

斜張橋の架設管理へのSI法とファジィSI法の適用

APPLICATION OF SI METHOD AND FUZZY SI METHOD TO CABLE ADJUSTMENT OF BRIDGES

古田 均* 亀井 正博** 金吉 正勝*** 田中 洋****

By Hitoshi FURUTA, Masahiro KAMEI, Masakatsu KANEYOSHI, Hiroshi TANAKA

One of the most important aspects in the construction of cable-stayed bridges is to adjust cable tension stresses properly. For example, during the construction of cable-stayed bridges using the cantilever method, cable tension adjustment is usually undertaken in each step of the installation of the cable between the towers and the girders. This adjustment reduces the discrepancies between design tension and measured tension in the cables, thus avoiding over-stressing of the structural members.

This paper presents a new method of estimating cable tension adjustments through the use of System Identification (SI). Moreover, an attempt is made to develop a more practical method, i.e., Fuzzy SI Method (FSI), using the fuzzy set theory. The use of fuzzy regression analysis makes it possible to reduce the computation time and load. These two methods are compared through several numerical examples. The results show that the both methods proposed here are not only simple to handle but also very practical for the design and construction of cable-stayed bridges.

Key Words : cable-stayed bridge, cable tension adjustment, fuzzy regression analysis, fuzzy set theory, system identification

1. まえがき

斜張橋は、構造的特長としてケーブルにプレストレスと呼ばれる内部不静定力を導入することにより、構造各部の部材力状態を変化させることができ、最適な部材力を決定することによって、合理的な設計を得ることができる。このため経済的な利点が大きく、かつ美観的にも優れているため、その建設数は近年増加し続けている。斜張橋の形式も多様化してきており、スパンの長大化を実現するため側径間部にプレストレスコンクリートを、中央径間部に鋼製桁を用いる複合斜張橋なども採用され始めた。このため構造はより複雑化し、また、設計・製作および架設に対する技術的要求も高度化しており、特に合理的な設計および架設管理の重要性が高まっている^{1), 2)}。

* 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 工修 大阪市建設局 街路部立体交差課主査 (〒530 大阪市北区梅田1丁目2番2-500)

*** 日立造船(株) 鉄構設計部鉄構システム課課長 (〒554大阪市此花区桜島1丁目3番40号)

**** 工修 日立造船(株) 鉄構設計部橋梁課課長代理 (〒554大阪市此花区桜島1丁目3番40号)

ケーブル部材の張力調整を合理的に、また高精度化するには、解析モデルが実橋と忠実に対応していなければならない。そのためには、架設途中の現場計測で得られたデータを基に、予め仮定しておいたいくつかの誤差要因の影響を定量的な形で評価する必要がある。そして、その解析モデル解と実橋挙動との差を最小にすることが望まれる。本研究では、この誤差要因解析にSystem Identification(SI法：構造同定法)の考え方をを用いる。SI法を用いれば、誤差要因さえ正確に把握できれば、組立(Forward)解析を適用することにより次の架設系あるいは完成系を精度よく予測することができる^{9)・10)}。しかし、実工事においては、使用する計測値に誤差が含まれることや、過去の施工経験に基づき誤差要因を仮定するが、その誤差要因の抽出並びに誤差モデルの設定が適切でない場合は、誤差量の推定が十分な精度で行えない場合がある。そのうえ工程の上から計測回数は少なく計測箇所も制約を受けるため、確率統計的な手法を用いるのに十分なデータを得ることができない。これらを解決するため、計測値をファジィデータと考え、ファジィ係数を持つファジィ線形回帰分析⁷⁾を構造同定法に適用した。本論文では、上記の方法をファジィSI法と呼び、その定式化と、簡単な斜張橋モデルを使用してSI法の解と比較する。さらに、本方法を実橋に適用し、その特長を述べるとともに、架設管理への適用方法について言及する⁸⁾。

2. 斜張橋の施工管理へのSI法の適用

SI法を適用するには、まず誤差要因を抽出しなければならない^{9)・10)}。架設初期の段階では、データが少ないことから過去の実績等を参考に予測することになる。一般に、斜張橋の施工誤差は、以下の3種類に分類される。

構造解析の誤差

- ・ヤング係数等の材料特性に関する誤差
- ・死荷重の推定誤差
- ・剛性の推定誤差
- ・境界条件の仮定誤差
- ・数値解析誤差 など

製作誤差

- ・寸法誤差
- ・継手部の誤差
- ・キャンバー誤差 など

施工誤差

- ・設置誤差
- ・現場溶接誤差
- ・現場ボルト接合誤差 など

これらの誤差が桁や塔に設計時とは異なる部材力やキャンバーを与えるわけである。

ここでは、架設時に計測される計測値と設計値との差を誤差量として Z で表す。具体的には Z はキャンバーおよび断面力の誤差を成分とするベクトルであり、多くの誤差要因の線形的重ね合わせとみなす。

$$Z = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot F_i \quad (F_i: \text{誤差モード}) \quad (1)$$

マトリックス表示をすれば、

$$Z = F \cdot \alpha \quad (2)$$

$$\text{ここに、 } \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1N} \\ \vdots & & & \vdots \\ f_{M1} & f_{M2} & \cdots & f_{MN} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{bmatrix}$$

M：計測項目数（断面力および変位など）

N：誤差要因の数

$\mathbf{F}$ ：誤差影響マトリックス（ $\mathbf{F}_i$ を列ベクトルとするマトリックス）

$\boldsymbol{\alpha}$ ：誤差寄与率ベクトル

構造物の断面力および変位の計測値を $\mathbf{R}$ 、誤差のない構造系での計測値を $\mathbf{R}_0$ とすると、かりに誤差要因を完全に抽出して展開すれば、次式となる。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 + \mathbf{Z} \quad (3)$$

しかし、実際は式(3)は近似的にしか成立しないので、式(3)の両辺の差の自乗和を最小とする条件を求める。

$$\phi = (\mathbf{R}_0 + \mathbf{Z} - \mathbf{R})^2 \rightarrow \text{最小化} \quad (4)$$

すなわち、目的関数 ϕ の最小化条件により式(5)となる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial \boldsymbol{\alpha}} = 0 \quad (5)$$

$\mathbf{R}_0 - \mathbf{R} = \mathbf{r}$ とおけば、

$$\phi = (\mathbf{Z} + \mathbf{r})^2 = (\mathbf{F} \cdot \boldsymbol{\alpha})^2 + 2 \cdot \mathbf{r} \cdot (\mathbf{F} \cdot \boldsymbol{\alpha}) + \mathbf{r}^2 \quad (6)$$

式(6)を式(5)に代入すれば、次式から誤差要因の寄与率 $\boldsymbol{\alpha}$ が求まる。

$$\boldsymbol{\alpha} = -[\mathbf{F}^t \cdot \mathbf{F}]^{-1} \cdot \mathbf{F}^t \cdot \mathbf{r} \quad (7)$$

無次元化ならびに各計測誤差の精度の重みを考慮するため、誤差要因に重み $\boldsymbol{\rho}$ を導入すれば、

$$\boldsymbol{\alpha} = -[\mathbf{F}^t \cdot \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{F}]^{-1} \cdot \mathbf{F}^t \cdot \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r} \quad (8)$$

ただし、 $\boldsymbol{\rho}$ は対角マトリックスである。

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \rho_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

実際の計算において、この重み $\boldsymbol{\rho}$ の適当な値を決めるには、ある程度の経験が必要である。

3. 斜張橋の施工管理へのファジィSI法の適用

架設時に計測される計測値と設計値との差を表す不整合量 $\tilde{Z}$ を、モデル式の係数の可能性(possibility)に依存するとみなし、ファジィ係数 $\tilde{A}_i$ を持つ誤差モードの線形的重ね合わせで表す。ここで、記号 $\sim$ はファジィ集合を表す。

$$\tilde{Z} = \sum_{i=1}^N \tilde{A}_i \cdot F_i \quad (F_i: \text{誤差モードベクトル, SI法では}\tilde{A}_i\text{を一定値}\alpha_i\text{としていた。}) \quad (10)$$

ここで、問題はファジィ係数 $\tilde{A}_i$ を決定することである。適合度を計る基準パラメータ h ($0 \leq h < 1$)を導入し、ファジィ線形回帰分析を適用すれば、以下の最大値問題、最小値問題に関する線形計画問題に帰着される⁷⁾。ここで、最大値問題とはデータがファジィ数で与えられたとき、各データに含まれる最大の幅をもつ回帰直線を求めることに対応する。これに対し、最小値問題とは、全てのファジィ数で表されたデータを含む最小幅の回帰直線を求めることに対応する。この最大値、最小値問題は、それぞれ真の解の下限值、上限値を与える。ただし、最小値問題では必ず解が得られるが、最大値問題では必ずしも解が得られない⁷⁾。この場合には、上限値である最小値問題の解を用いるべきである。計算に当たっては、図-1に示すように、ファジィ係数 $\tilde{A}_i$ を三角形のメンバーシップ関数で表現して、計算の簡略化を図った。これにより、決めるべき変数は中央値 α_i と左右のひろがりを表すパラメータ c_i となる¹¹⁾。

最大値問題

$$\text{目的関数 MAX} \rightarrow J(c_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_i \cdot |f_{ji}| \quad (11)$$

$$\text{制約条件 } Z_j \geq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |f_{ji}| - (1-h) e_j + \sum_{i=1}^N \alpha_i f_{ji} \quad (12)$$

$$-Z_j \geq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |f_{ji}| - (1-h) e_j - \sum_{i=1}^N \alpha_i f_{ji} \quad (13)$$

$$j = 1, 2, \dots, M \quad c_i \geq 0$$

最小値問題

$$\text{目的関数 MIN} \rightarrow J(c_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_i \cdot |f_{ji}| \quad (14)$$

$$\text{制約条件 } Z_j \leq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |f_{ji}| - (1-h) e_j + \sum_{i=1}^N \alpha_i f_{ji} \quad (15)$$

$$-Z_j \leq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |f_{ji}| - (1-h) e_j - \sum_{i=1}^N \alpha_i f_{ji} \quad (16)$$

$$j = 1, 2, \dots, M \quad c_i \geq 0$$

ここに、 M : 計測項目数 (断面力および変位など)

N : 誤差要因の数

Z_j : $\tilde{Z}$ の計測項目 j における計測値と設計値との不整合量

f_{ji} : 誤差モードベクトル F_i の j 成分

c_i, α_i : $\tilde{A}_i$ のメンバーシップ関数(図-1)の代表値

e_j : 計測値(ファジィ出力)の誤差

h : 適合度を計る基準パラメータ($0 \leq h < 1$)

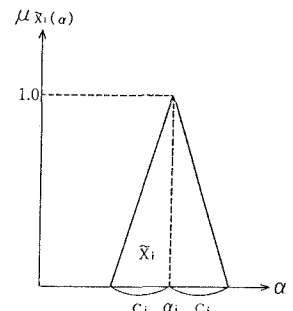


図-1 $\tilde{A}_i$ のメンバーシップ関数

4. 数値計算例と考察

4.1 解析モデル

図-2に示すような斜張橋に、SI法およびファジィSI法を適用し、両者の比較を行う。モデルの主要寸法、格点番号および部材番号は図-2、3、断面性能および死荷重は、表-1のとおりである。

表-1 断面性能および死荷重

断面性能				死荷重	
	A (m ²)	I (m ⁴)	E (tf/m ²)		W (tf/m)
桁	0.3~0.4	0.25~0.35	2.1×10^7	桁、舗装他	7.0
塔	0.3	0.25	◇	塔	5.0
ケーブル	0.0055~0.0012	—	2.0×10^7	ケーブル	0.05~0.10

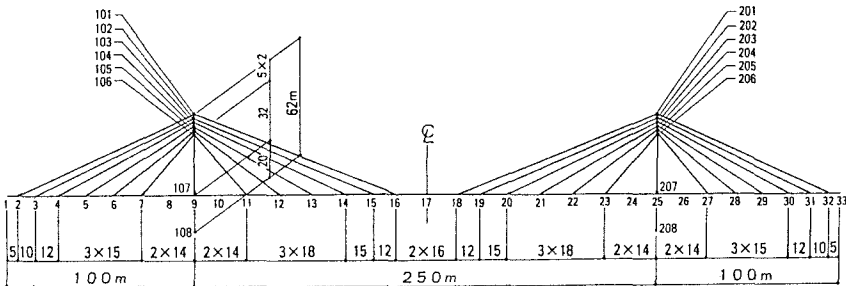


図-2 主要寸法および格点番号

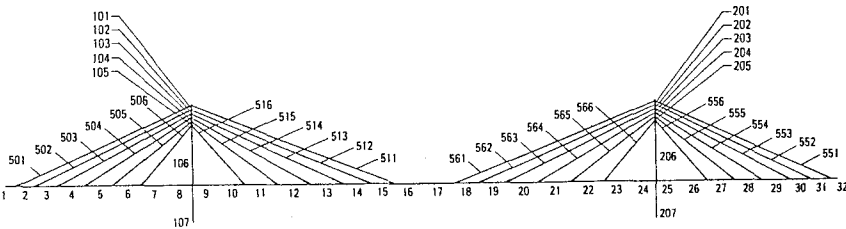


図-3 部材番号

4.2 SI法とファジィSI法の適用

最初にSI法の適用方法について述べる。まず誤差を表-2に示すように6種類想定し、おのおのの誤差を含む完成系を組み立て計算により6種類作成する。誤差を含まない系との差が誤差モードであり、これらを並べると誤差モードマトリックスとなる。次に表-2中の真値誤差を重ね合わせた完成系を作成し、前章の誤差要因分析を適用する。ここでは誤差寄与率 α_i が a/b で表わされることになる。

次に、ファジィSI法を同様にして適用する。ここで、誤差系と誤差のない系との差（全ケーブル張力、主桁および塔のキャンバー値）を、計測値と見なすことにする。また、ケーブル張力およびキャンバーの計測誤差を各々2tf、2cmと仮定し、 $e_i = 2.0(\text{tf}, \text{cm})$ とした。実際の誤差は、もう少し小さいと考えられるが、本法の有効性を示すために、大きめの値を仮定している。適合度を与える基準パラメータ h の値としては、ファジィデータの半分を考慮するものとして、 $h=0.5$ と仮定した。また、計測値に読み取り誤差を表-4のように与えた場合についても計算を行った。

4.3 計算結果と考察

表-3にSI法とファジィSI法による計算結果を示す。この表から、最大値問題の方が最小値問題より精度のよい解を与えることがわかる。これは、最小値問題の方が全てのデータを含むように定式化されており、最大値問題に比べて、幅の広い解を与えることから明かである。最大値、最小値問題はその定式化の基本的な考え方が異なっているため、各ファジィ係数の値（その幅も含めて）は異なることになる。理論的には、正解は最大値問題解と最小値問題解の間に存在するはずであるが、少しこの範囲からでている。構造解析に関わる線形近似などの影響であろう。例えば、剛度とたわみの関係に見られるように、式(10)の線形性が厳密には成立しないことなどが原因として挙げられる。しかしながら、最大値問題解と正解との差はほとんどなく、実用上等しいとみなしてよい。なお、 α_5 に対して最小値問題が大きい値を与えているが、 α_5 は塔の剛度に関するもので誤差モードベクトルの値が小さく、他の要因に比べて構造系全体の応答量に与える影響が小さい。このことから、誤差要因として、実際に考慮する必要がないことがわかる。両手法とも誤差寄与率はよく一致しており、また、妥当な値であることから有効性が示されたものと思われる。計測値に読み取り誤差を与え、ファジィSI法を用いて計算した結果を表-5に示す。この場合は、計測読み取り誤差を考慮したので e_i の値を2.5として計測値の誤差の幅を広げた。この計算結果よりファジィSI法は計測読み取り誤差が存在する場合でも妥当な解が得られ、その適用範囲の広さが分かる。特にファジィSI法では、SI法と違って誤差寄与率 α_i は幅のある値として求められる。そこで、誤差寄与率 α_i に幅を持たせることによって完成系の予測値にも幅ができ、完成系のワーストシナリオを仮定して、まだ

表-2 誤差一覧表

誤差系	真値誤差 (a)	想定誤差(影響値) (b)
1	側径間の重量5%減	側径間の重量10%増
2	中央径間の重量5%増	中央径間の重量10%増
3	側径間の桁剛度6%増	側径間の桁剛度10%増
4	中央径間の桁剛度4%減	中央径間の桁剛度10%増
5	塔の剛度誤差無し	塔の剛度10%増
6	全ケーブルのヤング係数10%減	全ケーブルのヤング係数10%減

表-3 ファジィSI法とSI法との計算比較

誤差寄与率 a/b	正解	ファジィSI法($h=0.5, e_i=2.0$)			SI法 ($\rho=E$)
		MAX	MIN	MAX-MINの平均値	
α_1	-0.5	-0.49972	-0.49023	-0.49498	-0.49723
α_2	+0.5	0.49995~0.50001	0.55028	0.50013	0.50004
α_3	+0.6	0.59673~0.59797	0.48572~0.57706	0.56437	0.57924
α_4	-0.4	-0.40172~-0.39908	-0.40272	-0.40156	-0.40025
α_5	0.0	-0.00293	-0.37968~0.66562	0.07002	-0.00771
α_6	+1.0	0.99978~1.00000	0.99660~1.00080	0.99930	0.99994

表-4 計測値読取り誤差

ケーブル張力	張力読取り誤差	X方向変位	変位読取り誤差	Y方向変位	変位読取り誤差
部材番号	(tf)	格点番号	(cm)	格点番号	(cm)
501,504 511,514	-1.0	101	-1.0	2,8,13	-1.0
502,505 512,515	0.0	103	0.0	5,10,16	0.0
503,506 513,516	1.0	106	1.0	7,11,17	1.0

架設されていないケーブル部材をも考慮してシム量を決定することができるので、従来の架設管理と比較して、より汎用性の高い架設管理を行うことができる。また、ケーブル張力調整にあたって、どの項目に施工管理上の厳密さが要求されるかを判断する場合にも、有力な理論的手がかりを与えることができる。さらに、SI法では誤差要因の適切な選択とその誤

差量についてもできるだけ現実に近い値にする必要があるが、その点ファジィSI法ではかなりのタフネスがあることから極端な値を想定しない限りは十分な精度で正解を得ることができる。

表-5 ファジィSI法の計算結果
(読取り誤差を考慮した場合)

誤差寄与率 a/b	正解	ファジィSI法 MAX(h=0.5,ej=2.5)
α_1	-0.5	-0.50967~-0.50661
α_2	+0.5	0.49926~0.50076
α_3	+0.6	0.66994
α_4	-0.4	-0.40157~-0.39981
α_5	0.0	0.11391
α_6	+1.0	1.00038

4.4 菅原城北大橋の精度管理への適用⁸⁾

本橋は、図-4に示すような橋長476mの3径間連続鋼斜張橋で、側径間を張り出しながら架設するという特徴を有している。また、側径間端部でヒンジ構造によりアプローチ部のPCラーメン橋と結合されることから、従来よりも精度の高い施工管理を行う必要があった。ここでは、本橋の架設時の精度管理にSI法とファジィSI法とを適用したのでその概要と結果について述べる。

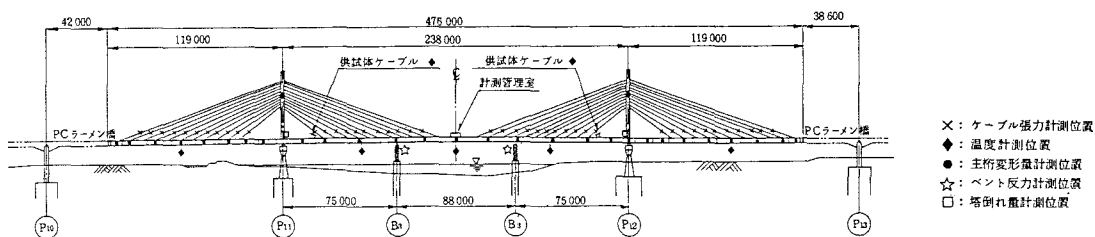


図-4 一般図(架設系)

(1) 精度管理システム

本橋の精度管理システムは、現地における計測システムと、計測結果を解析してシム調整量の決定を行う解析システムの2つからなる。現地計測は、主桁・塔の変形、ケーブル張力、橋体温度、ベント反力について行った（図-4）。計測値はパソコンにより、誤差解析に対する入力データとして編集処理するとともに、ディスプレイ上に目標値と比較して図示できるようにした。

解析システムは、各管理項目の計測値と目標値との差、すなわち誤差量を計算し、SI法とファジィSI法を適用して誤差解析を行い、得られた誤差量より無応力形状を求め直し、それをもとに組立計算を行って最終的な完成系を予測するものである。また、予測された完成系が表-6に示す管理基準値を上回る場合には、最適なシム量を計算しなおすシステムについても別途開発している¹²⁾。

表-6 精度管理基準値

管理項目	基準値	許容値
主桁の鉛直変位	$\pm \#/2000$	± 119
塔の倒れ	$\pm h/500$ ¹⁾	± 89
	$\pm h/1000$ ²⁾	± 45
ケーブル張力	$\pm 0.1Ta$	図-6参照

1) 主桁の形状誤差を考慮した場合

2) 主桁の形状誤差を0とした場合

表-7 完成系における形状誤差

部材	箇所	調整後予測値	閉合後実測値
主桁の鉛直変位 (mm)	中央径間中央付近	-64	-63
	その他	-27~+52	-47~+25
塔の倒れ (mm)	P ₁₁	-14 (22)	-10 (1)
	P ₁₂	-3 (-70)	+6 (-40)

() 内は主桁の形状誤差を考慮した場合

() 外は主桁の形状誤差を0とした場合

なお計測は、部材の温度差が小さくなる午後9時ごろに開始し、調整後の確認計測は翌日の午前3時ごろに行い、精度の向上を図った。

(2) 精度管理の結果と考察

第7段ケーブル架設時に行った精度管理の要領を述べる。このときの計測結果からSI法により予測した完成形状は図-5(a)のとおりで、右岸側の塔および主桁形状の一部で管理基準値を超えることが予想された。誤差要因の分析結果から、この原因は右岸側側径間の現場継手の角折れ誤差であることが分かった。またファジィSI法の適用からも誤差寄与率 α_1 の中央値は、ほぼ同一の結果が得られた。そこで、右岸側側径間の第7段ケーブルより上部5段のケーブル(図-5中の*印)を26~45mm引きしめることにより形状調整することにした。このとき、主桁・塔の応力度は別途定めた許容値以内であることを条件としている。主桁閉合後の計測結果を図-5、6および表-7に示す。ケーブルの張力誤差は概ね許容張力の5%以下で、 $-14\text{tf} \sim +11\text{tf}$ /ストランドであった。ケーブル張力誤差は右岸側側径間でばらつきが大きいのが、これは主桁の形状誤差を調整したためである。各架設ステップごとに精度管理を行った結果では、各管理項目とも十分基準値内に納まっている。第7段ケーブル架設時に行ったような大幅なシム量の変更は、当該架設ケーブルのみを調整する従来の方法では非常に困難と思われ、完成系を予測しながら架設を進めることができるSI法ならびにファジィSI法を適用した本管理手法の有効性が示されたものと考えられる。

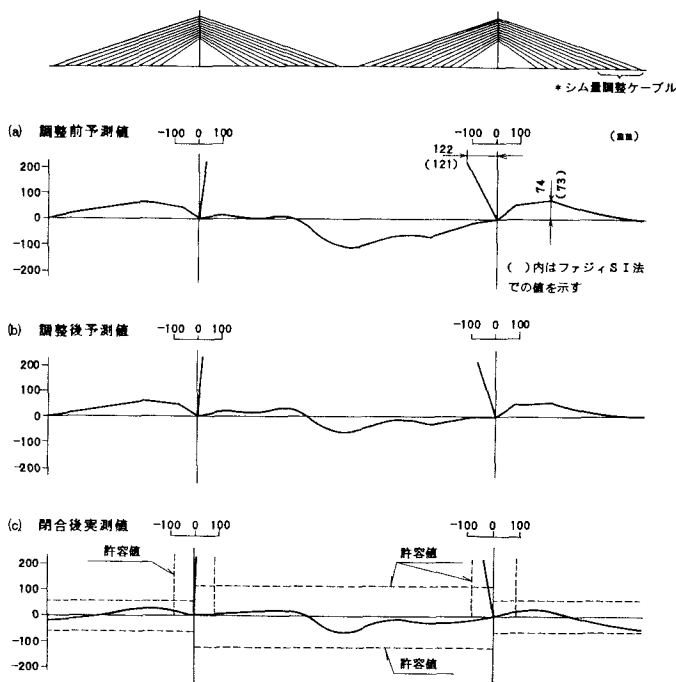


図-5 完成系における形状誤差

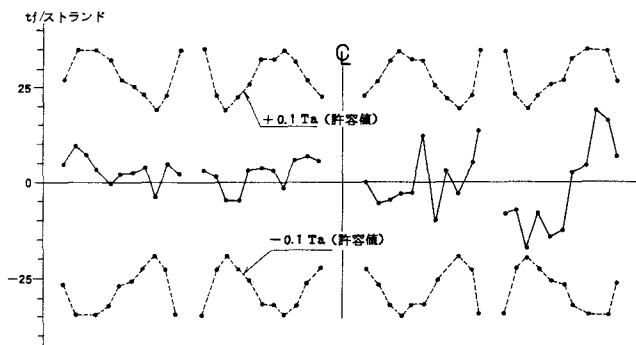


図-6 ケーブル張力誤差

5. 結論と今後の課題

SI法およびファジィSI法を斜張橋の架設管理に適用し、数値計算例から両者とも妥当な結果を与えることが判明した。特に、実橋に適用した結果から、両者の実用性の確認ができた。SI法によれば、完成系を事前に予測しながら架設を進めていくことができるので、従来の当該架設ケーブルのみを調整する方法と比較して、架設精度の向上が期待できる。さらに、ファジィSI法はSI法と同様の答を出すことができ、計算がより簡単になるという利点をもつ。すなわち、ファジィ理論を用いる長所は、理論が簡明であること、従来の最小自乗法を用いた理論に必要な重みの決定などの煩雑なプロセスがなく実用性に富むことである。これは制約条件式に、経験豊かな技術者のケーブル張力に対する直感や工学的判断を許容値と言う形で導入することができるからである。

ファジィSI法はSI法の拡張となっており、完成系の予測に幅を持たせるので、ケーブル張力調整時にどのような厳密さが要求されるかを判断する場合に有力な理論の手がかりが得られる。また、非線形性の現れやすい構造系にファジィSI法を適用すると、線形解析によっても柔軟に対応できることが知られている。

今後、基準パラメータ h および計測値の誤差 e_i の妥当な決定方法などを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 藤澤伸光：斜長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. 9/10
- 2) 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、第374号/I-6、pp. 495-502、1986. 10
- 3) 亀井正博、金吉正勝、田中洋：SI法を用いた吊り構造系の誤差要因分析について、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集、I-198、1987. 10
- 4) 亀井正博、古田均、金吉正勝、田中洋：ファジィSI法によるケーブル張力調整法について、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集、I-160、1989. 10
- 5) 赤尾宏、坂井藤一、竹村勝之、松本憲治：橋梁の施工精度に関する研究、川崎重工技報96号、1987. 7
- 6) Sakai, F. and Umeda, A. :Structural Error Identification for Control of Construction Accuracy, ICOSAR, Aug. 1989
- 7) 寺野寿郎、浅居喜代治、菅野道夫：ファジィシステム入門、オーム社、pp. 67-81、1987
- 8) 亀井正博、井下泰具、若林保美：菅原城北大橋（斜張橋）における架設時の精度管理、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集、I-159、1989. 10
- 9) Tanaka, H., Kamei, M. and Kaneyoshi, M. :Cable Tension Adjustment by Structural System Identification, CABRIDGE, Bangkok, Nov. 1987
- 10) Tanaka, H., Kamei, M. and Kaneyoshi, M. :New Cable Tension Adjustment Method for Suspended-span Bridge, EASEC-2, Chiang Mai, Jan. 1989
- 11) 白石成人、古田均、尾崎美伸：構造物の疲労解析へのファジィ理論の応用、第2回ファジィシステムシンポジウム論文集、1986. 6
- 12) 古田均、亀井正博、金吉正勝、田中洋：ファジィ理論を応用したケーブル張力の最適調整法、土木学会、システム最適化に関するシンポジウム講演集、1989. 11

(平成元年10月2日受付)