

Cable Control Systemの紹介 (その2)

(解体計算, 最適シム決定プログラムの開発について)

有村 英樹¹⁾ 玉田 和也²⁾ 細見 雅生³⁾

Cable Control System (CCS) は斜張橋, ニールセン橋などのケーブルを有する橋の架設精度管理を効率的に支援する架設精度管理システムの構築を目的として, 開発を行ってきた。前号 (Cable Control Systemの紹介 (その1)) では構造解析の核となる立体有限変位解析の概要, 開発プログラムの妥当性について報告した。今回は, 各架設段階における変位, 断面力を計算する解体計算および所定の管理精度内で設計時に計画した断面力, キャンバーを実現する最適シム決定プログラムの開発について報告する。

まえがき

斜張橋はその構造が合理的な橋梁といわれているが, 反面, 中長規模の斜張橋の場合, 柔軟性に富み, 特に架設時においては幾何学的非線形性を考慮した解析が必要である¹⁾。

斜張橋は高次の不静定構造物であり, 完成時の形状, 断面力を管理精度内に収めるには架設時の各ステップでケーブル張力, キャンバーの変動を把握し, 必要があればシム調整を行うことがある。また, 架設時の断面力が完成系を上回り, 部材の断面が決定されることがあるため, 立体有限変位解析プログラムを組込んだ解体計算プログラムおよび最適シム決定プログラムの開発を行った。ここでは, その内容について紹介する。

1. 解体計算

(1) はじめに

当社では1982年頃, 岩黒島橋の架設計算のため斜張橋の解体計算プログラム (NOLAN 文献²⁾) を開発しており, その後も運用を行っている。ただし, このプログラムは平面骨組を対象とし, 橋梁形式も斜張橋に限定されている。そこでCCSで開発した立体有限変位解析プログラムを核として, 立体骨組を対象とした解体計算プログラムを開発したので, その概要を紹介する。

橋梁の架設系に対して有限変位解析を行う場合, 完成系での初期形状 (無応力形状) の決定が必要で, この初期形状をベースに各架設ステップでの解析を行うことになる。以下ではまず初期形状の決定について述べ, 次に各架設ステップで計算する解体計算の機能について述べる。

(2) 初期形状の決定

吊橋を除く大部分の橋梁の設計計算には微小変位理論による解析が行われている。このときの解析条件や解析結果をもとに完成系から架設系の各ステップでの解析を有限変位理論により行う。そこで完成系において, 設計計算の死荷重 (D) + プレストレス力 (P_s) による解析では, 有限変位解析でいうところの変形後 (荷重載荷後) の節点座標とその時のケーブル張力, 部材断面力を知ることができる。このうち節点座標とケーブル張力に着目し, 荷重載荷後に節点とケーブル張力が所定の値に収まるような初期形状 (初期座標とケーブルの無応力長) を繰り返し計算により求める。

ケーブルの無い構造物については発生した並進変位量を上げ越して解析を行い, 変形後の座標が目標とする完成形状と一致しているかの収束判定を行い初期形状を求める (図-1)。

ケーブルを有する構造物の場合, $D+P_s$ 時のケーブル張力と変形後のケーブル定着点の座標が既知であるため, 梁要素とは独立に計算することが

1) 橋梁技術部技術課 2) 橋梁技術部技術課 3) 橋梁技術部技術課課長

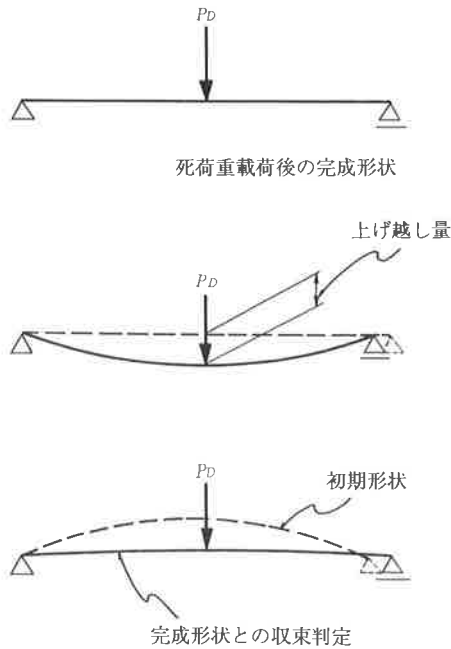


図-1 初期形状の決定

できる。ただし、微小変位解析によって求めた張力の水平反力と放物線ケーブルの水平反力が等しくなるという条件のもとでケーブル無応力長、桁側ケーブル鉛直反力、塔側ケーブル鉛直反力を求める(図-2)。次に解析モデルからケーブル要素を取り除き、ケーブル定着点にケーブル反力を集中荷重として既存の荷重に加えて載荷する。以下はケーブルの無い場合と同様に取扱う。このようにして求めた初期座標とケーブル無応力長はケーブル反力を介して整合しており(初期座標の収束が十分であれば)、あらゆる形式のモデルについて有限変位解析を行うための初期形状を自動的に求めることができる(図-3)。

初期形状を決定する場合の繰り返し計算の収束性については、通常の場合10回以下の繰り返し回数で収束する。しかし、死荷重による変形が座屈時のモードと同じで、しかも変形量が大い場合には収束しない。考え方を換えれば、初期形状が求まらない場合は設計段階で何らかの問題を有しているということができる。

(3) 解体計算

解体計算における基本的な考え方はNOLANから変わっておらず、完成系の状態から部材や荷重を徐々に取り除き、各架設ステップでの節点変位、部材断面力の計算を行い、その最大最小値を計算するとともに、架設時の種々の検討に使用するも

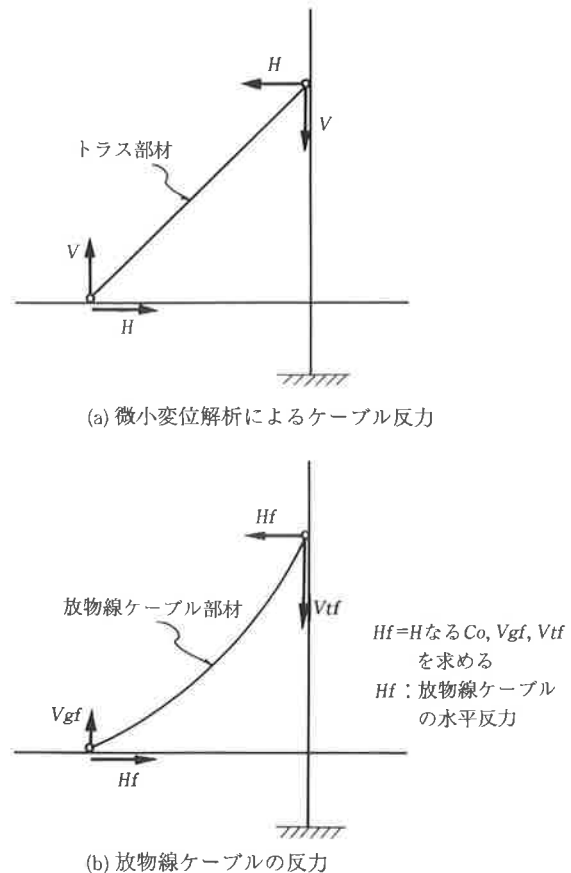


図-2 ケーブル反力の整合

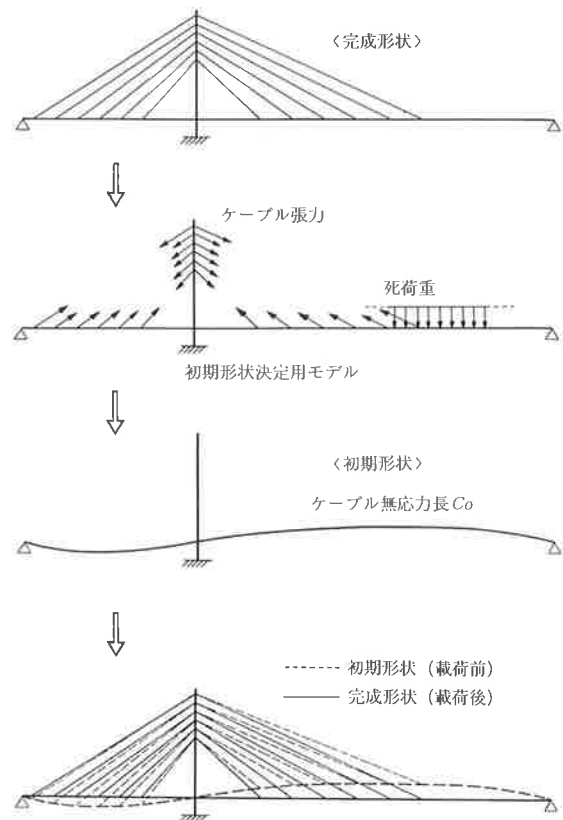


図-3 ケーブル系の初期形状の決定

のである。その機能についてはNOLANが持つ機能に加え、対象が立体骨組になったことによる機能の追加やその他の追加を行った。

[解体計算機能一覧]

- ・ 梁部材の削除, 追加
- ・ 節点の削除, 追加
- ・ スライディングジョイントの削除, 追加, 拘束条件の変更
- ・ 支承, 傾斜支承の削除, 追加, 拘束条件の変更
- ・ 物理定数の変更
- ・ 断面諸量の変更
- ・ ケーブル無応力長の変更 (無応力長, 張力, 水平反力でも入力可)
- ・ 部材自重の変更
- ・ 節点荷重, 部材荷重, 温度荷重, 温度差荷重の載荷

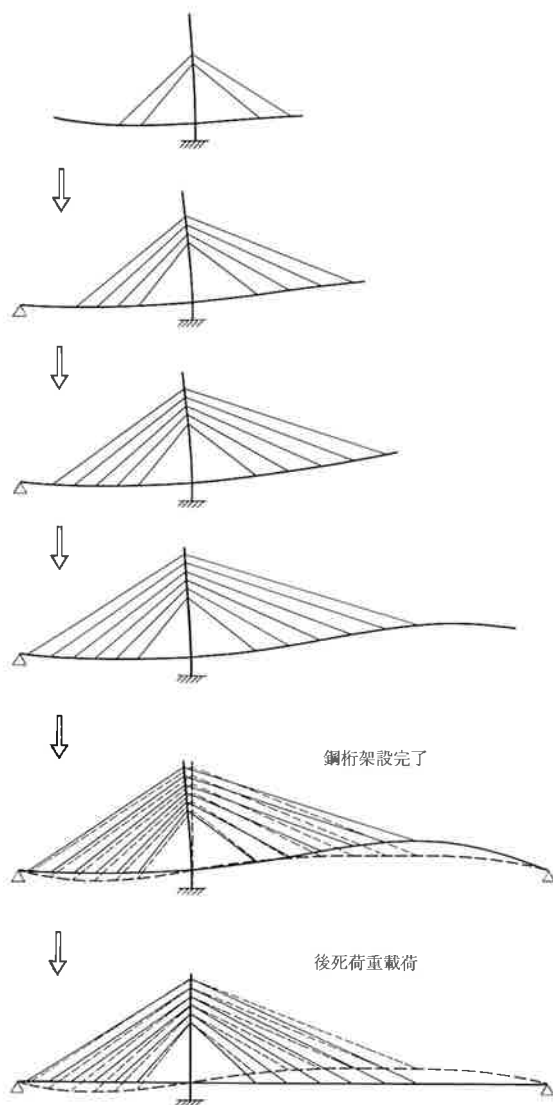


図-4 架設ステップ解析結果

- ・ 支点沈下, セットバック
 - ・ 節点変位, ケーブル張力, 部材断面力の集計
- 図-4に簡単な解析例を示す。

2. 改良型満足化トレードオフ法を用いた最適シム計算

(1) はじめに

解体計算プログラムにより計画された各架設ステップの構造系には製作誤差, 架設誤差など種々の誤差を含むため, ケーブル張力, キャンバーは厳密には計画した値と一致しない。このため, これらの誤差を管理値に収めるため, 誤差の軽減を図る必要がある。実際には, 斜張橋などケーブルを使用した橋梁の場合, ケーブル長の調整によってケーブル張力, キャンバーの調整が可能なることから, シムプレートを挿入することにより以上のような誤差の軽減を図る。このようなことから最適なシムプレート厚を決定する最適シム決定プログラムの開発が必要となり, 当社でも文献3)に示す共役勾配法を用いた最適シム決定システムを開発している。

最適シム算定方法についてはこれまでに共役勾配法⁴⁾, 最小自乗法⁵⁾などを用いた手法が数多く提案されてきた。しかしながら, 手法によってキャンバー誤差が直接扱われていなかったり, ケーブル張力の残留誤差, キャンバーの残留誤差といった物理的な意味が異なるものの2乗和を目的関数にするなど, 問題点が指摘されている⁶⁾。また, 重み係数の決定が非常に難しいなど, 実用上の面からも問題点が残る。

以上の問題点はケーブル張力の残留誤差, キャンバーの残留誤差, シム量の最小化という, 本来, 多目的問題であるはずの最適シム算出問題を単一目的問題として扱っていることに起因する。そこで, 満足化トレードオフ法を用いて, 最適シム算出問題を本来の多目的問題として扱った手法が提案された⁶⁾。

この手法では, 最適シム計算が多目的最適化問題として定式化され, さらに, 各目的関数の重みを考慮することがなくなる。また, 架設現場において, 最適シムを迅速かつ容易に求めることが要求されるため, その算出過程では解析条件の変更が容易で, 解析に要する時間が短く, なおかつ, その結果が一目で把握できるシステムでなければ

ならない。そこで、満足化トレードオフ法を用いてEWSのマルチウィンドを利用した対話型のシステムを新たに開発した。

以下に満足化トレードオフ法の概要、最適シム計算への適用、ならびに数値計算例について報告する。

(2) 改良型満足化トレードオフ法

1) 満足化トレードオフ法

(1)で述べたように最適シム計算を多目的問題に変換すると、斜張橋やニールセン橋では、その目的関数の数は数十、数百となる。このように多数の目的関数 $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$ が存在する場合、これら全ての目的関数を同時に最小化する解を得ることはできない。したがって、ある目的関数を改善しようとしたとき、他の目的関数が犠牲になることは容易に想像できる。しかしながら、このような問題を改善し、最適値を算出することが要求されるため、多目的最適化問題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で解を求めることになるが、これを効率的に行う手法として提案されたのが満足化トレードオフ法である^{7),8)}。

このようなぎりぎりの状態は、Pareto (パレート) 最適状態とよばれ、その状態を実現する解をPareto解とよばれるが、この解は唯一ではなく、ある集合となって存在する。

本手法の概念を簡単に説明するため、 f_1, f_2 という2つの目的関数を考え、目的関数、Pareto解との関係を図-5に示す。ここで、図中の f_1^* は理想点と呼ばれ、例えば、ケーブル張力の残留誤差がゼロ、キャンバーの残留誤差がゼロなどというように、現実にはあり得ない、あくまでも意志決定者の理想とする参考値である。また、 \hat{f}_1 は希求水準と呼ばれ、ケーブル張力の残留誤差を2tfまでとするというように意志決定者が、ある目的関数がどの程度の値であれば満足できるかという希望値である。

図-5のようにPareto解は唯一でなく、無数に存在するが、解を探索する方向は、この理想点 f_1^* と希求水準 \hat{f}_1 を結んだ直線上となるため、この直線と一致した点が与えた条件下でのPareto解となる。

理想はあくまでゼロであるが、希求水準は、

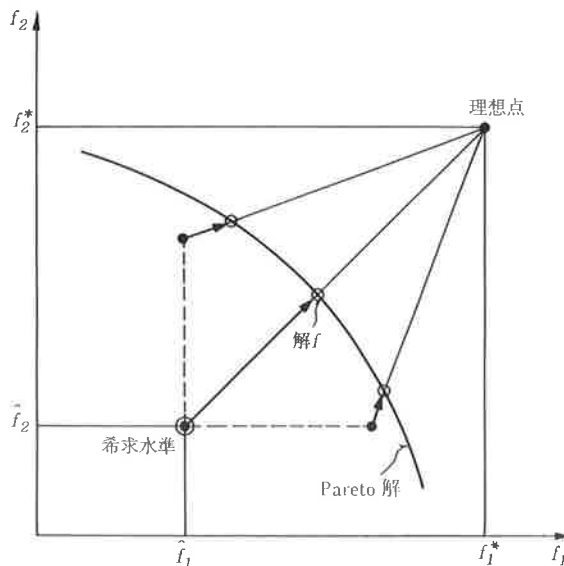


図-5 満足化トレードオフ法の概念

意志決定者の希望値であるから、管理基準値内に収まればよいなどというように、ある幅を持っており、最適計算過程において、希求水準はこの幅内で変更される。希求水準の効果について、図-5の状態から f_1 の希求水準 \hat{f}_1 を理想点 f_1^* に近づけると、同図のように f_1 は改善(理想点 f_1^* に近づく)されるが、 f_2 は逆に低下する。このように多目的計画問題では、与えられた条件によって各目的は連成し合っており、必ず他の目的を犠牲にしなければならないぎりぎりのラインで解が求まる。

2) 改良型満足化トレードオフ法⁸⁾

本手法は満足化トレードオフ法における補助的スカラー化問題の定式化を修正した方法で、以下のように定式化される。

・目的関数

$$D \rightarrow \min \tag{1}$$

・制約条件

$$g_j(x) \leq 0 \quad (j=1, \dots, m) \tag{2}$$

$$w_i(f_i(x) - \hat{f}_i) - (1 - \xi_i)D \leq 0 \quad (i=1, \dots, r) \tag{3}$$

$$w_i = 1 / (f_{i*} - f_i^*) \quad (i=1, \dots, r) \tag{4}$$

・設計変数

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \tag{5}$$

ここに、 f_i^* :理想点、 f_{i*} :最悪点

\hat{f}_i :希求水準、 D :満足度

ξ_i :満足度パラメータ

本手法では従来のものに比べると、 ξ_i, f_{i*} の2つのパラメータが増えている。まず、最悪

点 f_{i*} は理想点とは逆に $f_i(x)$ の考え得る最大値で、現実を考慮しない参考点である。

満足化トレードオフ法と同様に f_1, f_2 の2つの目的関数を考える。図-6において、 $\xi_1 = \xi_2 = 0$ とすれば、解の探索方向は、 f_1^* と f_{2*} を結ぶ直線と平行となり、従来の方法と同様になる。しかし、 $\xi_1 = 1, \xi_2 = 0$ とすれば、 f_2 軸に平行に、 $\xi_1 = 0, \xi_2 = 1$ とすれば、 f_1 軸に平行に解を探索する。このように満足度パラメータ ξ_i の大小により、任意の目的関数に重きを置いた解の探索が可能となり、解の探索方向が1方向に固定されていた従来の手法よりも、トレードオフの回数が少なくさせることが可能となる。

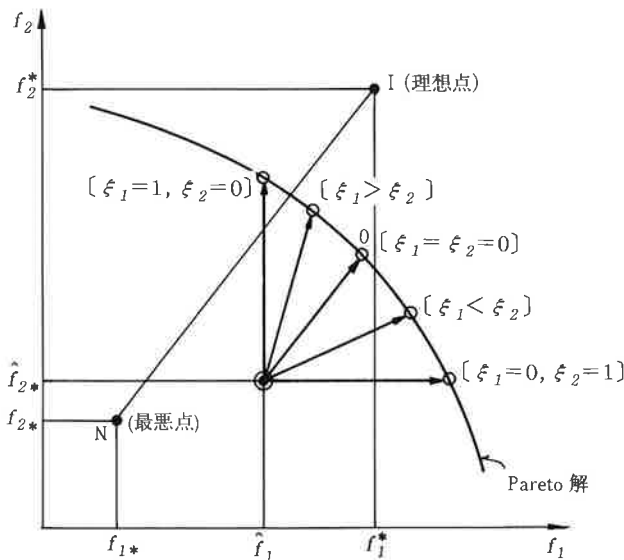


図-6 改良型満足化トレードオフ法

次に改良型満足化トレードオフ法のアルゴリズムを簡単に示す⁶⁾。

- ・ Step1 [理想点 f_i^* , 最悪点 f_{i*} の設定]
各目的関数について、理想点 f_i^* , 最悪点 f_{i*} を設定する。 f_i^* は現実を考慮しない小さい値でよい。
- ・ Step2 [希求水準 \hat{f}_i , 満足度パラメータ ξ_i の設定]
各目的関数について、希求水準 \hat{f}_i , 満足度パラメータ ξ_i を設定する。 \hat{f}_i は現実的な値とする。
- ・ Step3 [Min-Max 問題]
式(1)~(4)を解き、この解を x とする。
- ・ Step4 [トレードオフ]
 $f_i(x)$ を意志決定者に提示し、満足いく結果であれば、実行を終了する。不満足であれば、新たな希求水準 \hat{f}_i , 満足度パラメータ

タ ξ_i を設定し、Step3へ戻る。

(3) 改良型満足化トレードオフ法を用いた最適シム計算^{6), 9)}

改良型満足化トレードオフ法を架設精度管理に適用するにあたって、目的関数を以下のように考えた。

- ① ケーブル張力の残留誤差 p_i ($i=1, \dots, n$)
- ② キャンバーの残留誤差 q_j ($j=1, \dots, m$)
- ③ シム調整量 r_i ($i=1, \dots, n$)

ここで、 k 番目のケーブルを単位量 ($\Delta l_k = 1$) だけ調整したときの第 i 番目の着目ケーブルの張力変化量を X_{ik} とすると、 X_{ik} を係数とする行列 X を用いて、シム調整量 Δl による張力変化量は $X\Delta l$ と表わされる。

同様に、 k 番目のケーブルを単位量だけ調整したときの第 j 番目の着目点のキャンバー変化量を Y_{jk} とすると、 Y_{jk} を係数とする行列 Y を用いて、シム調整量 Δl によるキャンバーの変化量は $Y\Delta l$ になる。

行列 X, Y は影響値マトリックスと呼ばれ、本システムでは立体有限変位解析プログラムにより事前に計算される。

また、ケーブル張力の計画値と実測値との差を ΔT_i , キャンバーのそれを ΔZ_j とすると先に挙げた各々の残留誤差は次のように表わされる。

$$p_i = |\Delta T_i - \sum X_{ik} \Delta l_k| \quad (i=1, \dots, n) \quad (6)$$

$$q_j = |\Delta Z_j - \sum Y_{jk} \Delta l_k| \quad (j=1, \dots, m) \quad (7)$$

$$r_i = |\Delta l_i| \quad (i=1, \dots, n) \quad (8)$$

実際のプログラムではこれら3つの目的関数を最小にする Δl_i を求める操作が行われる。しかし、式(6)~(8)では絶対値をとっているため、このままでは従来の計画法の手法が適用できない。このため、線形計画法が適用できるよう非負の補助変数¹⁰⁾を用いて以下のように定式化した。

・ 目的関数 (最小化)

$$F = D + \beta \left(\sum \frac{p_i^+ + p_i^- - \hat{p}_i}{p_{i*} - p_i^*} + \sum \frac{q_j^+ + q_j^- - \hat{q}_j}{q_{j*} - q_j^*} + \sum \frac{r_i^+ + r_i^- - \hat{r}_i}{r_{i*} - r_i^*} \right) \rightarrow \min \quad (9)$$

注) 非負の補助変数 p_i^+, p_i^- を用いることにより、目的関数は補助変数の単調増大関数となる。式(14)の制約条件の下で目的関数を最小化することにより、 $p_i^+ p_i^- = 0$ の条件が満たされ、式(6)の絶対値を線形計画法に適用することが可能となる。

・ 制約条件

$$\frac{p_i^+ + p_i^- - \hat{p}_i}{p_{i*}^+ - p_{i*}^-} \leq (1 - \xi_i) D \quad (i=1, \dots, n) \quad (10)$$

$$\frac{q_j^+ + q_j^- - \hat{q}_j}{q_{j*}^+ - q_{j*}^-} \leq (1 - \xi_j) D \quad (j=1, \dots, m) \quad (11)$$

$$\frac{r_i^+ + r_i^- - \hat{r}_i}{r_{i*}^+ - r_{i*}^-} \leq (1 - \xi_i) D \quad (i=1, \dots, n) \quad (12)$$

$$p_i = p_i^+ + p_i^-, q_i = q_i^+ + q_i^-, r_i = r_i^+ + r_i^- \quad (13.a \sim c)$$

$$p_i^+ - p_i^- = \Delta T_i - \sum X_{ik} \Delta l_k \quad (i=1, \dots, n) \quad (14)$$

$$q_j^+ - q_j^- = \Delta Z_j - \sum Y_{jk} \Delta l_k \quad (j=1, \dots, m) \quad (15)$$

$$r_i^+ - r_i^- = \Delta l_k \quad (i=1, \dots, n) \quad (16)$$

$$\Delta l_{L_i} \leq \Delta l_i \leq \Delta l_{U_i} \quad (i=1, \dots, n) \quad (17)$$

最適シム計算プログラムでは、 $p_i^+, p_i^-, q_j^+, q_j^-, r_i^+, r_i^-$ が最適問題の解として得られ、これらを式(13.a)～(13.c)に代入することにより、各残留誤差が計算される。

(4) 数値計算例

図-7に示す12本のケーブルを有する完成系の斜張橋を対象とした数値計算例を示す。着目ケーブルは全ケーブル、着目キャンバー点はケーブル定着点の12点としたので、本問題は36個の目的関数を有する最適化問題となる。系として、2本のケーブル長誤差を有する場合を考え、ケーブル1に

20mm, 10に15mmの誤差を与えた。トレードオフの初期条件として、理想点 p_i^*, q_j^*, r_i^* はすべてゼロ、最悪点 $p_{i*} = 100\text{tf}, q_{j*} = 500\text{mm}, r_{i*} = 100\text{mm}$ とした。希求水準は $\hat{p}_i = 10\text{tf}, \hat{q}_i = 5\text{mm}, \hat{r}_i = 20\text{mm}$ とし、満足度パラメータ ξ_i はすべてゼロとした。また、管理目標値はケーブル張力が5%、キャンバーは10mmとした。

シム決定の方針としては管理目標値内に収まった時点でシム量がゼロに近いケーブルを調整対象から除外し、再度シム計算を行うこととした。

数値計算結果を表-1に示す。

本プログラムでは各最適計算は前回の希求水準満足度パラメータを引き継ぐので、管理目標値内

表-1 数値計算結果

	1	2	3	4	5	
シム調整量	1	-8.2	-8.6	-8.9	-9.1	-20.0
	2	-3.6				
	3	-2.8				
	4	0.1				
	5	7.4	7.1	7.0	7.2	
	6	2.8				
	7	-6.3	3.8			
	8	-0.4				
	9	3.9				
(mm)	10	-8.2	-8.6	-8.9	-9.1	-15.0
	11	-8.2	-7.5	-8.9	-9.1	
	12	-8.0	-8.6	-3.2		
最大張力誤差(%)	4.0	4.1	4.2	4.2	0.0	
最大キャンバー誤差(mm)	4	6	7	7	0	

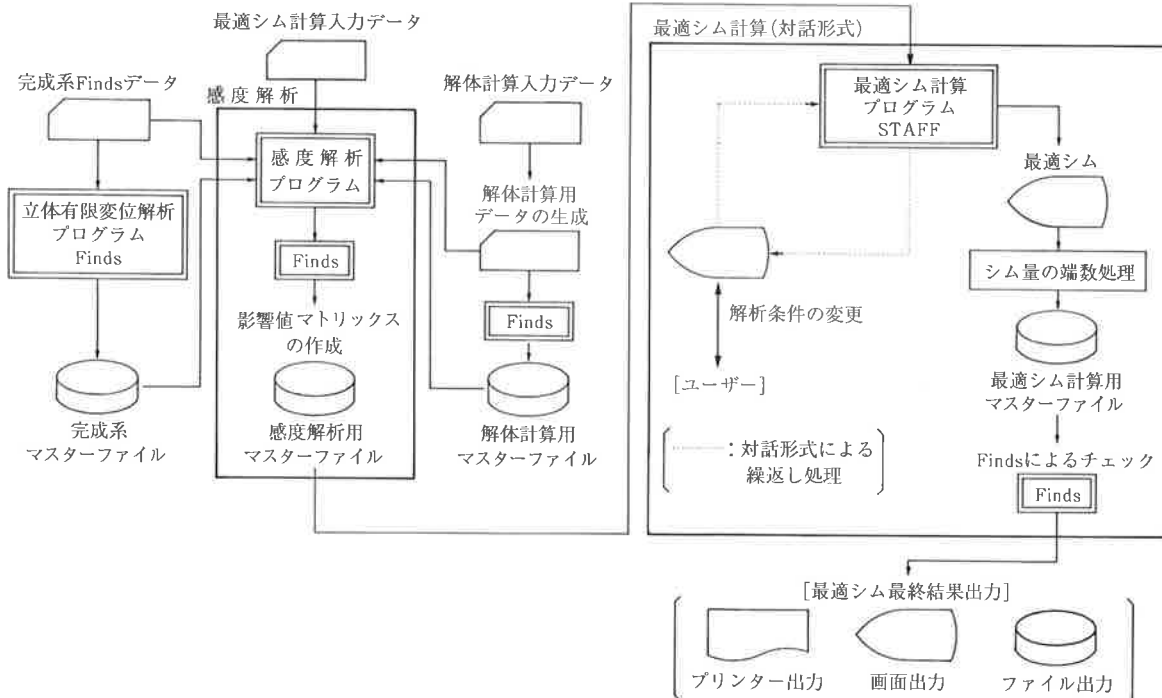


図-7 架設精度管理システム概要

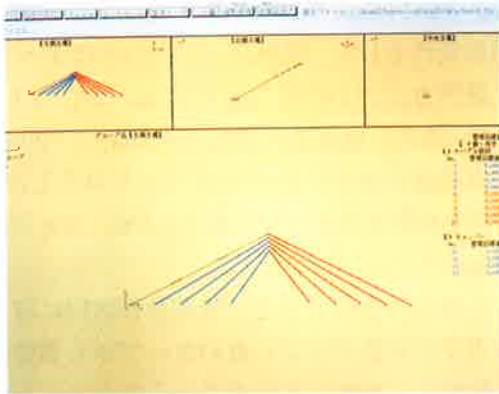


写真-1 最適シム計算操作画面 (1)

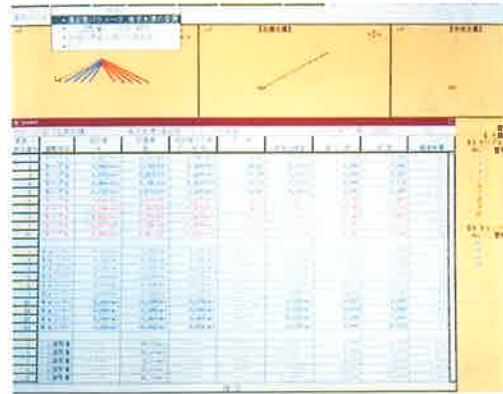


写真-5 MENU2, 各種パラメータの変更



写真-2 最適シム計算操作画面 (2)

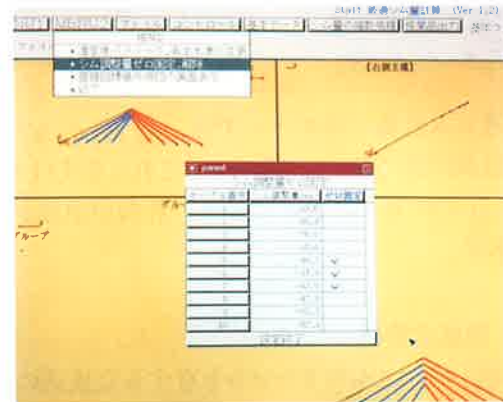


写真-6 シム量ゼロ固定

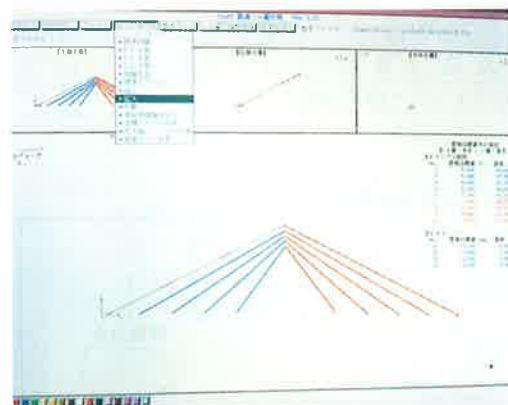


写真-3 最適シム計算操作画面 (3)

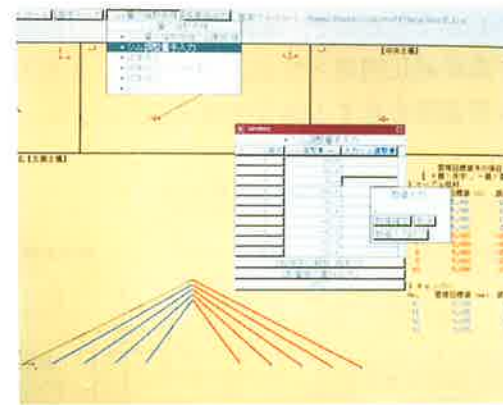


写真-7 シム量端数処理



写真-4 MENU1, 計算値表示

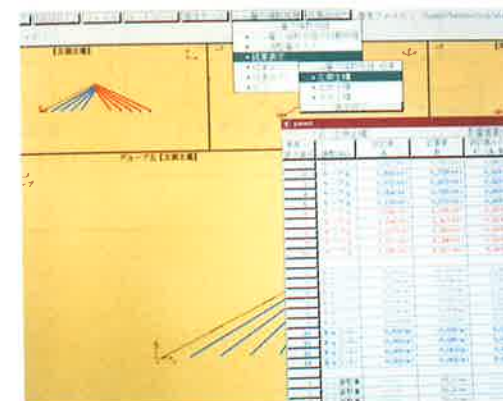


写真-8 調整後の有限変位解析結果表示

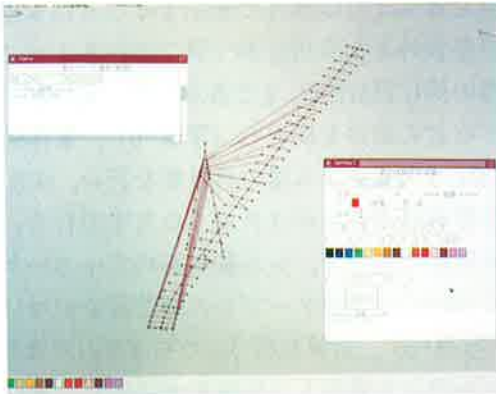


写真-9 解析モデル骨組図

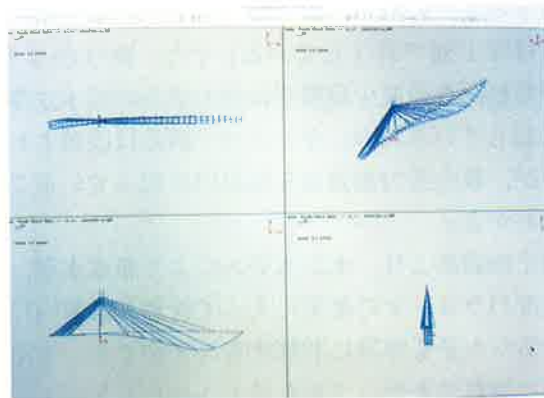


写真-13 変位図 (死荷重)

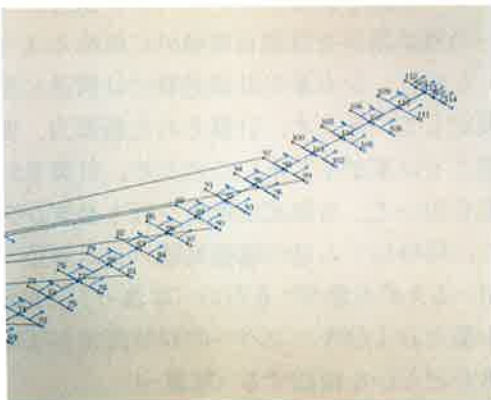


写真-10 節点番号, 部材座標系の表示

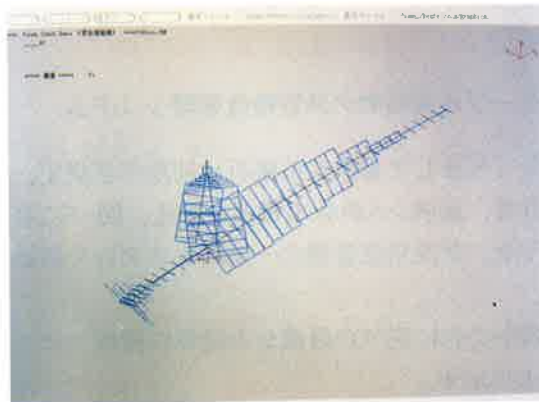


写真-14 軸力図 (死荷重, 主桁, 塔のみ表示)

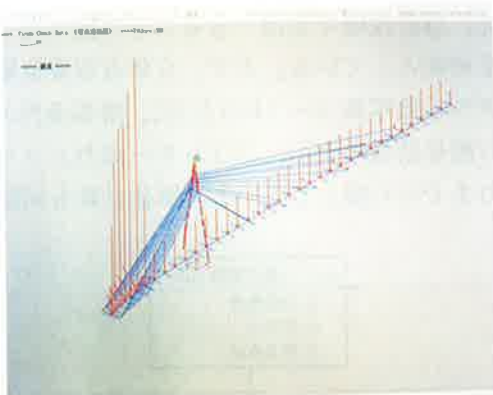


写真-11 荷重載荷図 (死荷重)

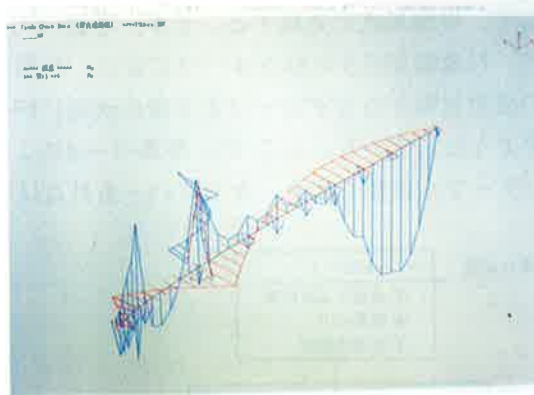


写真-15 モーメント図 (死荷重, 風荷重)

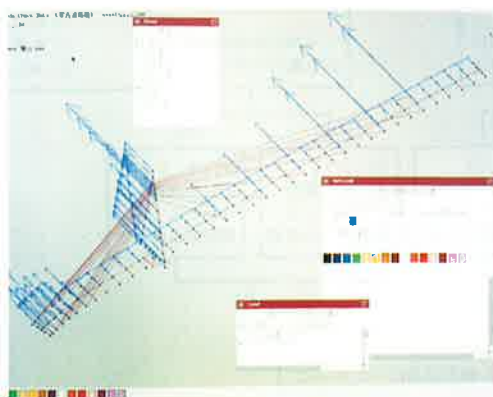


写真-12 荷重載荷図 (風荷重)

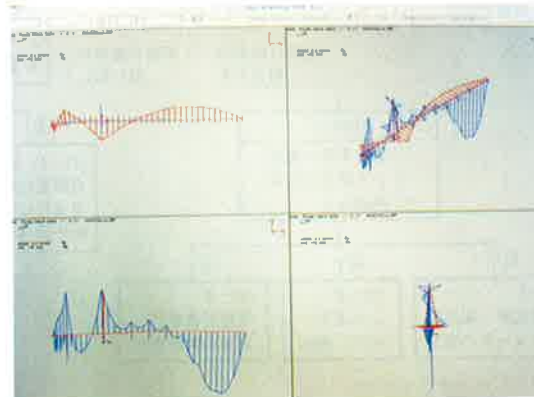


写真-16 モーメント図 (3面図)

に収まるまでの最適計算の繰り返し回数は各段階ともほぼ1回で終了している。また、表-1のように調整箇所数の減少段階では張力誤差の希求水準を緩和しているため、キャンバー誤差は改善されないが、最大張力誤差は5%以内に収まっていることがわかる。

以上の結果より、本システムにより希求水準、満足度パラメータの変更によって管理目標値内に収まるシム量を容易に計算することができ、また、同時に調整対象ケーブルを減少させることによって、調整作業の軽減を図ることも可能となることがわかる。

3. ケーブル系橋梁の架設精度管理システム

前号で報告した有限変位解析に初期形状決定、解体計算、最適シム計算の機能を加え、図-7に示すような、架設精度管理の一連のシステムを構築した。

この中で先に述べた最適シム計算の操作フローを図-8に示す。

図-8のように最適シム計算の操作は多岐にわたるため、本システムではEWSのマルチウィンドを利用して、対話形式で処理する。まず、写真-1のように、対象橋梁を3つのグループに分け、各種条件の変更対称となるグループを下段の画面に呼び出すようにしている。ここで、写真-1~4のように、ケーブルは色を変え、キャンバー着目点は

節点を青丸または赤丸で表示することにより、管理目標値外となる項目が一目でわかるようにした。実際の操作はMENU 2で希求水準、満足度パラメータなどの条件を変更し(写真-5)、条件変更後MENU 1で最適シム量の再計算を行い、画面に管理目標値外の表示がされなくなるまで行う。また、シム計算の過程で、シム量の極めて小さいケーブルについては当該ケーブルの調整量をゼロに固定し(写真-6)、計算を行う。プログラムでは当該ケーブルのシム量の上下限値をゼロにし、式(17)の条件を変更する。そして、最終的にはシム調整量ケーブル本数を減少させ、ケーブル張力、キャンバーの残留誤差を管理目標値外に収めるようにする。しかし、シム量の計算過程では構造に線形性を仮定しているため、計算された断面力、変位と実際とは差が生じる。このため、計算されたシム量を用いて、有限変位解析を行う必要がある。また、同時にシム量の端数処理(シム調整で実際に用いる丸めた数字)を行い(写真-7)、再度ケーブル張力およびキャンバーの残留誤差が管理目標値外かどうかを確認する(写真-8)。

また、立体有限変位解析、解体計算、感度解析プログラムについては、各々、架設管理時だけでなく、設計段階で使用できるよう単独で用いることを可能としている。まず、立体有限変位解析プログラムは写真-9~16のように、解体条件の確認から解体結果の表示、プリンター出力、ファイル出力までを可能としている。解体計算も同様に各

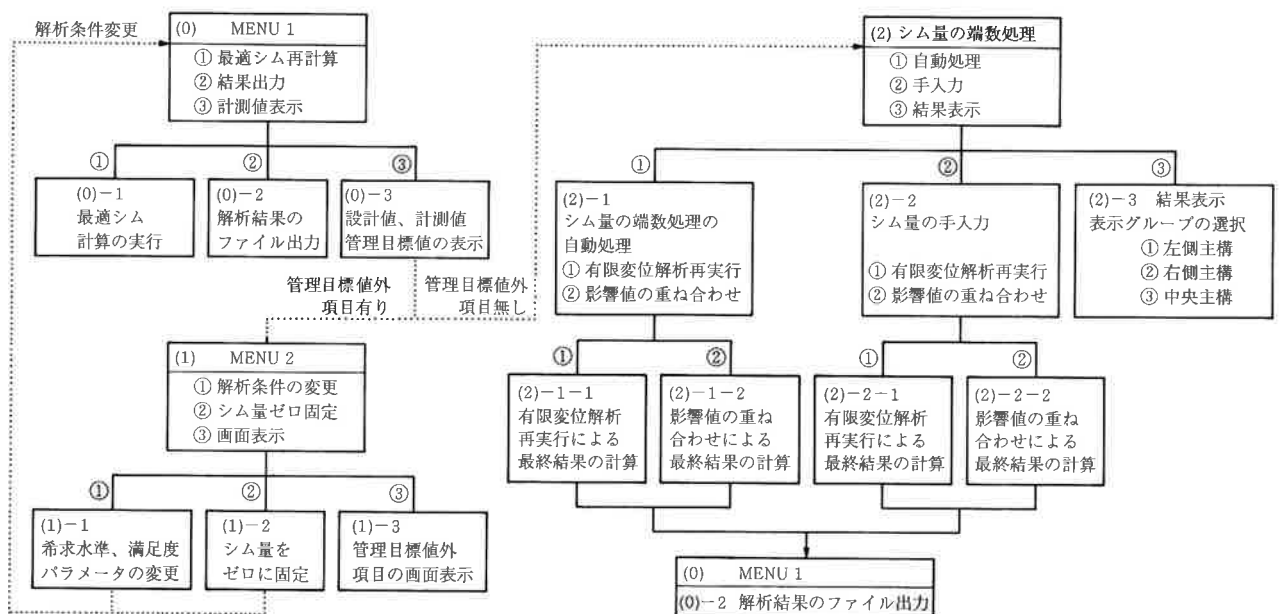


図-8 最適シム計算操作フロー

ステップのステップ図および解析結果の表示，出力までも可能とした。

あとがき

今回開発した解体計算，感度計算，最適シム決定プログラムにより，解析からシム計算までの一連の架設精度管理システムを構築した。また，これらは，有限変位解析プログラムを使用しており，架設時だけでなく，設計段階での照査，検討が可能なよう，単独で使用できるようにした。

特に最適シム決定プログラムは，改良型満足化トレードオフ法を採用することにより，EWSのマルチウィンドを利用した対話形式の処理が可能となり，操作者の意志を容易に反映できるシステムとなっている。

現在，カルマンフィルターを用いた誤差要因推定解析，確率有限要素法を用いた組立計算による将来予測など，従来の架設精度管理システムより一歩進んだシステムの開発に取り組んでおり，これらについては次回報告する予定である。

最後に，本システムの開発にあたり，懇切なご指導をいただいた長岡技術科学大学 林教授，北海学園大学 杉本博之教授，甲南大学 中山弘隆教授，そして関係各位に感謝の意を表します。

訂正とお詫び

前号（参考文献1）p.58の表記

- ④ 断面のそり変形は小さいものとして，そり関数の非線形項は無視する。

について，本プログラムではそり関数は考慮していないため，下記のように訂正いたします。

- ④ そり関数は考慮しない。

関係各位にご迷惑をおかけしたことをお詫びいたします。

参考文献

- 1) 有村英樹・玉田和也・細見雅生：Cable Control Systemの紹介（その1），駒井技報，Vol.13，pp.53-61，1994.
- 2) 高橋義勝・佐々木実・成田司喜夫：斜張橋プログラムの紹介と計算例，駒井技報，Vol.5，pp.152-160，1986.
- 3) 佐々木実・細見雅生・吉村文達：佐陀川橋（V型剛斜材を有するニールセンローゼ橋）の施工，駒井技報，Vol.9，pp.1-11，1990.
- 4) 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，Vol.13，No.8，pp.30-36，1979.
- 5) 藤澤伸光：斜張橋架設時のシム量決定方法（上），（下），橋梁と基礎，Vol.18，No.9，pp.17-22，Vol.18，No.10，pp.41-45，1984.
- 6) 古川浩平・井上幸一・中山弘隆・石堂一成：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，土木学会論文集，No.374，pp.495-502，1986.
- 7) 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，Vol.20，No.1，pp.29-35，1984.
- 8) 中山弘隆・谷野哲三：多目的計画法の理論と応用，計測自動制御学会，1994.
- 9) 亀廻井寿明・杉本博之・中山弘隆：構造最適設計のための改良型満足化トレードオフ法に関する研究，土木学会論文集，No.441，pp.117-126，1992.