

(22) ファジィ理論を応用したケーブル 張力の最適調整法

OPTIMAL TENSION ADJUSTMENTS BASED ON FUZZY SET THEORY

古田 均*

亀井 正博**

金吉 正勝***

田中 洋****

Hitoshi FURUTA, Masahiro KAMEI, Masakatsu KANEYOSHI, Hiroshi TANAKA

It is the most important but time consuming procedure to determine the optimum cable prestress in the design of cable-stayed bridge. Various kinds of errors will be introduced during the construction, therefore cable length adjustment is necessary to alter stress distribution and geometrical configuration of the bridge. The authors have developed new methods to overcome these problems through the use of the fuzzy set theory. First a method is formulated for obtaining optimum cable prestress. Secondly new system identification method is exploited by applying fuzzy regression analysis. Finally a method is also formulated to adjust cable length by shim plates. The results of numerical examples show that the proposed methods 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、構造的特长としてケーブルにプレストレス(PS)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、最適な部材力の決定によって、合理的な設計を行なうことができる。このため経済的に優れており、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(PC)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。具体的には設計時における合理的なケーブルプレストレスの決定方法、架設時のケーブル張力および主桁、塔のキャンパー誤差などを修正するためのシム調整方法などが重要な課題となっている。これら設計、架設において必要となるケーブル調整に関する筆者らの主張する概略フローチャートを図-1, 2に示す。

筆者らは、ファジィ理論を適用することによって、実用的なプレストレスの最適決定法(ファジィプレストレス決定法と呼ぶ)をファジィ線形回帰分析を用いて開発した。架設の精度を上げるため、筆者らが従来開発し実橋(菅原城北大橋)に適用してきたSI法と呼ぶ構造同定法(System Identification)に^{1), 2)}、ファジィ理論を適

* 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

** 工修 大阪市建設局 街路部立体交差課主査

*** 日立造船(株) 鉄構設計部鉄構システム課課長

**** 工修 日立造船(株) 鉄構設計部橋梁課係長

```
graph TD; Start([設計START]) --> Step1[構造諸元仮定]; Step1 --> Step2[構造解析]; Step2 --> Step3[断面照査]; Step3 -- NO --> Step2; Step3 -- OK --> End([END]); Step2 <--> Step4[ファジィプレストレス決定法]; Step4 <--> Step5((プレストレスによる影響値));
```

The flowchart illustrates the design process for prestressed concrete structures. It begins with a start node labeled "設計START". The process then moves to a box labeled "構造諸元仮定" (Assumption of structural elements). This leads to a box labeled "構造解析" (Structural analysis), which contains a list of inputs: "・死荷重" (Dead load), "・プレストレス" (Prestress), "・活荷重" (Live load), and "・架設荷重" (Construction load). From "構造解析", the process moves to a box labeled "断面照査" (Section check). If the check fails (NO), the process loops back to "構造解析". If it passes (OK), the process ends at "END". Additionally, there is a feedback loop from "断面照査" to a box labeled "ファジィプレストレス決定法" (Fuzzy prestress determination method), which then connects to a cylinder labeled "プレストレスによる影響値" (Influence value of prestress). This cylinder feeds back into the "構造解析" box, indicating that the influence value is used as an input for the structural analysis.

```

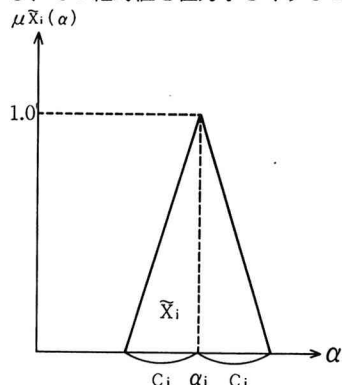
graph TD
    Start([架設 START]) --> Measure[出来形計測  
桁、塔、変位  
ケーブル張力]
    Measure --> Calc[誤差量の計算]
    Calc --> Infer[誤差要因の推定]
    Infer --> Sim1[ファジィシミュレーション]
    Sim1 --> Infer
    Infer --> Sim2[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim2 --> Sim1
    Sim2 --> Sim3[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim3 --> Sim2
    Sim3 --> Sim4[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim4 --> Sim3
    Sim4 --> Sim5[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim5 --> Sim4
    Sim5 --> Sim6[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim6 --> Sim5
    Sim6 --> Sim7[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim7 --> Sim6
    Sim7 --> Sim8[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim8 --> Sim7
    Sim8 --> Sim9[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim9 --> Sim8
    Sim9 --> Sim10[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim10 --> Sim9
    Sim10 --> Sim11[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim11 --> Sim10
    Sim11 --> Sim12[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim12 --> Sim11
    Sim12 --> Sim13[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim13 --> Sim12
    Sim13 --> Sim14[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim14 --> Sim13
    Sim14 --> Sim15[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim15 --> Sim14
    Sim15 --> Sim16[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim16 --> Sim15
    Sim16 --> Sim17[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim17 --> Sim16
    Sim17 --> Sim18[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim18 --> Sim17
    Sim18 --> Sim19[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim19 --> Sim18
    Sim19 --> Sim20[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim20 --> Sim19
    Sim20 --> Sim21[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim21 --> Sim20
    Sim21 --> Sim22[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim22 --> Sim21
    Sim22 --> Sim23[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim23 --> Sim22
    Sim23 --> Sim24[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim24 --> Sim23
    Sim24 --> Sim25[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim25 --> Sim24
    Sim25 --> Sim26[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim26 --> Sim25
    Sim26 --> Sim27[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim27 --> Sim26
    Sim27 --> Sim28[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim28 --> Sim27
    Sim28 --> Sim29[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim29 --> Sim28
    Sim29 --> Sim30[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim30 --> Sim29
    Sim30 --> Sim31[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim31 --> Sim30
    Sim31 --> Sim32[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim32 --> Sim31
    Sim32 --> Sim33[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim33 --> Sim32
    Sim33 --> Sim34[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim34 --> Sim33
    Sim34 --> Sim35[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim35 --> Sim34
    Sim35 --> Sim36[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim36 --> Sim35
    Sim36 --> Sim37[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim37 --> Sim36
    Sim37 --> Sim38[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim38 --> Sim37
    Sim38 --> Sim39[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim39 --> Sim38
    Sim39 --> Sim40[ファジィシミュレーション  
調整法]
    Sim40 --> Sim39
    Sim39 --> End([END])
    End --> Next([次STEPへ])
  
```

図-2 架設におけるファジィ理論応用例

2.1 ファジィプレストレス決定法

2.1 ファジィプレストレス決定法

死荷重時の断面力を F_d 、PS導入後の断面力を $\tilde{F}_0=(F_0, \Delta F)$ 、ここに、 F_0 は、設計目標値の中心値、 ΔF は、設計目標値の幅すなわちあいまい度の幅を示す。また、記号 $\sim$ はファジィ集合を表す。例えば、ある格点

図-3 $\tilde{X}_i$ のメンバーシップ関数

の曲げモーメントの設計目標値をおよそ1000～1200tfmとすれば、 $F_o = 1100\text{tfm}$ 、 $\Delta F = 100\text{tfm}$ となる。 F_d と $\tilde{F}_o$ は次の関係にある。

$$\tilde{F}_o = F_d + \sum_{i=1}^N \tilde{X}_i \cdot K_i \quad (1)$$

ここに、 $\tilde{X}_i$ は、図-3に示す c_i と α_i を代表値とするメンバーシップ関数を持つファジィ量である。 K_i は単位プレストレスによる断面力の影響値である。すなわち、PS導入後の断面力 $\tilde{F}_o$ を幅のあるあいまいな値（ファジィ出力）と考えていることになる。そうすれば、ファジィ量 $\tilde{X}_i$ は以下の(2)～(5)式を解くことによって、ファジィ回帰モデルのMax問題⁵⁾として定式化される。

$$\text{目的関数 } \text{MAX} \rightarrow J(c_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_i \cdot |K_{ji}| \quad (2)$$

$$\text{制約条件 } F_{oj} \geq F_{dj} + (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |K_{ji}| - (1-h) \Delta F_j + \sum_{i=1}^N \alpha_i K_{ji} \quad (3)$$

$$-F_{oj} \geq -F_{dj} + (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |K_{ji}| - (1-h) \Delta F_j - \sum_{i=1}^N \alpha_i K_{ji} \quad (4)$$

$$j = 1, 2, \dots, M \quad c_i \geq 0 \quad (5)$$

ここに、 M ：断面力照査項目数

N ：ケーブル部材数

K_{ji} ：ケーブル部材 i の単位プレストレスの変化による断面力 j 成分の影響値

F_{oj} ：断面力 j 成分の設計目標値の中央値

ΔF_j ：断面力 j 成分の設計目標値に対する上下限値の幅

c_i, α_i ： $\tilde{X}_i$ のメンバーシップ関数（図-3）の代表値

h ：適合度を計る基準パラメータ ($0 \leq h < 1$)

(2)式の目的関数を最大にすることは、ファジィ出力が設計目標値の中心値に近づくことを意味している。

(3)式は設計目標値の上限値に対する制約条件に対応し、(4)式は下限値に対応している。

2.2 ファジィSI法⁶⁾

ファジィSI法は、構造系に含まれる誤差要因を構造同定法を用いて分析する方法である。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の手法を次のように応用した。

架設時の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に依存するとみなし、ファジィ係数 $\tilde{A}$ を持つ誤差モードの線形的重ね合わせで表す。

$$\tilde{Z} = \sum_{i=1}^N \tilde{A}_i \cdot F_i \quad (F_i: \text{誤差モードベクトル}^{1)}, \text{SI法では}\tilde{A}_i\text{を一定値}\alpha_i\text{としていた。}) \quad (6)$$

ここで、問題は誤差寄与率すなわちファジィ係数 $\tilde{A}_i$ 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、誤差寄与率は、以下の(7)～(10)式で示した線形計画問題より得られる⁵⁾。なお、文献⁶⁾では、Min問題も取り扱っているが、本稿では、Max問題に統一した。

$$\text{目的関数 } \text{MAX} \rightarrow J(c_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_i \cdot |F_{ji}| \quad (7)$$

$$\text{制約条件 } Z_j \geq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |F_{ji}| - (1-h) e_j + \sum_{i=1}^N \alpha_i F_{ji} \quad (8)$$

$$-Z_j \geq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |F_{ji}| - (1-h)e_j - \sum_{i=1}^N \alpha_i F_{ji} \quad (9)$$

$$j = 1, 2, \dots, M \quad c_i \geq 0 \quad (10)$$

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 ： A_i のメンバーシップ関数の代表値

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 ($0 \leq h < 1$)

2.3 ファジィシム調整法

斜張橋等の吊構造物の架設時において、ケーブル張力の誤差および主桁、塔などのキャンバー誤差を消去するため、ケーブル定着部にシムプレートを挿入または撤去することによりバランスのとれた構造系となるようにシム調整を行なっている。シム量算出については、数理計画法を応用するものが主である。藤澤³⁾は、ケーブル張力とキャンバーの残留誤差を考慮し、これらを無次元化した自乗和を最小にすることからシム量を求めている（本稿ではシム最小自乗法と呼ぶ）。アルゴリズムが比較的容易であるためわが国で最も使用されているようであるが、無次元値を調節するための重みの決定に設計者の経験に基づく繰り返し計算が必要となる難点がある。古川⁷⁾らは、多目的計画法（満足化トレードオフ法）を適用して、目的関数にケーブル張力誤差、キャンバー誤差のほか各ケーブルのシム量、シム調整箇所数も考慮してシム量を求めている。しかし、アルゴリズムが難解で計算機の容量もかなり必要である。ここで提案するファジィシム調整法は、2.1の定式化と同様に、設計者の意図する希望調整値を制約条件に含めることができ、容易にシム量を計算することができる。その時、重み決定のような煩雑なプロセスを必要としない。例えば、ケーブル張力、主桁、塔などのキャンバー値および支承反力のシム調整による希望調整値を $\tilde{Y} = (Y, \Delta Y)$ とし、 S_i を単位シム量によるケーブル張力、キャンバー値、支承反力などの影響値とすると、シム量決定は、2.1と同様に以下のように定式化される。

$$\tilde{Y} = \sum_{i=1}^N \tilde{B}_i \cdot S_i \quad (11)$$

$$\text{目的関数} \quad \text{MAX} \rightarrow J(c_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_i \cdot |S_{ji}| \quad (12)$$

$$\text{制約条件} \quad Y_j \geq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |S_{ji}| - (1-h) \Delta Y_j + \sum_{i=1}^N \alpha_i S_{ji} \quad (13)$$

$$-Y_j \geq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i |S_{ji}| - (1-h) \Delta Y_j - \sum_{i=1}^N \alpha_i S_{ji} \quad (14)$$

$$j = 1, 2, \dots, M \quad c_i \geq 0 \quad (15)$$

ここに M：照査項目数

N：ケーブル部材数

Y_j ：ケーブル張力、キャンバー値など j 成分に対する希望調整値の中央値

ΔY_j ：ケーブル張力、キャンバー値など j 成分に対する希望調整値の上下限値の幅

S_{ji} ：ケーブル部材 i の単位シムの変化によるケーブル張力、キャンバー値など j 成分の影響値

c_i, α_i ： $\tilde{B}_i$ のメンバーシップ関数の代表値

h : 適合度を計る基準パラメータ ($0 \leq h < 1$)

3. 計算例および考察

3.1 解析モデル

簡単な斜張橋 (図-

4) を用いて各方法の計算例を示す。モデルの主要寸法、格点番号および部材番号は図-4、5、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			
	A (m ²)	I (m ⁴)	E (tf/m ²)
桁	0.3~0.4	0.25~0.35	2.1×10^7
塔	0.3	0.25	"
ケーブル	0.0055 ~0.012	—	2.0×10^7

死荷重	
	W (tf/m)
桁、舗装他	7.0
塔	5.0
ケーブル	0.05~0.10

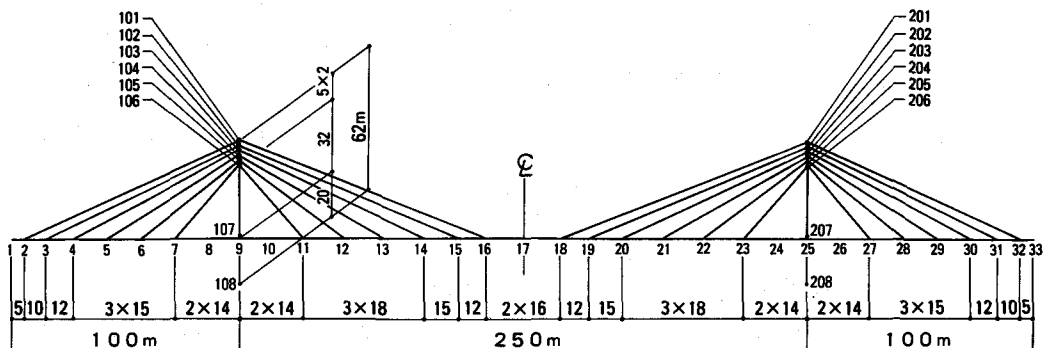


図-4 主要寸法および格点番号

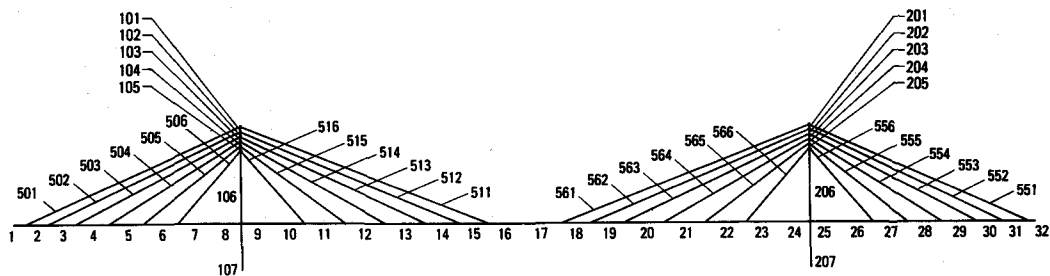


図-5 部材番号

3.2 ファジィプレストレス決定法

モデルの死荷重時 (プレストレス導入前) の主桁のモーメント分布およびケーブル張力を図-6に示す。そこで、表-2に示す設計目標値を入力し、本方法により決定した主桁のモーメント分布およびケーブル張力を図-7に示す。山田・古川らの「最小ひずみエネルギー規準」により求めた解も図-8に比較のために示す。モーメント形状の滑らかさは両方法とも良く似たものである。桁断面におけるモーメント差は、「最

表-2 設計目標値

項 目	部 材 番 号	範 囲
プレストレス量	全ケーブル	-150 ~ +150 tf
モーメント	3	-1350 ~ -500 tf·m
"	9	-1600 ~ -1300 "
"	13	+500 ~ +1200 "
"	16	-1000 ~ +1000 "
"	17	-500 ~ +500 "
張 力	501	550 ~ 650 tf
"	502	300 ~ 350 "
"	503	170 ~ 250 "
"	504	170 ~ 250 "
"	505	170 ~ 250 "
"	506	170 ~ 250 "

小ひずみエネルギー規準」の結果の方が小さいが、モーメント分布の形状を見れば支点上よりも側径間のモーメント値が大きくなっている。これに対し、本方法では、設計目標値を調整することにより、自由にモーメント分布形状を変えることができる。図-7の結果は、支点上よりも側径間のモーメント値が小さくなっている。同じ径のケーブル部材（部材番号503～506）は、ほぼよく似たケーブル張力となっている。

このように、設計目標値を設定することにより、設計者の意図を反映した解が得られるので、例えば、複合斜張橋のPC桁と鋼桁の連結部のモーメントを特定の値に制御したい場合などに本方法はきわめて有効である。さらに、キャンバー値および支承反力を制御する機能をつけ加えることも容易である。

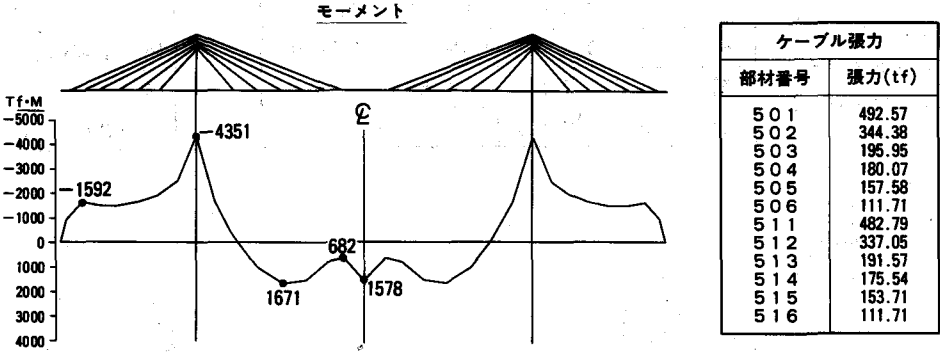


図-6 PS導入前モーメント分布

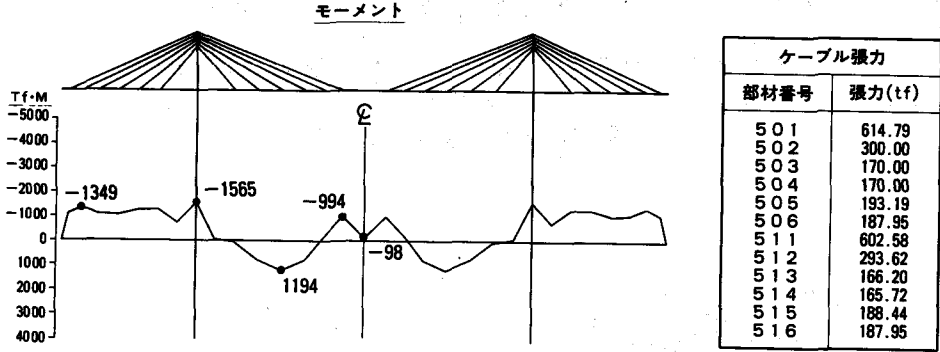


図-7 PS導入後（ファジィPS決定法）

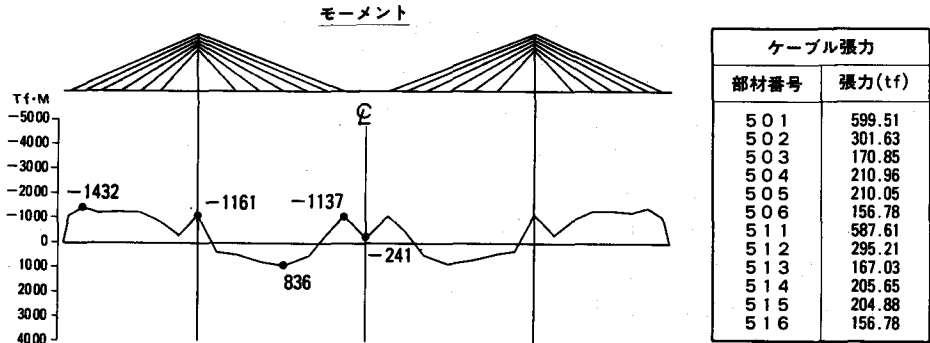


図-8 PS導入後（最小ひずみエネルギー規準）

3.3 ファジィSI法

モデルの構造系に、表-3に示す6種類の誤差（真値誤差）があると仮定し、組み立て計算を行って誤差系を作成する。影響値は表-3の想定誤差を用いて計算した。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パー値）を、計測値と仮定した。ケーブル張力およびキャンパーの計測誤差を各々2tf、2cmと仮定し、 $e_j = 2.0(\text{tf/cm})$ とした。表-4のように、本方法によれば誤差寄与率 α は幅のある値として求められる。それに対してSI法の解では、 α_i は幅を持たないクリスプな値である。誤差寄与率 α_i に幅を持たせることから完成系の予測値にも幅ができる。完成系のワーストシナリオを仮定し、まだ架設されていないケーブル部材をも考慮してシム調整量を決定できるので、本方法のシム調整は従来の方法と比較して柔軟性に富んでいる。また、ケーブル張力調整にどのような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。

表-3 誤差一覧表

誤差系	真 値 誤 差	想 定 誤 差 (影響値)
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-4 ファジィSI法とSI法の計算比較

誤差寄与率	正 解	ファジィSI法($h=0.5, e_i=2.0$)	SI法
α_1	-0.5	-0.49972	-0.49723
α_2	+0.5	0.49995~0.50001	0.50004
α_3	+0.6	0.59673~0.59797	0.57924
α_4	-0.4	-0.40173~0.39908	-0.40025
α_5	0.0	-0.00293	-0.00771
α_6	+1.0	0.99978~1.00000	0.99994

3.4 ファジィシム調整法

前節で作成した誤差系に対し、表-5に示す制約条件で2ケース計算した。表-6に本方法とシム最小自乗法との結果を比較した。シム量に関しては、両方法とも変わらないが（マイナスは撤去を示す）、表-7（ケース1、

表-5 シム調整の制約条件

制 約 条 件	ケース1	ケース2
シムプレート厚 (mm)	± 60	± 35
ケーブル張力誤差 (tf)	± 15	± 20
塔X方向変位 (m)	± 0.100	± 0.100
桁Y方向変位 (m)	± 0.350	± 0.300

表-6 シム量計算結果

表-7 ケーブル張力誤差(シム調整後)

ケーブル番号	ケース1		ケース2	
	本 法	シム最小自乗法	本 法	シム最小自乗法
501	-47.94	-51.37	-35.00	-33.33
502	-35.45	-40.62	-24.17	-23.81
503	-10.15	-17.81	-0.45	-2.40
504	12.31	3.41	14.27	16.04
505	26.37	20.21	27.65	29.47
506	32.78	26.89	33.60	32.29
511	17.08	16.91	25.73	30.12
512	-8.38	-7.49	-0.79	6.54
513	-16.76	-14.29	-7.25	0.12
514	-29.33	-23.95	-22.58	-11.35
515	-35.63	-27.15	-35.00	-17.98
516	-34.17	-23.99	-32.56	-19.38

ケーブル番号	ケース1		ケース2	
	本 法	シム最小自乗法	本 法	シム最小自乗法
501	14.17	16.42	17.82	18.68
502	14.05	14.09	17.08	16.04
503	13.35	11.23	16.18	12.89
504	10.90	7.60	6.22	8.99
505	2.42	4.07	0.00	5.14
506	0.00	1.04	0.00	1.71
511	14.47	11.95	17.14	13.71
512	14.77	13.01	14.90	14.65
513	14.34	13.41	17.08	14.87
514	12.63	12.61	14.05	13.71
515	8.23	10.26	2.61	10.91
516	0.00	6.47	0.00	6.68

ケーブル番号501参照)に示したようにシム最小自乗法においては、シム調整後のケーブル張力誤差は、制約条件を越えているものがあることがわかる。もちろんシム最小自乗法でも制約条件を満たす解が得られるが、試行錯誤的に重みを変化させ、解を見つけねばならず現場作業ではかなりの負担となる。本方法は、線形計画問題の制約条件式に希望調整値を直接入力することにより、繰り返し計算の必要も無く、設計者の意図を直接反映させられるので、短時間に解を得ることができる。

4. 結 論

本研究では、斜張橋などで必要となるケーブル張力の最適調整法について、ファジィ理論を用いて統一的に論じた。従来の方法との比較検討を行った結果、本研究によって得られた結論は次のようにまとめられる。

- 1) ファジィプレストレス決定法、ファジィSI法、およびファジィシム調整法は計算方法が簡明であるので、設計者の意図を反映した解を比較的短時間に得ることができる。
- 2) このため、設計におけるプレストレス決定作業の効率化、また架設時のシム調整作業の迅速化および幅を持った形で完成系の予測が可能となることから架設管理の高精度化が期待できる。
- 3) すべての問題を線型計画問題に帰着できることから、既存のプログラムパッケージが利用できシステム化を容易に行うことができる。
- 4) 設計者の意図を設計目標値あるいは希望調整値という形で定式化できるので、複合斜張橋あるいは部定式斜張橋^{*)}などのケーブル調整にも有効である。

今後、本理論を実橋の設計および建設に適用し、実用性をさらに高める予定である。

参考文献

- 1) Tanaka, H., Kamei, M. and Kaneyoshi, M.: Cable Tension Adjustment by Structural System Identification, International Conference on Cable-stayed Bridges, pp.856-866, Bangkok, 1987.
- 2) 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
- 3) 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、1984.9/10
- 4) 山田善一、古川浩平、江草拓、井上幸一：斜張橋ケーブルの最適プレストレス量決定に関する研究、土木学会論文集、第356号/I-3、pp.415-423、1985
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 大塚久哲、吉田武、太田俊昭、今井富士夫：主桁支持方式の異なる長大斜張橋の力学特性比較、構造工学論文集、Vol.31A、1985.3