

(48) ファジィ S I 法による昼間ケーブル
張力調整の基礎的研究

OPTIMAL TENSION ADJUSTMENTS IN DAYTIME BASED ON
FUZZY SYSTEM IDENTIFICATION

古田 均* 亀井 正博** 金吉 正勝*** 田中 洋****
Hitoshi FURUTA, Masahiro KAMEI, Masakatsu KANEYOSHI, Hiroshi TANAKA

Cable tension adjustment is conventionally carried out in the late night to eliminate the influence of temperature. Therefore this work becomes very hard. In order to reduce the load, we attempt to develop a practical method of estimating the influence of temperature. Fuzzy System Identification method (FSI) developed by the authors is extended to estimate the influence of temperature. First the extended FSI is formulated. Secondly a numerical example of the method is shown using assumptive data. Finally the practical possibility is discussed using the field data of Sugahara-Shirokita Bridge. The results confirm that cable tension adjustment in the daytime is theoretically possible by the method.

Key Words : cable-stayed bridge, cable tension adjustment, fuzzy set theory

1. まえがき

斜張橋は、構造的に高次の不静定構造物であるので、ケーブルにプレストレスを導入することにより、主桁の曲げモーメントを小さくすることができ、最適なケーブル張力の決定によって、合理的な設計を行うことができる。このように設計時においてケーブル張力が定まったとしても、実際の架設時には主桁やケーブルの製作誤差など各種誤差が内在しているため、計算値どおりのケーブル張力およびキャンバーとはならないのが一般的である。このために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って、ケーブル張力を変えバランスのとれた構造系となるようケーブル張力の調整を行っている。

ケーブル張力を調整するためには、主桁や塔の変形およびケーブル張力などを計測しなければならないが、この作業は通常夜間に実施される。これは温度変化の影響を除外するために橋全体の温度が一定になった時点で計測を行う必要があるためである。特にマルチケーブルタイプの斜張橋の張り出し架設の場合は、上記の作業が架設期間中連続することになる。さらに、長大斜張橋になるとその作業は長期間におよぶことになり、計測作業は過酷な労働条件をしいることになる。

筆者らは、System Identification法 (SI法)、いわゆる構造同定法を用いて構造系に含まれる誤差要因を分析し、それらの結果をもとに完成系を予測し、ケーブル張力調整を行う方法を研究してきた¹⁾。そし

・ 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㈱ 橋梁設計部鉄構システム課課長 工修 日立造船㈱ 橋梁設計部橋梁課課長代理

て、SI法の持つ諸問題を解決するため、計測値をファジィデータと考え、ファジィ線形回帰分析²⁾を構造同定法に適用して、ファジィSI法を開発した³⁾⁻⁶⁾。

本論文では、このファジィSI法を応用し、ケーブル張力、主桁・塔の変形量以外に温度計測値もファジィデータと考えて構造同定を行い、温度の影響を除外する方法⁷⁾（温度同定法と呼ぶ）についてその定式化を述べ、さらに簡単なモデルによる数値計算例および実橋への適用について報告する。

2. 温度同定法の定式化

主桁・塔のキャンパー値およびケーブル張力の計測値をファジィデータと考え、 $\tilde{F}$ とする。これらの計測値の標準温度（一般には20℃）での値を $\tilde{F}_0$ 、キャンパー値およびケーブル張力の温度変化による影響値を K とし、 $\tilde{F}$ 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 $\tilde{\alpha}$ を持つ温度影響値モードの重ね合わせで表す。ここで、記号 $\sim$ はファジィ集合を表す。

$$\tilde{F} = \tilde{F}_0 + \sum_{i=1}^N \tilde{\alpha}_i \cdot K_i \tag{1}$$

ここに、 $\tilde{\alpha}_i$ は、図-1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。ここで、問題はファジィ係数 $\tilde{\alpha}_i$ と標準温度での諸量 $\tilde{F}_0$ を求めることである。適合度を計る基準パラメータ h ($0 \leq h < 1$)を導入し、標準温度での諸量 $\tilde{F}_0$ も $\tilde{\alpha}_i$ ($i=N+1, \dots, N+M$) で表現すると、ファジィ量 $\tilde{\alpha}_i$ は、以下の(2)～(5)式で表されるファジィ線形回帰分析のMAX問題²⁾を解くことにより得られる。

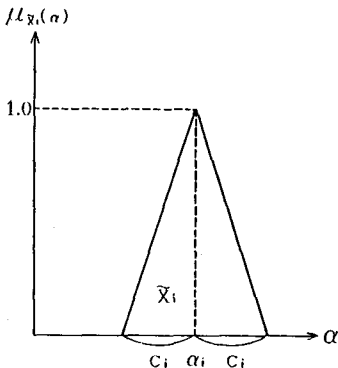


図-1 $\tilde{\alpha}_i$ のメンバーシップ関数

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

$$\text{制約条件} \quad F_j + (1-h)e_j \geq (1-h) \sum_{i=1}^N c_{ij} |k_{ji}| + \sum_{i=1}^N \alpha_i k_{ji} + (1-h) \sum_{i=N+1}^{N+M} c_{ij} |k_{ji}| + \sum_{i=N+1}^{N+M} \alpha_i k_{ji} \tag{3}$$

$$F_j - (1-h)e_j \leq -(1-h) \sum_{i=1}^N c_{ij} |k_{ji}| + \sum_{i=1}^N \alpha_i k_{ji} - (1-h) \sum_{i=N+1}^{N+M} c_{ij} |k_{ji}| + \sum_{i=N+1}^{N+M} \alpha_i k_{ji} \tag{4}$$

$$j=1, 2, \dots, N+M \quad c_i \geq 0 \tag{5}$$

- ここに、 M :計測項目数（ケーブル張力および変形量など）
- N :温度分布の区間割り個所数（ただし、主桁のように温度差がある場合は、
一様温度変化と温度差の重ね合わせとみなすため区間割り個所数は2個となる）
- F_j :計測値 $\tilde{F}$ の j 成分
- K_{ji} :区間 i の単位温度の変化による計測値 j 成分の影響値（一様温度と温度差の各々の影響値に分離する）
- c_i, α_i : $\tilde{\alpha}_i$ 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 ($0 \leq h < 1$)

(3)、(4)式の右辺の第3項および第4項は(1)式における $\tilde{F}_0$ を表しており、影響値 k_{ji} については、 $i= N+j$ の時のみ $k_{ji}= 1$ 、その他は $k_{ji}= 0$ である。

以上の解法により標準温度での計測値 P_0 の推定値が得られれば、夜間における一様温度時の結果が得られたことになり、著者らの方法³⁾⁻⁶⁾によりケーブル張力調整が可能となる。

3. 数値計算例および考察

表-1 断面性能および死荷重

3.1 解析モデルと計算例

図-2に示す斜張橋を用いて温度同定の計算を行う。モデルの主要寸法および格点番号を図-2、部材番号を図-3に示す。断面性能および死荷重は、表-1のとおりである。温度変化の状態を3種類想定し、温度分布の区間割りおよび温度計測点(◆印部材)を表-2のように仮定する。またケーブル張力の計測部材および主桁・塔の変形量の計測点は表-3のとおりとする。表-3のケースAとケースBおよびケースAとケースCのそれぞれ2ケースのケーブル張力と変形量から標準温度での値を推定した結果を表-4に示す。ケーブル張力およびキャンパーの計測誤差は各々1tf、1cmと仮定し、 $e_j=1.0$ とした。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。表-3の計測値は20℃の値に対してたとえば張力の大きいもので12tf程度の差を生じている。一方、表-4の温度同定の結果ではケーブル張力で1tf程度の差におさまっており、ケーブル張力、主桁のキャンパーおよび主塔の水平変位とも標準温度での値とはほぼ一致し、実用上問題のない範囲で推定できている。

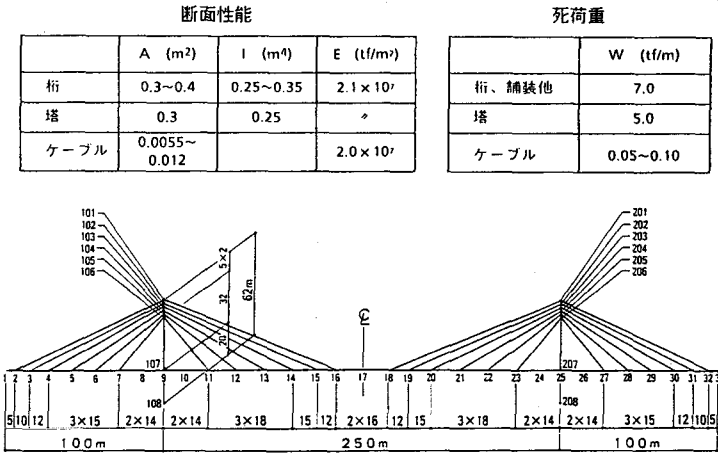


図-2 主要寸法および格点番号

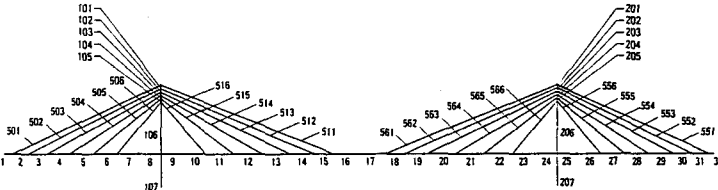


図-3 部材番号

表-2 温度変化と温度分布

温度ケース		ケースA		ケースB		ケースC	
部	材	桁上面	桁下面	桁上面	桁下面	桁上面	桁下面
主	◆ 1,2	30.0	28.0	50.0	55.0	40.0	45.0
	◆ 3,4	32.0	30.0	48.0	53.0	40.0	45.0
	◆ 5,6	34.0	32.0	46.0	51.0	40.0	45.0
	◆ 7,8	36.0	34.0	44.0	49.0	40.0	45.0
	◆ 9,10	38.0	36.0	42.0	47.0	40.0	45.0
	◆ 11,12	40.0	38.0	40.0	45.0	40.0	45.0
	◆ 13,14	42.0	40.0	38.0	43.0	40.0	45.0
	◆ 15,16	44.0	42.0	36.0	41.0	40.0	45.0
	◆ 101 ~ 107	側径間	中央径間	側径間	中央径間	側径間	中央径間
		42.0	40.0	45.0	50.0	40.0	40.0
ケ	◆ 501,511	44.0		50.0		40.0	
	◆ 502,512	42.0		48.0		40.0	
	◆ 503,513	40.0		46.0		40.0	
	◆ 504,514	38.0		44.0		40.0	
	◆ 505,515	36.0		42.0		40.0	
	◆ 506,516	34.0		40.0		40.0	

注) 温度変化は中央径間中央で対称とする
◆: 温度計測部材

表-3 ケーブル張力および変形量

温度ケース		ケースA	ケースB	ケースC
ケーブル張力 (N)	側径間			
	501	569.13	560.86	569.42
	503	214.95	215.84	215.55
	506	203.04	206.09	199.92
	中央径間			
	511	557.55	558.97	565.27
(H)	513	209.85	209.49	208.33
	516	200.55	200.39	194.43
箱カンバー (mm)	側径間			
	Pt. 2	0.0036	-0.0003	-0.0011
	Pt. 6	0.0198	0.0101	0.0030
	中央径間			
(m)	Pt.12	-0.0120	0.0054	0.0082
	Pt.17	-0.0348	0.0007	0.0274
変位水平 (mm)	Pt.101	-0.0189	-0.0393	-0.0407

表-4 標準温度20℃での推定値と計算値

		ケース1 ケースAとBでの 推定値	ケース2 ケースAとCでの 推定値	標準温度20℃での 計算値
ケーブル張力 (N)	側径間			
	501	574.919	572.941	573.000
	503	212.869	212.703	214.000
	506	192.573	193.349	193.000
	中央径間			
	511	562.303	561.793	562.000
(H)	513	207.649	207.663	209.000
	516	193.705	194.149	193.000
箱カンバー (mm)	側径間			
	Pt. 2	0.0011	0.0011	0.000
	Pt. 6	-0.0001	0.0004	0.000
	中央径間			
(m)	Pt. 12	-0.0020	-0.0017	0.000
	Pt. 17	-0.0009	0.0046	0.000
変位水平 (mm)	Pt.101	-0.0011	-0.0024	0.000

3.2 実橋での計算例

菅原城北大橋の架設時（昭和63年8月：ケーブル8段架設完了時）の計測値⁸⁾を用いて、本手法の妥当性について検討を行う。本橋の一般図および計測位置を図-4に示す。部材の温度変化および主桁の変形、ケーブル張力の変化を図-5、6に示す。

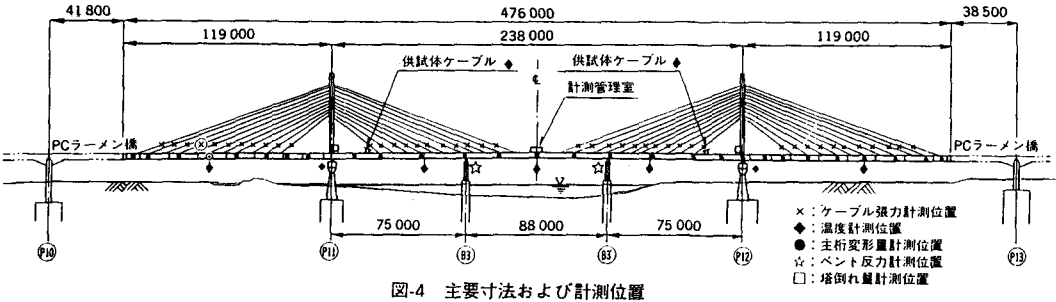


図-4 主要寸法および計測位置

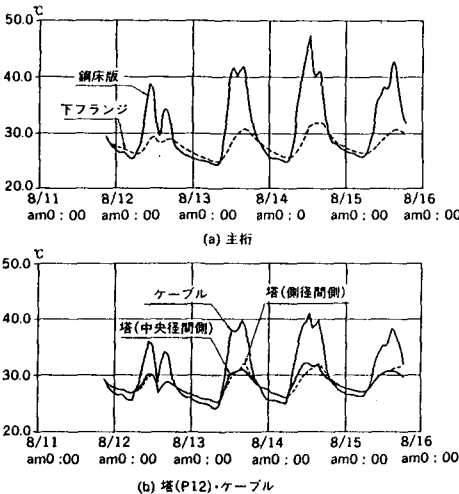


図-5 部材温度の変化

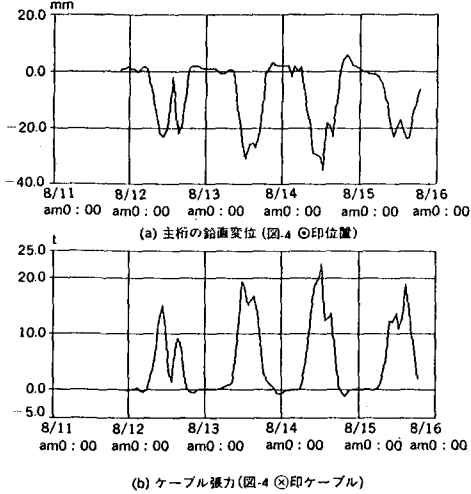


図-6 主桁の変形およびケーブル張力の変化

入力値は、表-5に示すように温度変化が最も大きい季節のデータを使用した。計測点および温度分布の区間割りは図-7に示すとおりとした。ケーブル張力、キャンパーおよび温度計測誤差は、それぞれ3.0tf、1.0cm、3.0℃と仮定し、適合度を与える基準パラメータは、 $h=0.5$ として計算を行った。8月12日と13日の計測値を用いた標準温度に換算した推定値（ケース1）と、8月12日と15日より求めた推定値（ケース2）を、温度一定時の夜間の計測データ（8月11日午後8時、温度変化の影響はほとんど無く、大気温は29℃だった）と比較した結果を表-6に示す。C4とC41のケーブル張力およびPt. 6の桁キャンパーで差が少し大きい、その他のケーブル張力および桁のキャンパー値は良好な一致が見られる。これはケーブル張力の計測点が少なく（ケーブル8段の内2段）、また温度計測点も少なかったための影響と考えられる。

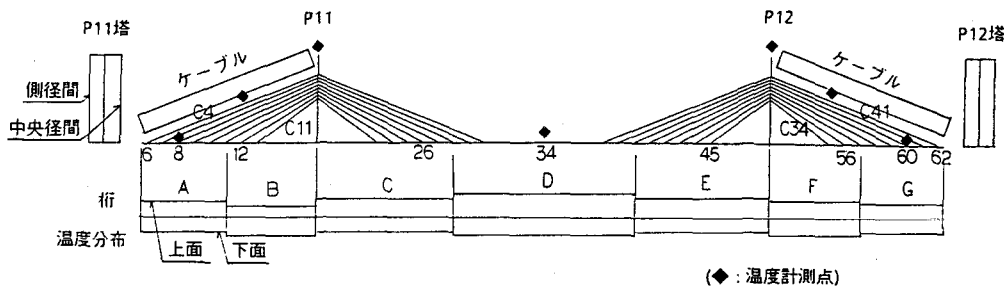


図-7 計測点および温度分布

表-5 架設時計測データの一部(菅原城北大橋)

計測データ			計 測 日 時			
			8月12日 午前10時	8月13日 午後3時	8月15日 午後2時	
温 度 (℃)	桁A点	桁上面	38.7	44.9	44.0	
		桁下面	28.4	29.8	30.3	
		桁D点	桁上面	38.9	42.0	43.0
			桁下面	28.7	30.7	30.7
		桁G点	桁上面	38.7	44.9	44.0
			桁下面	28.3	29.7	29.9
	P11塔	側径間	29.9	30.8	30.8	
		中央径間	29.1	30.6	30.7	
	P12塔	側径間	30.3	30.9	30.8	
		中央径間	29.6	31.3	31.1	
	P11ケーブル		36.2	40.0	38.2	
	P12ケーブル		36.1	39.7	38.5	
ケー ブ ル 張 力 (t)	C4		202.1	203.9	205.9	
	C11		189.8	191.1	189.6	
	C34		187.0	185.6	183.8	
	C41		229.7	231.2	232.9	
桁 キャン バー (m)	P11 側径間	Pt.6	19.682	19.670	19.674	
		Pt.8	19.726	19.722	19.725	
		Pt.12	19.814	19.807	19.810	
	中 央 径 間	Pt.26	20.008	19.998	19.998	
		Pt.34	19.781	19.770	19.777	
		Pt.45	19.450	19.451	19.449	
	P12 側径間	Pt.56	18.922	18.921	18.922	
		Pt.60	18.590	18.589	18.593	
		Pt.62	18.401	18.395	18.398	

表-6 標準温度20℃での推定値(菅原城北大橋)

計測データ		ケース1		ケース2	8月11日午後8時の計測データ (温度一定時)
		8月12日と8月13日での推定値	8月12日と8月15日での推定値		
ケーブル張力(t)	C4		183.2	182.9	187.0
	C11		202.5	200.6	199.9
	C34		195.6	194.2	198.9
	C41		209.1	213.2	214.1
桁キャンパー (m)	P11 側径間	Pt.6	19.736	19.720	19.719
		Pt.8	19.755	19.744	19.749
		Pt.12	19.819	19.813	19.815
	中 央 径 間	Pt.26	20.007	20.007	20.001
		Pt.34	19.770	19.772	19.772
		Pt.45	19.452	19.452	19.447
	P12 側径間	Pt.56	18.925	18.927	18.922
		Pt.60	18.612	18.617	18.612
		Pt.62	18.445	18.448	18.444

4. 結 論

これまで斜張橋などのケーブル張力調整時には、夜間温度一定時の計測をもとに、標準温度での値を求めてきたが、本研究では昼間の計測値からファジィ理論を用いて、標準温度での値を推定する方法を論じた。今回の数値計算例によって得られた結論は、次のようにまとめられる。

- 1) 精度を向上するためには、温度計測点の数、温度分布の区間割りのメッシュの数を多くする必要がある。
- 2) 昼間の温度変化およびケーブル張力、主桁・塔の変形は大きいので、計測は自動で行い、ある時点の値を瞬時に計測できるシステムが必要である。
- 3) 菅原城北大橋の例では架設機材の影に入る箇所などもあったので、実橋への適用では架設機材の位置と温度計測点を十分考慮する必要がある。
- 4) 今回の数値計算では2ケースの計測結果から標準温度での値を推定したが、多くのケースから推定を行った方が精度が向上するはずであり、また温度変化状態は、異なった状態とおしの値を用いるようにすべきである。

今後、温度分布データなどの計測結果を集積し、実橋への適用を試み、改良を加える予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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、PP.147-154、1989.11
- 5) 古田均、亀井正博、金吉正勝、田中 洋：斜張橋の架設管理へのSI法とファジィSI法の適用、土木学会、構造工学論文集、Vol.36A、1990.3
- 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の改良について、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、I-314、1990.9
- 7) 亀井正博、古田均、金吉正勝、田中 洋：ファジィSI法を用いた昼間ケーブル張力調整法の試み、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、I-334、1991.9
- 8) 若林保美、山田浩幸、植田利夫、村田省三、中田孝晴、湯藤尚人、小林義和：菅原城北大橋（斜張橋）の架設と精度管理、日立造船技報、第51巻1号、PP.49-59、1990.6