i^- \quad (i=1, \dots, n) \dots\dots\dots (16)$$

$$q_j = q_j^+ + q_j^- \quad (j=1, \dots, m) \dots\dots\dots (17)$$

$$r_i = r_i^+ + r_i^- \quad (i=1, \dots, n) \dots\dots\dots (18)$$

$$p_i^+ - p_i^- = \Delta T_i - \sum X_{ik} \Delta l_k \quad (i=1, \dots, n) \dots\dots\dots (19)$$

$$q_j^+ - q_j^- = \Delta Z_j - \sum Y_{jk} \Delta l_k \quad (j=1, \dots, m) \dots\dots\dots (20)$$

$$r_i^+ - r_i^- = \Delta l_i \quad (i=1, \dots, n) \dots\dots\dots (21)$$

$$\Delta l_{vi} \leq \Delta l_i \leq \Delta L_{vi} \quad (i=1, \dots, n) \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 p_i^*, q_j^*, r_i^* はそれぞれ p_i, q_j, r_i の理想点、また $\hat{p}_i, \hat{q}_j, \hat{r}_i$ はそれぞれ p_i, q_j, r_i の希求水準である。

目的関数として式(12)を利用するのは次の理由による。すでに述べたように本問題は式(4)~(6)の目的関数に絶対値を考えているため

$$p_i^+ p_i^- = 0, q_j^+ q_j^- = 0, r_i^+ r_i^- = 0 \dots\dots\dots (23)$$

でなければならない。この関係は線形関係ではなく、これを制約条件に入れると線形計画法を用いることができなくなる。

線形計画法と非線形計画法では収束に要する計算時間、に大きな差があり、そのうえ、線形計画法はほとんどの

計算機に汎用サブルーチンが備えられ、プログラミングの手間を省くことができる。これらのため線形計画法が利用できることは大きなメリットがある。ところが幸いなことに目的関数として式(12)を採用すれば、目的関数は $p_i^+, p_i^-, q_j^+, q_j^-, r_i^+, r_i^-$ の単調増大関数となり、得られた解が自動的に式(23)を満足していることが証明される⁹⁾。なお、この第2項の係数 α は本来の目的関数 D の最小化に対する影響ができる限り小さくなるような十分小さい正数とする。この α には通常 10^{-10} 程度の値が用いられ、本研究でもこの値を用いた。

(3) シム調整箇所数の減少

本研究では、シム調整箇所数については直接目的関数としていない。しかし、現実問題としてはシム調整に要する作業量の大半は調整するためのジャッキの移動・据付けであり、ジャッキを据え付けた後、調整量の大小による作業量の差はほとんどなく、シム調整量の減少よりもむしろシム調整箇所数の減少がより重要である。斜張橋は高次の不静定構造物であり、同程度の架設精度を確保できるシム調整量の組合せは多数存在し、その中にはシム調整箇所数が少ないものも存在するはずである。

本研究の手法において、実行可能なシム調整箇所数減少を図る方法としては次の2つが考えられる。

① 希求水準による方法

満足化トレードオフ法の反復の過程で得られたシム調整量の解のうち、その値の小さいものに対する希求水準を他に比べ特に厳しく設定して新たな解を求める。この方法では、シム調整量を完全に零にすることはできないかもしれないが、実用上零とみなせる程度まで低減させることは可能と考えられる。

② 制約条件による方法

①の方法における希求水準の代わりに制約条件を用いる。すなわち、値の小さなシム調整量に対する制約条件の上・下限値 $\Delta l_m, \Delta l_n$ の両者を零にし、シム調整量を強制的に零におさえてしまうものである。

上記①あるいは②の方法を繰り返し実行することによってかなりのシム調整箇所数の減少が期待できる。なお、実際の使用においては①と②の方法を併用するのが最も効果的であろう。これについては、4.の数値計算例で検討する。

また、②の方法はシム調整箇所数減少という点以外にも有用である。たとえば、ある架設段階においては、その段階で施工されたケーブル1本のみの調整で精度管理を行うケースもしばしばみられる。そのような調整箇所が限定された場合にも適用できる。さらに、限定された箇所での調整のみで所定の精度が確保できないような状況に対しても、必要な精度を得るまで順次調整を行うケーブルを増加させてシム調整量を算出することも可能であ

る。

4. 数値実験および考察

(1) 計算結果

本研究で提案した方法を適用して行った数値実験の結果を示す。計算例の対象としたのは図-1に示す総数26本のケーブルを有するマルチケーブル斜張橋の架設系である。この系のキャンパー着目点は15か所であり、それを図-1に●印で示し、ケーブル番号を図の左から順に付すことにする。よってこの問題は、67個の目的関数を有する多目的最適化問題となる。

まず本研究で提案した手法の妥当性、有効性を明らかにするために、3本のケーブル長のみには誤差が存在するケース1の検討を行い、次いでケース2で本手法をより実的なモデルに適用する。

a) ケース1

計画どおりの応力、形状を示す構造系において、1, 13, および17番の3本のケーブルのみに、それぞれ -20°C 、 $+10^{\circ}\text{C}$ および -12°C の温度変化を与えた状態を構造解析により求めて、これを実測値データとした。すなわち、このケースはケーブル長にのみ誤差を有するモデルであり、その誤差量はケーブル1, 13, 17の順に $+39.4\text{ mm}$ 、 -6.1 mm 、 $+11.2\text{ mm}$ である。この誤差により生じたキャンパーおよび張力の初期設定誤差を図-2に示す。キャンパーで約60 mm、張力で約30 tの誤差が生じている。同図中、温度変化を与えたケーブルを太線

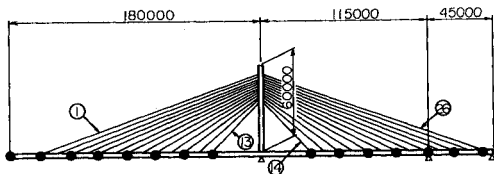


図-1 数値計算の対象とした斜張橋モデル

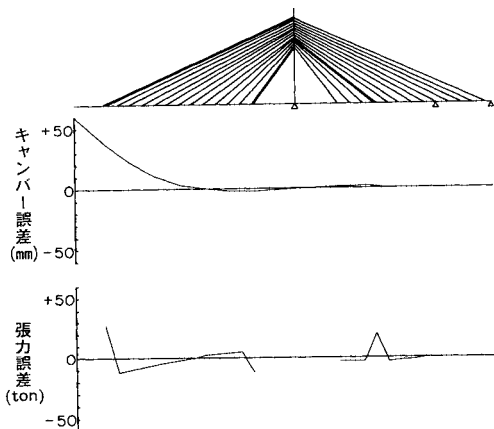


図-2 ケース1の初期設定誤差

で示してある。また、誤差の符号は計画値を上回るものを正としている。

満足化トレードオフ法による最適化を行うにあたり、理想点 p_i^* , q_i^* , r_i^* はすべて零とし、また、シム調整量の上下限値は全ケーブルについて $\pm 50\text{ mm}$ とする。

第1回目の最適化では全ケーブルを調整の対象とするものとし、その希求水準は各項目一律に、シム調整量50 mm、ケーブル張力誤差10 t、キャンパー誤差20 mmを設定した。この最適化を行って得られた結果を図-3に実線で示す。また図-3のシム調整量の分布図中に以下に述べる第1回目~第3回目の各最適化により得られた1, 13, 17ケーブルのシム調整量を示す。

シム調整量は温度変化により誤差を与えた1, 13, 17番ケーブルが他のケーブルよりも大きくなり、両者に明らかな差のあることがわかる。また、ケーブル張力誤差、キャンパー誤差ともに、初期設定誤差から大幅に改善されている。特に、ケーブル張力誤差はすべてのケーブルでほとんど零となっている。

第1回目の結果は実用上ほぼ満足できる解を示しているが、誤差の希求水準をさらに厳しくすることでケーブル長誤差を与えたケーブルとそうでないケーブルとの間により明確な差を生じさせることが可能と考え、また同時に現在やや大きいキャンパー誤差を改善しようと試みた。そのため、第2回目の希求水準として、各項目一律にケーブル張力誤差1.0 t、キャンパー誤差0.5 mmと厳しくし、逆にシム調整量を100 mmに緩和して設定した。シム調整量の上・下限値は変更していない。この最適化の結果を図-3に破線で示す。シム調整量は長さの

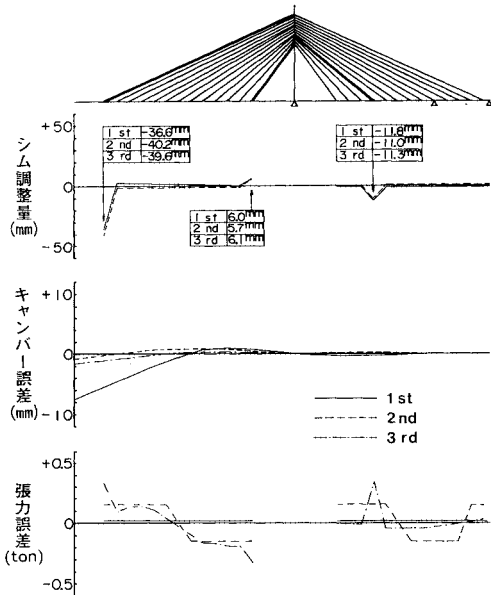


図-3 ケース1の計算結果

誤差を与えたケーブル以外ではすべて1 mm 以下となっており、ケーブル張力誤差は前回よりわずかながら増加したものの、キャンパー誤差はよく改善された。

以上は、いずれも全ケーブルについてシム調整を行うと考えた場合であり、十分満足のゆく結果が得られた。しかし、これらの結果から、ケーブル番号1, 13 および17番の3ケーブルのみの調整で精度確保が行えることは明らかである。そこで、第3回目の最適化ではシム調整量の制約条件を利用して1, 13 および17番以外のケーブルをシム調整の対象から除外することとした。希求水準は第2回目と同じ値を用いて最適化を行った結果を図-3に一点鎖線で示す。シム調整量は当初与えたケーブル長誤差にはほぼ一致しているが、ケーブル張力誤差、キャンパー誤差ともに第2回目の結果より若干悪化して、依然わずかながら残留している。理論的には、この場合シム調整により当初存在したケーブル長の誤差を補正すれば、ケーブル張力誤差、キャンパー誤差ともに除去されるはずである。にもかかわらず、ケーブル張力とキャンパーに誤差が算出される原因として考えられるのは、管理値・実測値をインプットする際の丸め誤差、管理値・実測値を算出した解析プログラムと影響値を算出した解析プログラムの違い（前者は一般に有限変形解析、後者はケーブル張力レベルによるケーブル剛性を補正した微小変形解析）による誤差などが考えられるが、いずれにしても、この程度の解析誤差の影響は実用上何ら問題ないものである。このように、本研究で提案した手法により正解が得られたことがわかる。

b) ケース2

ケース1に用いたモデルのケーブル長誤差に加えて、桁の構造解析上の各格点に作用させる架設時死荷重を、桁の自由端側から順に-5%、+5%と交互に変動させた状態を構造解析により求め、さらにこの応力および変形状態に対して、キャンパーについては各点に-5 mm ~ +5 mm の誤差をランダムに、ケーブル張力についてはケーブル張力の-3% ~ +3% の誤差を同じくランダムに与えたものを実測値データとした。これはケーブル長以外に、死荷重算定誤差、製作・架設誤差などが存在するより実際的なモデルを考えたものである。ケース2の初期設定誤差を図-4に示す。キャンパーで約55 mm、張力で約40 tの誤差が生じている。最適化にあたり、理想点やシム調整量の上下限值はケース1と同じ値を用いる。

第1回目の最適化では、全ケーブルの調整を行うものとする。また、ケース1の第1回目の最適化の結果からケーブル張力誤差よりもキャンパー誤差に対する希求水準を厳しくする方がよい結果が得られるものと考え、シム調整量については50 mm、キャンパー誤差について

は0.1 mm、ケーブル張力誤差については30 tの希求水準を各項目一律に設定した。この結果を図-5に実線で示す。ケーブル番号1のシム調整量が約43 mmと大きく、他はいずれも15 mm 以下である。キャンパー誤差は10 mm 以下、張力誤差は4 t（管理値に対する割合は2%）以下となり、満足すべき解が得られた。

第2回目の演算では第1回目同様全ケーブルを調整の対象とし、かつシム調整量を零とすることを目標にし、第2回目のシム調整量が5 mm 程度以下のものについて希求水準を10 mm と厳しくし、その代わりケーブル張力誤差については100 tに緩和した。その他の条件は同じにして求めた結果を図-5に破線で示す。キャンパー誤差、ケーブル張力誤差を若干悪化させることで、シム

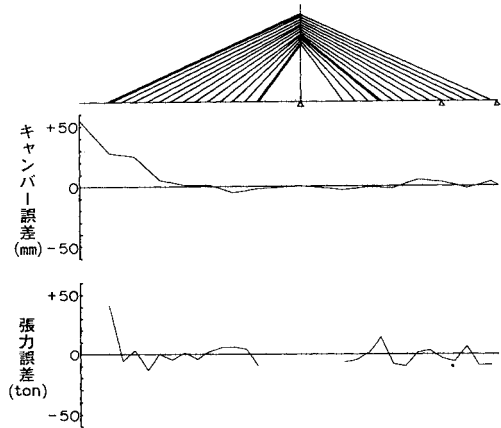


図-4 ケース2の初期設定誤差

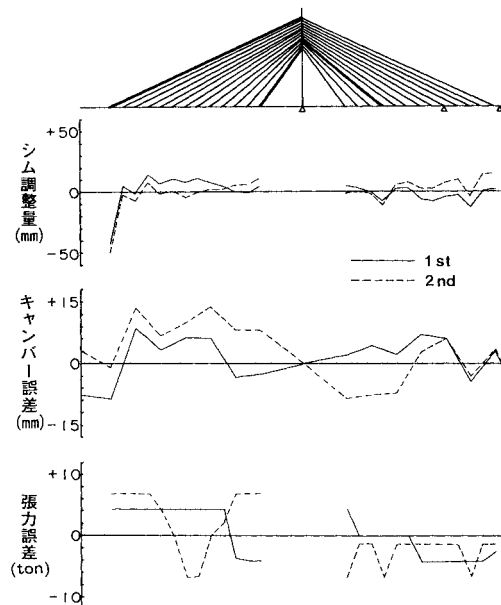


図-5 ケース2の計算結果

量を多少小さくできたことがわかる。しかし、その減少量は期待したほどでなく、一部には逆に増加したものがさえ存在している。

この結果からさらに、シム調整量の希求水準を厳しくしても、シム調整量をあまり小さくすることは期待できず、逆に誤差が大きくなるおそれがあると判断し、次に現在の結果を出発点としてシム調整量の制約条件を使って調整箇所数の減少を図ることにした。以後の演算を進めるうえで、許容誤差として、キャンパーについては30 mm、張力については張力管理値の8%（ケーブルの想定設計張力の5%相当）程度を考え、この範囲内の最適解を求めた。制約条件を用いて調整箇所数を減少させた過程を表一に示す。シム調整量の小さいものを順次零に固定し、結果から除外することで、最終的に2本の調整で精度確保が可能であることがわかる。

調整箇所を取り除く基準は次のように考えた。調整箇所数が多い場合はシム調整量が零に近いケーブルがあるので、そこを零とすればよい。しかし調整箇所数が少なくなってくると、調整量を零とする箇所により結果が大きく影響される。そのため調整箇所数8か所以下の場合はケーブル配置を考慮して、1~13番ケーブルと14~21番ケーブルからおのおの1か所ずつ減少させていった。これらの各調整箇所における希求水準は前回のを用いるため、最適化を行う繰り返し回数はほとんどの場合1回ですみ、しかも線形計画法を用いているため計算時間はわずかである。なお、ケーブル1本のみでの調整では、張力の誤差を8%以下にすることはできなかった。

表一 シム調整箇所数減少の過程

調整箇所数	26	15	12	10	8	6	4	2
シ	1	-50.0	-46.9	-46.8	-46.4	-41.3	-43.3	-38.2
	2	-2.6	—	—	—	—	—	—
	3	-7.5	-5.8	-5.6	-5.5	-4.1	-10.7	-0.3
	4	7.8	-0.6	—	—	—	—	—
	5	-1.9	—	—	—	—	—	—
	6	0.4	—	—	—	—	—	—
	7	-5.2	-8.1	-2.7	-7.7	-2.7	—	—
	8	-0.6	—	—	—	—	—	—
	9	1.4	—	—	—	—	—	—
ム	10	1.7	—	—	—	—	—	—
	11	4.8	-2.3	-6.6	-7.3	-8.7	-2.4	—
	12	5.4	-1.7	—	—	—	—	—
調	13	10.5	4.1	0.4	—	—	—	—
	14	-1.8	—	—	—	—	—	—
整	15	0.0	—	—	—	—	—	—
	16	-1.8	—	—	—	—	—	—
	17	-10.4	-12.3	-8.4	-3.1	—	—	—
	18	4.4	-0.1	—	—	—	—	—
	19	7.1	2.3	3.5	4.8	12.8	12.9	5.8
	20	2.4	—	—	—	—	—	—
	21	2.0	—	—	—	—	—	—
	22	6.8	2.3	-6.1	-4.7	10.9	11.1	3.5
	23	9.8	5.3	-4.3	-2.8	—	—	—
	24	-3.9	2.0	-14.6	-9.1	-13.4	-9.4	—
量	25	13.9	24.2	4.7	6.7	3.3	—	—
	26	14.8	25.8	-1.6	—	—	—	—
張力誤差 (%)	3.9	4.6	4.9	5.2	7.3	5.7	6.0	6.0
キャンパー誤差(mm)	13.5	17.8	26.4	20.2	7.2	13.0	8.7	6.9

この例での初期設定誤差は実際的に考えられる誤差をほぼ網羅している。そのような場合でも表一に示すように、最終的にわずか2本のケーブル調整のみで所定の精度を満たしたシム調整量を求めることができることは、本手法の有効性、適用性が非常に優れていることを示している。

(2) 考察

ケース1の結果より、まず本研究で提案した方法がシム調整量算出法として備えるべき機能を有していることがわかる。すなわち、斜張橋の架設系の形状、応力の誤差の原因がケーブル長誤差のみによる場合、ケーブル張力およびキャンパーの残留誤差を最小とすることで、原因となっているケーブルとその長さの誤差を確実に見出し、修正することが可能である。ケーブル長以外の誤差を有する場合でも、ケーブル長誤差の割合が大きければ、ケース2の1番ケーブルのように見出すことが可能である。

また、希求水準の設定によって残留誤差を容易に意思決定者の満足できるレベルに到達させることができる。ケース1の第1回目と第2回目の演算では、キャンパー誤差と張力誤差とのトレードオフによって満足のゆく結果を得たが、もちろん、各キャンパー誤差間あるいは各張力誤差間でのトレードオフによっても、各誤差内で突出するものを抑えることが可能である。ただし、各目的は相互に影響し合っているため、希求水準を厳しくすれば必ずその目的が改善されるとは限らない。たとえばケース2のシム調整量減少の場合がそれである。これは次のように考えると理解できる。すなわち、ある残留誤差に対して2か所のシム調整量が影響を与え、そして、この2か所のシム調整量は互いに一方を減らそうとすれば他方を増さなければならないという関係にあるとする。このとき、この2か所のシム調整量の希求水準を厳しくしたとしても、誤差を悪化させない限り、この両者を同時に減少させることはできない。これらのトレードオフは意思決定者が得られた解をみながら自らの経験を加味して次の希求水準や制約条件値を決めることに応用でき、意思決定者の経験をうまく取り込んだ設計を行い得ることを示している。

ケース1の例で明らかのように、本研究の対象とした斜張橋においては張力誤差よりキャンパー誤差を管理値に収束させる方が難しい。これは本斜張橋の桁がスレンダーで、シム調整によってキャンパーが張力よりも大きく変化するためである。剛な桁を有する斜張橋、たとえば補剛桁がトラスのような場合は、張力を収束させる方が難しいものと考えられる。

最後に、従来考慮されていなかったシム調整箇所数の減少についても、本研究で提案した方法は十分有効であ

ると思われる。ケース2では、まずシム調整量の希求水準を使ってシム調整箇所数の減少を図ったが、これについては期待した結果は得られず、主に制約条件による方がよい結果が得られることがわかった。ケース2の第2回目の演算以外にもシム調整量の希求水準を変更して計算してみたが、第2回目の結果と大差がなかった。希求水準による方法は、シム調整箇所数を減少できるかどうかの見通しをつけるための補助的な手段とし、主に制約条件による方が効率がよいと考えられる。

5. 結 論

本研究では、斜張橋の架設時精度管理において、多目的計画法を適用し、精度確保のみならず、作業性の向上も意図したシム調整量算出法を提案した。本手法の特徴や数値実験の結果は以下のように要約することができる。

(1) 本来多目的問題である最適シム調整量算出問題を、満足化トレードオフ法を用いることにより多目的最適化問題として定式化し、各目的関数間の重み等を考慮することなくすべての目的を満足する解が容易に得られることを示した。

(2) 本手法は絶対値で表わされる残留誤差の最小化問題を非負の補助変数を用いて線形問題に定式化したため、線形計画法を用いて、短時間で容易に最適解を求めることができる。

(3) 本手法を用いれば斜張橋の架設系の形状、応力の誤差の主因がケーブル長誤差である場合、原因となっているケーブルとその誤差量を実際に見出し、修正することが可能である。またケーブル長以外の誤差がある場合でも、本手法により簡単に改善することができる。

(4) 希求水準の設定によって、容易に満足すべき精度と作業量を達成するシム調整量を得ることができる。

(5) 制約条件の上下限値を零にすることにより、所要の精度を確保しつつ数回の反復計算で大幅なシム調整

箇所数の減少を図ることが可能である。

なお、本研究で提案した手法は対象を斜張橋に限定するものでなく、シム調整を行う構造物、たとえばニールセン橋に対しても適用可能であり、今後これらに対する適用を試みたいと考えている。

本研究を行うにあたり、山口大学 中尾絵理子技官、三菱重工業(株) 広島製作所橋梁設計課の谷川浩司氏および三菱重工業(株) システム技術部の片山幸子氏の助力を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 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、第13巻、第9号、pp.30~36、1979年9月。
- 2) 藤澤伸光：斜張橋架設時のシム量決定方法、橋梁と基礎、第18巻、第9~10号、1984年9月~10月。
- 3) 市川悖信編：多目的決定の理論と方法、計測自動制御学会、昭和55年
- 4) 志水清孝：多目的と競走の理論、共立出版、昭和57年6月。
- 5) 大久保禎二・松本秀応：製作費および美観を考慮した鋼アーチ橋の最適設計、土木学会第38回年次学術講演会講演概要集第1部、pp.453~454、昭和58年9月。
- 6) Jendo, S., Marks, W. and Thierauf, G. : Multicriteria Optimization in Optimum Structural Design, Large Scale Systems, Vol.9, No.2, pp.141~150, October, 1985.
- 7) Nakayama, H. and Furukawa, K. : Satisficing Trade-off Method with an Application to Multiobjective Structural Design, Large Sale Systems, Vol.8, No.1, pp.47~57, February, 1985.
- 8) 中山弘隆：多目的計画に対する満足化トレードオフ法の提案、計測自動制御学会論文集、第20巻、第1号、pp.29~35、昭和59年1月。
- 9) Sawaragi, Y., Nakayama, H. and Tanino, T. : Theory of Multiobjective Optimization, Lemma 7.3.1, pp.253~254, Academic Press, 1985.

(1986・4・2・受付)