

# 設計者の満足度を考慮した ファジィケーブル張力調整法

金吉正勝<sup>1</sup>・古田 均<sup>2</sup>・田中 洋<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 日立造船株式会社 橋梁設計部 (〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-7-89)

<sup>2</sup>正会員 工博 関西大学 総合情報学部 (〒569-1095 高槻市霊仙寺町2-2-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 日立造船株式会社 橋梁設計部 (〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-7-89)

斜張橋やニールセン橋などケーブルを構造要素とする橋梁において、ケーブル張力調整は、設計時における最適な部材力の決定および架設管理における残留誤差の補正方法として重要である。著者らはファジィ線形回帰分析を用いた解法を開発し、いくつかの実橋に適用してきた。本研究では、満足度の概念を適用することにより、より実用的な方法の開発を試みている。すなわち、満足度により、設計者の意図を容易に導入することができるので、ケーブルのプレストレス量および架設段階で必要になるシム量がより実的な形で決定することができる。

**Key Words :** *cable pre-stress, cable-stayed bridge, fuzzy mathematical programming, shim adjustment, satisfaction degree*

## 1. はじめに

斜張橋やニールセン橋などケーブルを構造要素とする橋梁において、ケーブル張力調整は、設計および架設精度管理を行う上で重要である。

ところで、ケーブル張力調整は次のふたつに分類できる。第一は、設計段階で行うケーブルのプレストレス量の決定であり、第二は、架設段階で必要になるシム量の決定である。

前者は、斜張橋など構造的に高次の不静定構造物を対象に、そのケーブルに適切なプレストレス力を導入することによって、主桁の断面力を小さくして、経済設計を行うための作業である。後者は、設計・製作・架設誤差など様々な誤差のために、ケーブル張力および主桁・塔のキャンパーに生じた誤差を、シムプレートの板厚(シム量)を適切に決定することにより、それらの誤差を消去する作業である。

最適なプレストレス力を求める手法については、現在までに種々の方法が開発され現実に使用されている<sup>1)~4)</sup>。

このうち、設計者に広く採用されている考え方は、山田・古川らが提案する「ひずみエネルギー最小基準」に基づき「完成系における主桁の断面力分布を均一にし、その絶対値を極力小さくすること」を目標としている<sup>1)</sup>。しかしながら、この方法では、あらかじめ決めておいた主桁断面と無関係に断面力が決定されることから、断面を再度設定し直す必要がある。

最適なシム量決定についても過去に多くの研究がなされてきたが、非線形計画法を応用するもの、あるいは多目的計画法を適用するものが主である<sup>5)・6)</sup>。非線形計画法を用いる方法では、重みの設定に経験が必要であり、多目的計画法を用いる方法では、個々の目的関数すべてに満足水準を決定しなければならないという問題点があった。

そこで筆者らは、より簡便で実的な方法を目指し、ファジィ線形回帰分析を適用して、ケーブルのプレストレス力の決定法(ファジィプレストレス力決定法)を開発した<sup>7)</sup>。本方法を適用すれば、設計者が、主桁や塔ならびにケーブル張力などの断面力として実現してほしい設計値(設計目

標値)の上下限値を入力すれば、ファジィ線形回帰分析により、最適なプレストレス力が自動的に決定される。

最適なシム量の決定についても、プレストレス決定と同様に設計値としての希望値を実現できる方法(ファジィシム調整法)を開発した<sup>7)</sup>。筆者らの方法によれば、設計者の意図するケーブル張力およびキャンパー値などを希望調整値として制約条件に含めることにより、重み決定のプロセスを行うことなくシム量を計算することができる。

本研究は、ファジィ理論を適用したこれらの理論を発展させたものであり、満足度の概念を適用して、設計者の意図を、さらに満たす解を得ることを目的としている<sup>8)</sup>。満足度の概念を導入することにより、以下の改良が可能となった。

まず、非対称のメンバシップ関数を用いて満足度を定義することにより、設計者の意図を容易にさらにきめ細かく反映させることが可能となった。

また、ファジィ線形回帰分析では、後述するように設計者の判断に基づいて各項目に対するメンバシップ関数を決定しているが、最終結果から各項目でどの程度設計者の判断・意図が達成されたかを判断することは困難である。これに対し、本方法では各項目に対して満足度が得られるので、具体的にその達成度が明確に把握できる。斜張橋の場合などでは桁の曲げモーメントの絶対値を極力小さくして経済設計を行うが(これも設計者の意図と考えることができる)、これらの付加条件も組み込むことが可能である。

紙面の都合上、主としてプレストレス量の決定法の定式化と計算例を示し、シム量の決定法については、定式化のみとし、数値計算例は割愛する。

## 2. ファジィ満足度の考え方

設計者の経験を生かし、図-1のようにある項目Fの制約条件の上、下限値(F<sub>u</sub>, F<sub>l</sub>)の他に希望中心値(F<sub>c</sub>)を与え、非対称なメンバシップ関数を定義し、設計者の満足度μを定義する。満足度の値は、制約条件が希望中心値に合った場合は1.0、上、下限値の場合は0.0、その中間の場合は0.0~1.0の間の数となる。図-1の例で示すと、ある部材のプレストレス量(以下P S量と略す)として80tfと決定された場合は、満足度は0.75となる。以下、P S量を決定する場合の定式化を示す。

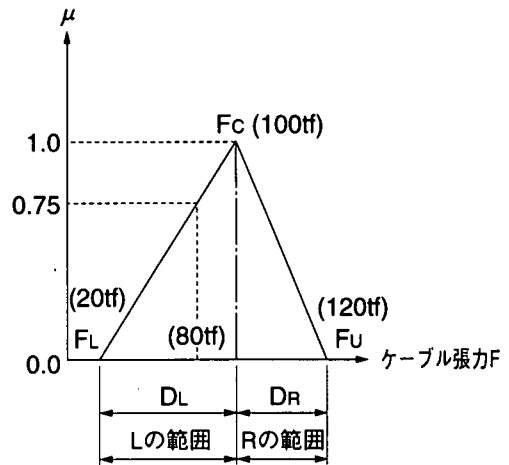


図-1 満足度の非対称メンバシップ関数

## 3. 最適プレストレス量決定問題の定式化

### (1) 解法 I

死荷重の断面力をF<sub>d</sub>、P S導入による断面力をF<sub>ps</sub>、P S導入後の断面力をF<sub>o</sub>、未知数であるプレストレス量をX<sub>i</sub>、ケーブル本数をNとする。

$$F_o = F_d + F_{ps} = F_d + \sum_{i=1}^N X_i \cdot K_i \quad (1)$$

$$F_L \leq F_o \leq F_U \quad (2)$$

ここに、図-1を参照して、

F<sub>c</sub>: 希望断面力の中心値

F<sub>u</sub>: 希望断面力の上限值

F<sub>l</sub>: 希望断面力の下限值

K<sub>i</sub>: 単位P Sによる影響値

部材断面力(j)に着目して上式の(1)、(2)を変形すれば次式となる。

$$F_{Lj} - F_{dj} \leq \sum_{i=1}^N X_i \cdot K_{ji} \leq F_{Uj} - F_{dj} \quad (3)$$

ただし、j=1, 2, …, M (M: ケーブル張力や桁の曲げモーメント等の断面力の照査項目)とする。

ここで、F<sub>cj</sub>' = F<sub>cj</sub> - F<sub>dj</sub>とすれば、満足度μは、以下のように表せる。

### Lの範囲

$$\mu_{jL} = \begin{cases} 0.0 & (F_{Lj} \text{ 以下の区間}) \\ 1.0 - (F_{cj}' - \sum_{i=1}^N X_i \cdot K_{ji}) / D_{Lj} & (F_{Lj} \sim F_{cj}' \text{ 以下の区間}) \end{cases} \quad (4)$$

## Rの範囲

$$\mu_{1,R} = \begin{cases} 1.0 - (F_{c,j} - \sum_{i=1}^N X_i \cdot K_{i,j}) / D_{R,j} & (F_{c,j} \sim F_{u,j} \text{の区間}) \\ 0.0 & (F_{u,j} \text{以上の区間}) \end{cases} \quad (5)$$

ここに、

$D_L$  :  $F_c - F_L$  で表される幅 (Lの範囲と呼ぶ)

$D_R$  :  $F_u - F_c$  で表される幅 (Rの範囲と呼ぶ)

ここで、最適なプレストレス量を求めるには、何らかの最適基準を設定する必要がある。最適基準として「各々の照査項目に対する満足度の最小値を最大にする」の基準を用いてプレストレス量を求める。本論文の目的は、設計者の満足度を最大にすることである。ところがすべての項目の満足度を同時に最大化することは不可能であるので、ここではMin-Max原理の考え方を用いて最小の満足度を最大化する。

目的関数：

$$\mu_D(X) = \max \{ \min(\mu_1(X), \dots, \mu_M(X)) \} \quad (6)$$

ダミー変数  $\mu'$  を導入すれば、目的関数式(6)は、下記のように変換される。

$$\mu' \longrightarrow \max \quad (7)$$

$$\mu' \leq \mu_j(X) \quad (8)$$

以上のように定式化を行えば、式(3)~(5)、(8)は、単位PS量に対する一次不等式となり、目的関数として、式(7)の  $\mu'$  を採れば、線形計画法を用いることができ容易に最適PS量が得られる。

## (2) 解法II

実用的な設計において、例えば、斜張橋の場合は、桁の曲げモーメントの絶対値を極力小さくして経済設計を試みる事が多い。したがって、ここでは、照査項目を以下のようにして、解法Iの改良を行う<sup>9)</sup>。

式(1)~(5)までは、上記の解法Iと共通とし、照査項目に対する満足度の最小値を  $\mu^*$  (入力値) とすると、式(4)および式(5)は次の条件式となる。

$$\mu^* \leq \mu_j(X) \quad (9)$$

桁の曲げモーメントの絶対値を極力小さくする条件は、非負のダミー変数  $F^+$ 、 $F^-$  を導入すれば、式(1)および式(3)を考慮して次式となる。

$$F_{d,k} + \sum_{i=1}^N X_i \cdot K_{k,i} + F_k^+ - F_k^- = 0 \quad (10)$$

$k=1, 2, \dots, N1$  ( $N1$ : 桁曲げモーメント照査格点数)

目的関数は、部材長を  $B_k$  とすると次式となる。

$$f(M^*) = \sum_{i=1}^{N1} (F_k^+ + F_k^-) \times B_k \rightarrow \min \quad (11)$$

以上の定式化も、線形計画問題に帰着され容易に解を得ることができる。

## 4. 最適シム量決定問題の定式化

3.では、プレストレス量の決定法について示したが、斜張橋等の吊構造物の架設途中において必要になるシム量の決定法も、全く同様な方法で定式化できる。本方法をシム調整に応用する場合の解法を以下に示す。

架設時に計測値として得られるケーブル張力および変位の誤差量を  $F_e$ 、未知数であるシム量  $X_i$  による変化値を  $F_s$ 、また、シム量による調整後のケーブル張力および変位の誤差を  $F_o$  とすれば、次式が得られる。

$$F_o = F_e + F_s = F_e + \sum_{i=1}^N X_i \cdot S_i \quad (12)$$

$$F_L \leq F_o \leq F_U \quad (13)$$

ここで、図-1を参照して、

$F_c$  : 希望調整値の中心値

$F_u$  : 希望調整値の上限値

$F_L$  : 希望調整値の下限値

$S_i$  : 単位シム量による影響値

照査項 (ケーブル張力および変位の誤差)  $j$  に着目して上式の(12)、(13)を変形すれば、次式となる。

$$F_{L,j} - F_{e,j} \leq \sum_{i=1}^N X_i \cdot S_{i,j} \leq F_{U,j} - F_{e,j} \quad (14)$$

ただし、 $N$ はケーブル本数。また、 $j=1, 2, \dots, M$  ( $M$ : ケーブル張力または変位の照査項数) とする。また、 $F_{c,j} = F_{c,j} - F_{e,j}$  とすれば、満足度  $\mu$  は、以下のように表せる。

## Lの範囲

$$\mu_{1,L} = \begin{cases} 0.0 & (F_{L,j} \text{以下の区間}) \\ 1.0 - (F_{c,j} - \sum_{i=1}^N X_i \cdot S_{i,j}) / D_{L,j} & (F_{L,j} \sim F_{c,j} \text{以下の区間}) \end{cases} \quad (15)$$

表-1 断面諸量および死荷重強度

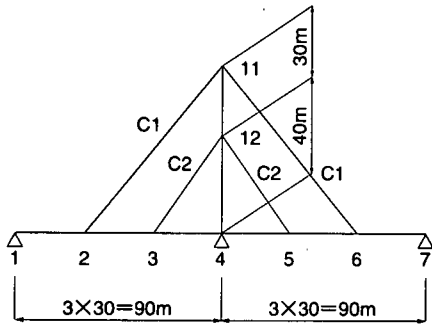


図-2 斜張橋のモデル図

Rの範囲

$$\mu_{jL} = \begin{cases} 1.0 - (F_{c,j} - \sum_{i=1}^N X_i \cdot S_{j,i}) / D_{Rj} & (F_{c,j} \sim F_{u,j} \text{の区間}) \\ 0.0 & (F_{u,j} \text{以上の区間}) \end{cases} \quad (16)$$

ここに、

$D_L$  :  $F_c - F_L$  で表される幅 (Lの範囲と呼ぶ)

$D_R$  :  $F_u - F_c$  で表される幅 (Rの範囲と呼ぶ)

最適基準として、式(6)と同様にMin-Max原理を用いて、各々の照査項目に対する満足度の最小値を最大にする。

目的関数：

$$\mu_o(X) = \max \{ \min ( \mu_1(X) \cdots \mu_m(X) ) \} \quad (17)$$

以上のように定式化を行えば、最適P S量と同様に線形計画法を利用して容易に解くことができ、最適シム量が得られる。

5. 数値計算例とその考察

(1) 解析モデル 1

簡単な斜張橋のモデルを用いて、各解法による数値例を示し、解法の特長およびその解に対する考察を行う。図-2にモデルの主要寸法と格点番号およびケーブルの部材番号を示す。断面諸量および死荷重強度は表-1のように仮定した。ベンチマークテストが容易に行えるように、桁と塔の断面は単一とし、ケーブルは2種類とした。

(a)断面諸量

		A (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	E (tf/m <sup>2</sup> )
桁		0.25	0.20	2.1×10 <sup>7</sup>
塔		0.20	0.15	2.1×10 <sup>7</sup>
ケーブル	C1	0.008	-	2.0×10 <sup>7</sup>
	C2	0.005	-	2.0×10 <sup>7</sup>

(b)死荷重強度

		W (tf/m)
主桁		7.0

表-2 設計目標値 (D + P S時)

		設計目標値			死荷重 断面力	
		下限値	中心値	上限値		
ケーブル 張力 (tf)	C1	217.4	297.4	317.4	197.4	
	C2	155.1	235.1	255.1	175.1	
主桁 曲げ モーメント (tf・m)	格点 番号	2,6	-500.0	0.0	500.0	1246.0
		3,5	-500.0	0.0	500.0	688.6
		4	-500.0	0.0	500.0	-1967.4

表-2に入力となる設計目標値を死荷重時の断面力と併記して示した。設計目標値の決定は以下の考え方によった。桁の曲げモーメントは、絶対値が小さいことが望ましいので、中心値をゼロに近くするため、下限値と上限値の絶対値を同じとし、±500tf・m以内に制限した。ケーブル張力については、C1では100tf、C2では60tfの死荷重からの増加値(各々297.4tf、235.1tf)を設計希望値の中心値として設定し、下限値はC1、C2ともに80tf低く、上限値は各々20tf高く設定した。上限値の幅が下限値の幅よりも小さいのは、一般的に斜張橋の活荷重ケーブル張力は、プラス側の値が大きくマイナス側が小さいため、ケーブル断面を変更しないための配慮である。各解法の計算結果を表-3に、また、図-3に桁の曲げモーメント図の比較を示した。なお、解法IIでは、モーメントを最小にする条件を付加するため、 $\mu^*$ を入力する必要がある。解法Iの満足度 $\mu=0.72$ が得られたので、解法IIでは、図-3のように0.7、0.5、0.3、0.2、0.1と変

表-3 解法 I および解法 II の計算結果(D+PS時)

	満足度 $\mu$ ( $\mu^*$ )	ケーブルC1 張力 (tf)	ケーブルC2 張力 (tf)	格点4 曲げ モーメント (tf・m)	目的関数 式(11) ( $\times 10^4$ ) tf・m・m
解法 I	0.72	295.0	240.7	-104.7	1.99
		(0.97)	(0.72)	(0.79)	
解法 II	0.70*	290.0	241.1	-150.0	1.79
		(0.91)	(0.70)	(0.70)	
解法 II	0.50*	281.8	245.1	-179.0	1.25
		(0.81)	(0.50)	(0.64)	
解法 II	0.30*	280.6	249.1	-137.8	0.96
		(0.79)	(0.30)	(0.72)	
解法 II	0.20*	280.0	251.1	-117.3	0.82
		(0.78)	(0.20)	(0.77)	
解法 II	0.10*	279.4	253.1	-96.7	0.68
		(0.78)	(0.10)	(0.81)	

注記) ( )内は各項目の満足度, \*は入力値であることを示す。

化させ比較した。解法 I では、ケーブル張力が目標値に近く、モーメントの絶対値が等しい解が得られている(表-3, 図-3)。しかし、解法 II では、満足度が小さくなるにつれて桁のモーメントの面積の絶対値が小さくなっている。(c)~(f)の結果では、格点2と6でモーメントは0となっている。ただし、ケーブルC1とC2の値は設計希望値の中心値から離れていく。すなわち解法 II では満足度 $\mu^*$ の設定を変化させることにより、桁の曲げモーメントをコントロールすることができ、解法 I より実用的である。しかし、解法 II では、満足度の設定( $\mu^*$ を設定)が必要なので、まず解法 I により満足度を求め、その値を参考にして満足度を変化させて桁の曲げモーメントの改善を行えば、設計におけるプレストレス量の決定作業の効率化を図ることが可能となる。次に、実設計の対象となる斜張橋のモデルで検討する。

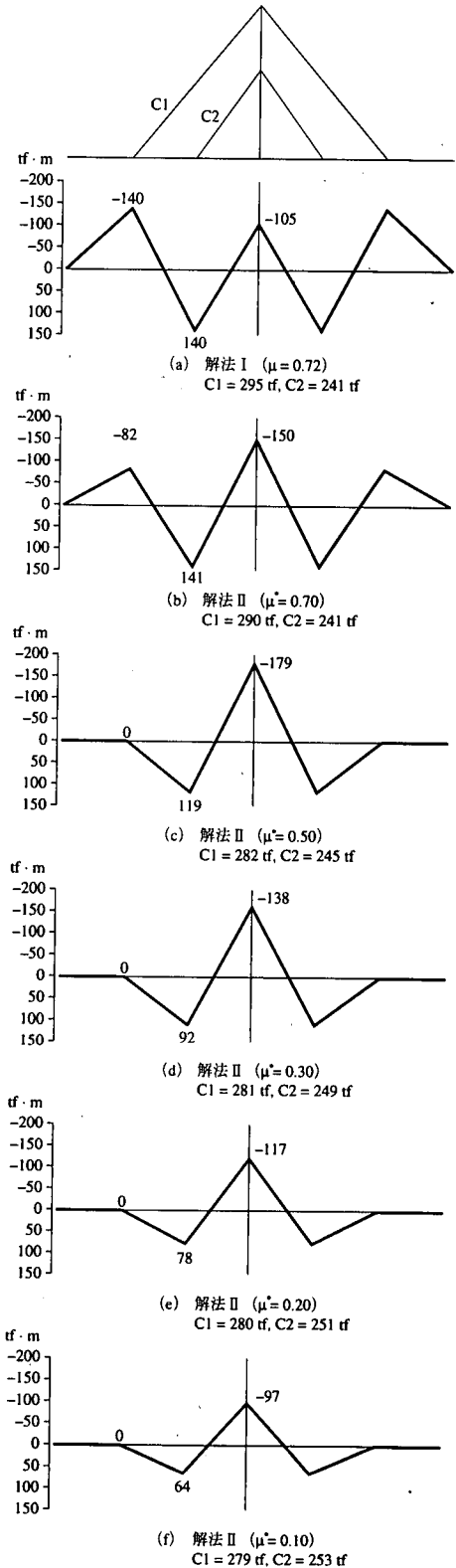


図-3 主桁の曲げモーメント比較図

表-5 ケーブル張力(tf)及び満足度の計算結果

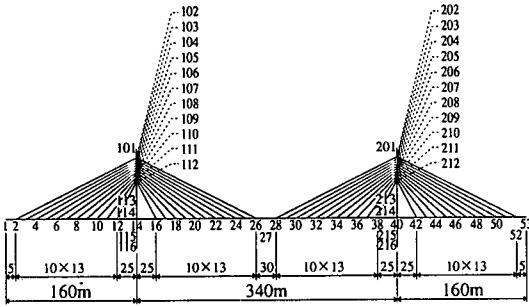


図-4 斜張橋モデルの寸法と格点番号

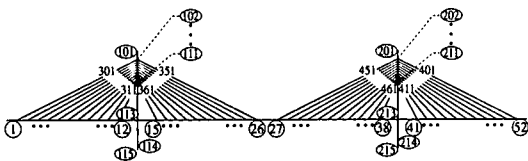


図-5 斜張橋モデルの部材番号

表-4 断面諸量および死荷重強度

(a)断面諸量

	A (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	E (tf/m <sup>2</sup> )
桁	0.55~0.65	0.60~0.70	2.1×10 <sup>7</sup>
塔	1.00~1.20	0.95~1.40	2.1×10 <sup>7</sup>
ケーブル	0.0105~0.0054	-	2.0×10 <sup>7</sup>

(b)死荷重強度

		W (tf/m)
桁、舗装他		7.0
塔		12.0
ケーブル (定着部を含む)	桁側	0.35
	塔側	3.50

(2) 解析モデル 2

解析モデルの寸法と格点番号を図-4に、部材番号を図-5に示す。断面諸量および死荷重強度は、過去の実施例を参考に表-4のように設定した。

プレストレスを導入する前の、すなわち、死荷重状態における桁の曲げモーメント分布を図-6に、ケーブル張力を表-5に表した。解法Iおよび解法IIによって得られたプレストレス導入後の桁の曲げモーメント分布も図-6に、また、対応する

ケーブル 番号	死荷重 (D)(a)	死荷重+プレストレス					
		解法I (b)	解法II (c)	解法II (d)	解法II (e)	解法II (f)	
満足度μ	-	0.45	0.40	0.30	0.20	0.10	
側 径 間	301	270.3	287.5	280.9	312.0	317.0	322.0
	302	264.3	250.9	244.0	273.3	316.7	337.3
	303	241.6	272.9	266.0	251.0	236.0	221.0
	304	237.5	298.9	292.0	277.0	262.0	247.0
	305	184.2	206.9	200.0	185.0	170.0	155.0
	306	181.9	205.9	199.0	184.0	169.0	181.4
	307	178.6	193.9	187.0	172.0	168.9	175.4
	308	173.5	185.9	179.0	164.0	160.3	160.3
	309	125.2	110.9	104.0	104.9	144.4	144.4
	310	108.0	114.9	108.0	129.8	121.1	121.1
	311	71.9	130.2	154.6	132.6	149.3	130.2
中 央 径 間	351	231.2	287.5	280.9	312.0	317.0	322.0
	352	255.5	250.9	244.0	273.3	316.7	337.3
	353	252.3	272.9	266.0	251.0	236.0	221.0
	354	259.0	298.9	292.0	277.0	262.0	247.0
	355	204.4	206.9	200.0	185.0	170.0	155.0
	356	201.4	205.9	199.0	184.0	169.0	181.4
	357	194.9	193.9	187.0	172.0	168.9	175.4
	358	185.3	185.9	179.0	164.0	160.3	160.3
	359	130.8	110.9	104.0	104.9	144.4	144.4
	360	110.8	114.9	108.0	129.8	121.1	121.1
361	73.2	130.2	154.6	132.6	149.3	130.2	
目的関数 (×10 <sup>4</sup> tf・m・m)	-	1.745	1.010	0.601	0.438	0.387	

ケーブル張力を表-5に示している。解法Iと解法IIに用いた設計目標値を表-6に示す。ケーブルの制約条件は、側径間だけに与えればよく、すなわち、中央径間側のケーブル張力は、D+PS時に側径間側ケーブルと中央径間側ケーブルの水平力が等しい条件から求められる。そこで、設計目標値の中心値を死荷重+プレストレス+活荷重(L)を考慮して与えた。

具体的には、最大値(D+PS+L max)がケーブルの許容張力(N<sub>a</sub>)を越えないこと。ケーブル張力の最小値(D+PS+L min)が、死荷重張力の半分程度が残るように配慮して表-6の設計目標値を決定した。すなわち、表-6のF<sub>u</sub>(=N<sub>a</sub>-L), F<sub>c</sub>(=F<sub>u</sub>-50tf), F<sub>L</sub>(=F<sub>c</sub>-150tf)とした。

桁の曲げモーメントは、中心値をゼロとし、桁の断面より上下限値を±3000tf・mとした。表-5より、満足度μが小さくなるほど目的関数が小さくなり、桁の曲げモーメントが小さくなることわかる(図-6)。設計者は、断面力を見ながら最適なプレストレス量を選択することになる。ここでわかるように、満足度の指標に用いているμの値は目途を示すにすぎず、例えば、μ=0.4がμ=0.1の4倍の満足度を表してはいない。

表-6 設計目標値

(a)ケーブル張力 (tf)

ケーブル番号	下限値 $F_L$	中心値 $F_c$	上限値 $F_U$	
側	301	127.0	277.0	327.0
	302	184.0	334.0	384.0
	303	206.0	356.0	406.0
	304	232.0	382.0	432.0
	305	140.0	290.0	340.0
	306	139.0	289.0	339.0
間	307	127.0	277.0	327.0
	308	119.0	269.0	319.0
	309	44.0	194.0	244.0
	310	48.0	198.0	248.0
	311	61.0	216.0	261.0

(b)桁曲げモーメント (tf/m)

格点番号	下限値 $F_L$	中心値 $F_c$	上限値 $F_U$	
側	2	-3000.0	0.0	3000.0
	5	-3000.0	0.0	3000.0
	8	-3000.0	0.0	3000.0
	11	-3000.0	0.0	3000.0
中央	14	-3000.0	0.0	3000.0
	17	-3000.0	0.0	3000.0
	20	-3000.0	0.0	3000.0
	23	-3000.0	0.0	3000.0
	26	-3000.0	0.0	3000.0
	27	-3000.0	0.0	3000.0

従って、実際の設計にあたっては図-6を参照して  $\mu^*=0.1$ の解を選んでよい。このように、解法IIは設計者に選択メニューを提供して最適なプレストレス量を定める便利な方法である。

## 6. 実橋への適用例

設計者の満足度を考慮したファジィケーブル調整法の有効性を示すために、実際に架設された斜張橋に本法を適用して、実施設計との比較を行った。対象とした橋梁は、大阪市内に架設されたマルチケーブルタイプのK斜張橋で、昭和52年に完成している。断面諸元や断面諸量を表-7に示す。なお、ケーブルの最大張力は、当時のケーブル製作能力の関係からPWS271( $\phi 5$ )が最大規格となっていたため、2本当たり539tfが最大となる制約がある。比較の方法は、文献1)による方法とほぼ同様である。

さて、本法では、設計目標値を適宜定めることができるので、ケーブルについては、当時のケーブル断面から求められる最大張力を設計目標値として計算した。また、過去の設計経験に基づき、さらに妥当と思われる設計目標値を定めて、最適なプレストレスを求めてみた。比較対象となるひ

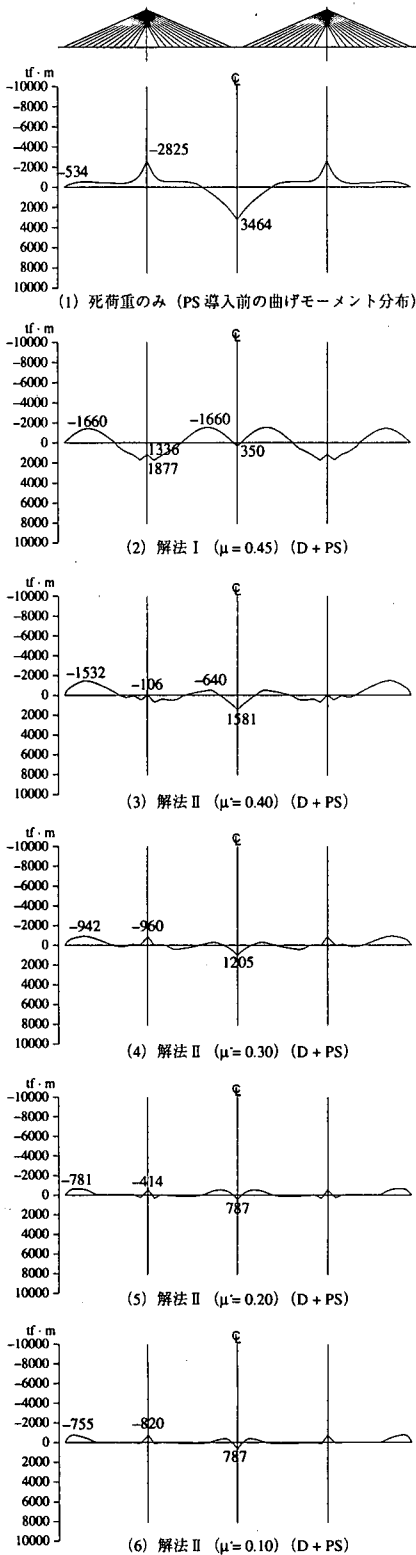


図-6 プレストレス導入前及び導入後の各解法による桁の曲げモーメント分布

表-7 断面諸元と断面諸量

橋長	440m(100m+240m+100m)
幅員	20.5m(車道7.25×2=14.5m, 歩道2.5m)
桁高	3.1m
ケーブル	2×PWS271(φ5) 上から 2×PWS184(φ5) 4段 2×PWS114(φ5) 2段
主桁 A, I	A = 0.54~0.62m <sup>2</sup> I = 0.87~1.13m <sup>4</sup>
塔 A, I	A = 0.47~0.54m <sup>2</sup> I = 0.45~0.53m <sup>4</sup>
前死荷重	7.371 tf/m
後死荷重	6.244 tf/m

ずみエネルギー法では、本法との比較のため、ケーブルの最大張力の条件は考慮せずに、最適なプレストレス量を求めている。表-8において、原設計とはK斜張橋の実設計値を意味しており、本法（解法Ⅰ・解法Ⅱ）ならびにひずみエネルギー法によって求められた、それぞれのケーブル張力（死荷重+プレストレス力）を示している。ここで、本法で得られたケーブル張力のうち、ケース1は設計最大張力を設計目標値にしており、ケース2は、その条件を除いたものである。

表-8からわかるように、ケース1の解法Ⅰおよび解法Ⅱのケーブル張力は、ほぼ原設計と一致している。ケーブルの選択を自由にしたケース2の解法Ⅰおよび解法Ⅱの解は、ひずみエネルギー法に近い。しかし、図-7の桁の曲げモーメント分布を見れば、原設計と比較できる解法Ⅰと解法Ⅱでは、桁の曲げモーメントの絶対値を小さくする条件の付加された解法Ⅱの方が、わずかであるが設計上優れていると考えられる。また、ひずみエネルギー法との比較において、ケース2の解法Ⅰの方が支点部では曲げモーメント値が小さいものの、支間部では解法Ⅱより大きい値となっている。全体的な経済設計の観点からは解法Ⅱがやはり優れていると判断できる。

参考までに、著者らの提案したファジィプレストレス力決定法の解を(g)に示したが、支点部で曲げモーメントがほぼゼロの箇所があり、バランス的に本法の方が改善されている。以上の計算結果より本法の有効性が証明された。

表-8 ケーブル張力（左径間側）

単位 (tf)

ケーブル 番号	原設計	ケース1		ケース2		ひずみ エネルギー 法	
		解法Ⅰ	解法Ⅱ ( $\mu = 0.01$ )	解法Ⅰ	解法Ⅱ ( $\mu = 0.07$ )		
側 径 間	1	331.0	339.7	343.4	1460.1	1302.3	1598.0
	2	356.2	360.7	364.3	103.7	103.7	103.9
	3	382.2	382.8	386.4	103.9	286.8	104.1
	4	406.1	402.4	406.1	104.1	104.1	104.3
	5	285.7	286.5	290.2	104.4	104.4	104.5
	6	290.6	290.2	293.8	104.6	104.6	104.7
	7	289.7	290.1	293.8	105.0	105.0	105.0
	8	287.2	288.2	291.8	105.3	105.3	105.4
	9	175.0	171.7	175.4	52.9	647.5	52.9
	10	168.6	168.9	172.5	921.5	219.4	697.6
中 央 径 間	11	319.3	327.8	331.3	1408.9	1256.7	1541.0
	12	343.1	347.5	351.0	100.0	100.0	100.0
	13	367.4	368.2	371.7	99.9	275.9	100.0
	14	389.7	386.3	389.8	100.0	100.0	100.0
	15	273.5	274.4	277.9	100.0	100.0	100.0
	16	277.6	277.2	280.7	100.0	100.0	100.0
	17	276.0	276.3	279.8	100.0	100.0	100.0
	18	272.7	273.5	276.9	100.0	100.0	100.0
	19	165.5	162.2	165.7	50.0	611.6	50.0
	20	158.7	158.6	162.1	865.6	206.1	656.0

注記) ケース1 : 設計最大張力を制約条件  
 ケース2 : 設計最大張力の条件なし  
 (山田・古川らによるひずみエネルギー法との比較用)

## 7. 結 論

斜張橋などのケーブルを構造要素に有する構造物において、ケーブル張力調整は、設計および架設管理において重要なプロセスになっている。本稿では、満足度の概念を導入して、設計者の意図を定量化して、ケーブルのプレストレス量および架設段階で必要になるシム量の実用的な決定方法を提案した。

本研究で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) ケーブルの設計張力を決定するためのプレストレス量、および張力誤差を消去するためのシム量の決定を、満足度の概念を導入して、設計者の意図を反映した解を得ることが可能となった。
- (2) 満足度の概念を用いて目的関数を設定することにより、設計者の意図を明確な形で表現することができ、結果的に実用的な解を得ることができる。
- (3) ファジィ数理計画法を適用することにより、任意の目的関数（最適基準）を扱うことができ、例えば、桁の曲げモーメントの絶対値和の最小化というような付加条件も容易に考慮できる。



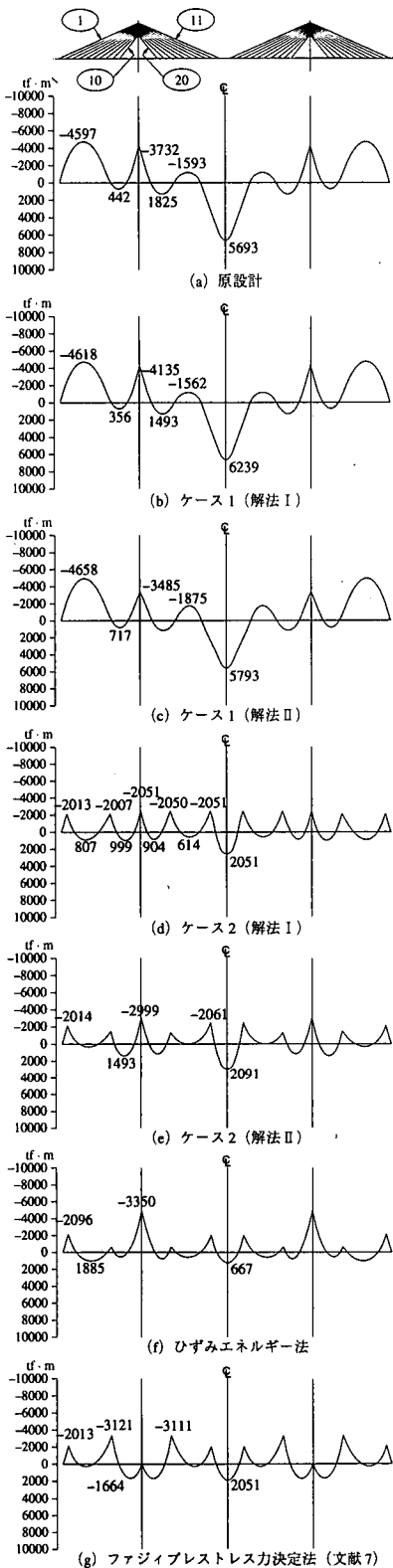


図-7 各解法による桁の曲げモーメント分布 (D + PS) の比較

(4) 解法 I に、桁の曲げモーメントの絶対値を極力小さくする制約条件を加えることによって、経済設計を満たす解を得る解法 II を提案した。解法 II は、解法 I をあらかじめ実施した後使用する必要がある、満足度は必ずしも解法 I より高くはないが、経済設計の観点からはより合理的な解を得ることができる。

本論文で扱ったケーブル調整方法は、従来の方法より設計者の意図を適確に反映することができ、実際の設計業務に使用し、経験の浅い設計者でもベテランに近い結果が得られる。最終的な判断は経験のある技術者がするにせよ、経験の浅い技術者も有用な設計案を出すことが可能となり、設計の効率化に寄与している。

#### 参考文献

- 1) 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, No.356/ I -3, pp. 415-423, 1985年4月.
- 2) 星埜正明: 斜張橋の力学的特性と設計の基本的考え方 (上), 橋梁と基礎, Vol. 17, No.4 pp. 16-23, 1983年4月.
- 3) 長井正嗣, 赤尾 宏, 佐野佑一郎, 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/ I -4, pp. 343-352, 1985年10月.
- 4) 中崎俊三, 片山哲夫, 内海 靖, 越後 滋, 齊藤道生, 谷脇一弘: 斜張橋の最適ケーブルプレストレス自動決定システム, 川田技報, Vol. 7, pp. 155-159, 1988年1月.
- 5) 藤澤伸光: 斜張橋架設時のシム量決定法, 橋梁と基礎, 第18巻, 第9/10号, 1984年4/10月.
- 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, 第374号/ I -6, pp. 495-502, 1986年10月.
- 7) 古田 均, 亀井正博, 金吉正勝, 田中 洋: ファジ理論を用いた斜張橋ケーブルの最適プレストレス力決定法, 土木学会論文集, No. 540/ VI -31, pp. 105-112, 1996年6月.

8) 金吉正勝, 田中 洋, 亀井正博, 古田 均: 設計者の満足度を考慮した新しいファジィケーブル張力調整法, 第47回土木学会年次学術講演会講演概要集, I - 418, 1992年9月.

9) 金吉正勝, 田中 洋, 亀井正博, 古田 均: 設計者の満足度を考慮したファジィケーブル張力調整法の改良, 第48回土木学会年次学術講演会講演概要集, I - 470, 1993年9月.

(1997. 10. 23 受付)

## PRACTICAL CABLE TENSION ADJUSTMENT BASED UPON THE SATISFACTION CONCEPT OF BRIDGE DESIGNERS

Masakatsu KANEYOSHI, Hitoshi FURUTA and Hiroshi TANAKA

New cable tension adjustment method has been developed by introducing the concept of satisfaction to reduce the weight of cable-stayed bridges. The degree of satisfaction is defined in such a way that when the aspire of a designer is completely achieved, the satisfaction degree is one, and when the aspire is not achieved at all, the satisfaction degree is zero. Evidently, because the satisfaction is related to engineering knowledge and judgement, the proposed method can provide us with more practical solutions. In order to treat the satisfaction in the formulation, fuzzy mathematical programming is employed, in which the satisfaction degree is related to the determination of the membership functions for the designer's allowable demand range. Practical applications of realized models and existing cable-stayed bridges show the efficiency and usefulness of the method developed here.