

I-160

ファジィSI法によるケーブル張力調整法について

大阪市建設局 正員 亀井正博 京都大学工学部 正員 古田 均
日立造船㈱ 正員 金吉正勝 日立造船㈱ 正員 田中 洋

1. まえがき

筆者らは、System Identification(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てケーブル張力調整を行う方法を研究してきた¹⁾。そして、北港連絡橋²⁾や菅原城北大橋³⁾の架設時に本法を適用し施工管理の精度向上に役立ててきた。

SI法の適用時の問題として、使用する計測値に誤差が含まれること、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く、誤差量の推定が十分な精度で行えない場合がある。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⁴⁾を構造同定法に適用した。

本報告では、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⁵⁾を使用してSI法の解と比較し、その特長を述べ、さらに架設管理への適用方法について言及する。

2. ファジィSI法

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。

$$\tilde{z} = \sum_{i=1}^N \tilde{A}_i \cdot F_i \quad (F_i: \text{誤差モードベクトル}^{5)}, \text{SI法では、}\tilde{A}_i \text{を一定値}\alpha_i \text{としていた。})$$

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 (c_i と α_i の下限値)、最小値問題 (同じく上限値) に関する線形計画問題に帰着される。ただし、図-1に示すように、 c_i と α_i の代表値を用いて三角形のメンバーシップ関数を規定し計算の簡略化を図った。^{5), 6)}

	最大値問題	最小値問題
目的関数	$\text{MAX} \rightarrow J(c_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_i \cdot f_{ji} $	$\text{MIN} \rightarrow J(c_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_i \cdot f_{ji} $
制約条件	$Z_j \geq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i f_{ji} - (1-h)e_j + \sum_{i=1}^N \alpha_i f_{ji}$ $-Z_j \geq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i f_{ji} - (1-h)e_j - \sum_{i=1}^N \alpha_i f_{ji}$ $j=1, 2, \dots, M \quad c_i \geq 0$	$Z_j \leq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i f_{ji} - (1-h)e_j + \sum_{i=1}^N \alpha_i f_{ji}$ $-Z_j \leq (1-h) \sum_{i=1}^N c_i f_{ji} - (1-h)e_j - \sum_{i=1}^N \alpha_i f_{ji}$ $j=1, 2, \dots, M \quad c_i \geq 0$

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

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

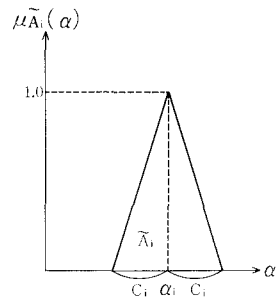


図-1 $\tilde{A}_i$ のメンバーシップ関数

3. ファジィSI法とSI法の解析結果の比較

文献5)と同一のモデルに本法を適用して結果を比較する。

図-2の斜張橋のモデルに、表-1の真値誤差（誤差系1～5）を含む誤差系を作成した。表-1の想定誤差を誤差モードベクトルとし、誤差寄与率 α_i を計算した（SI法による計算法の詳細は文献5）参照）。表-2に両者の計算比較を示した。SI法の解では、 α_i が幅を持たないクリスプな値として与えられるのに対して、ファジィSI法の解では、中心 α_i と幅 c_i が求まり α_i に幅がある。これは、計測値をファジィデータと扱い、適合度の基準パラメータ h （データが充分あれば、 h は0に近い）と、計測値の誤差 e_j を導入しているためである。本例の斜張橋の規模では、ケーブル張力の計測誤差を2ton、桁および塔のキャンバー値（格点2、3、5、6、11、12）に、2cmの計測誤差が想定されるとして、 $e_j=2.0$ とした。

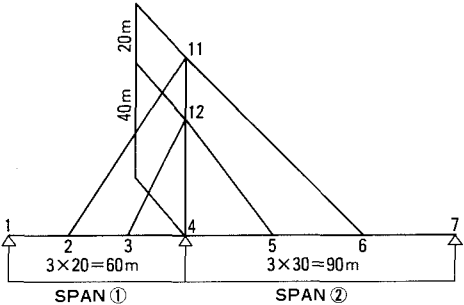


図-2 斜張橋モデル図

最大値問題（下限値）と最小値問題（上限値）で得られた中心 α_i の平均値とSI法の α_i とを比較すれば（表-2）、ほぼ同じ値が得られている。 α_i の上限値と下限値を使用し、完成系を作成すれば、その選定によって、完成系における各部材の着目量（断面力、変位など）の上限値と下限値が与えられる。施工管理には、完成系のワーストシナリオを念頭にまだ架設されていないケーブル部材の張力調整量を考慮し、シム量を決定すれば合理的である。

表-1 誤差一覧表

誤差系	想定誤差 (a)	真値誤差 (b)
1	径間①死荷重 10%減	12.5%減
2	径間②死荷重 10%減	12.5%増
3	桁の剛度 10%減	5%減
4	主塔の剛度 10%減	0%
5	ケーブルの断面積 10%減	5%減

4. むすび

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的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_j の妥当な決定方法などを検討する必要がある。

表-2 SI法とファジィSI法の比較

なお、ファジィ線形回帰分析を利用して本稿と同様の理論展開で、シム量決定の線形計画問題も開発されているが、詳しくは、別途発表する予定である。

<参考文献>

1)Tanaka,Kamei,Kaneyoshi,"Cable Tension Ajustment by System Identification",CABRIDGE,Bangkok,Nov.1987
2)Tanaka,Kamei,Kaneyoshi,"New Cable Tension Adjustment Method for Suspended-span Bridge",EASEC-2,Chang Mai,Jan.1989
3)亀井、井下、若林：菅原城北大橋における架設時の精度管理、第44回土木学会年講 1989年10月
4)寺野、浅居、菅野：ファジィシステム入門、オーム社、昭和62年
5)亀井、金古、田中：SI法を用いた吊り構造系の誤差要因分析について、第42回土木学会年講 1987年9月
6)白石、古田、尾崎：構造物の疲労解析へのファジィ理論の応用、第2回ファジィ論文集 昭和61年

誤差寄与率	SI法	ファジィSI法 (h=0.5)		
		MAX($e_j=2.0$)	MIN($e_j=2.0$)	MAX・MINの平均値
α_1	1.2363	1.2243~1.3059	1.0953~1.3444	1.2425
α_2	-1.2645	-1.2689	-1.2517	-1.2603
α_3	0.4572	0.4142	0.3381~0.7281	0.4737
α_4	-0.0133	-0.8073~1.1080	-1.1953~1.0541	0.0399
α_5	0.4899	0.3684~0.5039	0.5524	0.4943