I－198　S.I法を用いた吊り構造系の誤差要因分析について

大阪市土木局　正員　亀井正博
日立造船(株)　正員　金吉正勝
日立造船(株)　正員　田中　洋

§１．はじめに

今日、吊り構造物のケーブル部材張力については、架設管理精度の向上に多くの努力が払われている。例えば、斜張橋の張り出し工法の場合、各張り出しステップにおいてケーブル張力を計測し、設計値と計測値との間に張力誤差があれば、シム調整によって設計値に近づける。その意義は、ケーブルに設計張力が導入されていれば、キャンバー誤差が小さい限りにおいては、主塔および桁にはほぼ設計値に近い応力状態が生じていることにある。そこで、断面力を適正に管理するために、各ケーブル張力の残留誤差を小さくし、かつ構造物の形状管理として各着目点のキャンバー残留誤差をも考慮し、合理的なシム量を決定する研究がされている。[1][2]

これらの研究では想定された誤差量の下で議論しているが、ここでは、System Identification(SI;構造同定法)による誤差要因分析を用い誤差量を定量化する方法を紹介する。これと、Forward解析[3]とを用いれば、架設の次ステップおよび完成系の予測が可能で、施工管理の高精度化が期待できる。

§２．ＳＩによる誤差要因分析

架設時に計測される計測値と設計値との差を誤差量（キャンバーおよび断面力の誤差を成分とするベクトル）$\mathbf{Z}$とし、多くの誤差モードの線形的重ね合せとみなす（図－１）。

すなわち、

$$\mathbf{Z}=\sum_{i=1}^{N}\alpha i\cdot \mathrm{F}i \qquad (\mathrm{F}i：誤差モード)$$

マトリックス表示すれば　$\mathbf{Z}=\mathbf{F}\cdot\boldsymbol{\alpha}$

ここに、

$$\mathbf{F}=\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12}\cdots\cdots & f_{1M} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ f_{M1} & f_{M2} & f_{MN} \end{bmatrix},\qquad \boldsymbol{\alpha}=\begin{bmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\\ \vdots \\ \alpha_N\end{bmatrix}$$

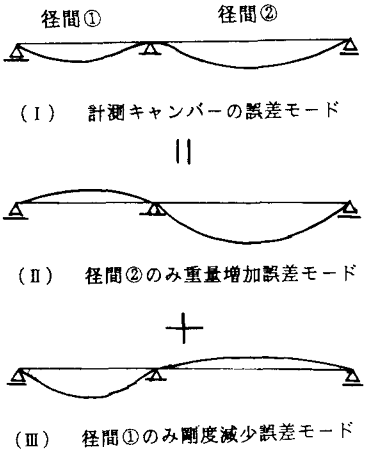
M：計測項目数（構造断面力および変位）
N：誤差要因の数
F：誤差影響マトリックス[Ｆｉを列ベクトルとするマトリックス]
$\boldsymbol{\alpha}$：誤差寄与率ベクトル

構造物の断面力および変位の計測値を$\mathbb{R}$，誤差のない正規の構造系での計算値を$\mathbb{R}o$とすると、仮りに誤差要因を完全に抽出して展開すれば次式となる。

$$\mathbb{R}=\mathbb{R}o+\mathbf{Z}\cdots\cdots\cdots ①$$

しかし、実際は式①は近似的にしか成立しないので、式①の両辺の差の自乗和を最小とする条件を求める。

$$\Phi=(\mathbb{R}o+\mathbf{Z}-\mathbb{R})^2 \;\rightarrow\; 最小化\ (\mathrm{min})$$



図－１　誤差量の誤差モードによる展開例（Ｉ＝Ⅱ＋Ⅲ）

すなわち、目的関数Φの最小化条件により式②となる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} = 0 \cdots\cdots\cdots\cdots ②$$

$\mathbb{R}_o - \mathbb{R} = \mathbb{r}$とおけば、$\Phi = (\mathbb{Z} + \mathbb{r})^2 = (\mathbb{F} \cdot \alpha)^2 + 2 \cdot \mathbb{r} \cdot (\mathbb{F} \cdot \alpha) + \mathbb{r}^2 \cdots\cdots ③$

式③を式②に代入すれば、次式から誤差要因の寄与率αが求まる。

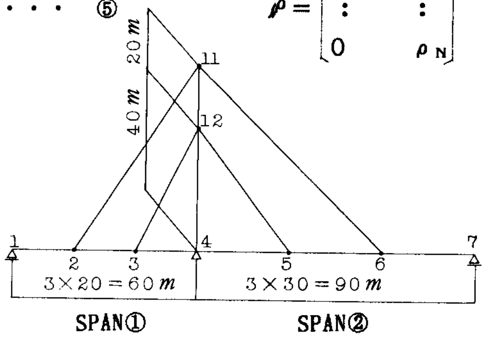
$$\alpha = -[\mathbb{F}^t \cdot \mathbb{F}]^{-1} \cdot \mathbb{F}^t \cdot \mathbb{r} \quad \cdots\cdots ④$$

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(ρ)を導入すれば、次式となる。

$$\alpha = -[\mathbb{F}^t \cdot \rho \cdot \mathbb{F}]^{-1} \cdot \mathbb{F}^t \cdot \rho \cdot \mathbb{r} \quad \cdots ⑤ \qquad \rho = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \rho_N \end{bmatrix}$$

§3．本法の適用例

簡単な斜張橋モデル(図-2)に本法を適用する。まず、誤差を(表-1)のように想定し、誤差完成系を5種類作成した。誤差を含まない完成系と誤差完成系の差も同じく5種類作成できるが、これらが§2で述べた誤差モードであり、これらを並べれば誤差モードマトリックスとなる。数値実験により表-1の真値誤差を重ね合わした系を作成し§2の誤差要因分析を適用した。誤差寄与率は、表-2の ⓑ／ⓐ の値であるが、本法による解析値は、想定した誤差寄与率とよく一致しており、本法の有効性が示されている。



図－2　斜張橋モデル図

表－1　誤差一覧表

誤差系	想定誤差 ⓐ	真値誤差 ⓑ
1	径間①死荷重１０％減	１２.５％減
2	径間②　〃　　〃	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

表－２　誤差要因分析の結果

誤差寄与率	ⓑ ／ ⓐ	本法による解析値
α_1	1.25	1.2363
α_2	−1.25	−1.2645
α_3	0.50	0.4572
α_4	0.0	−0.0133
α_5	0.50	0.4899

§4．むすび

本法を複雑な構造系の斜張橋および吊橋の実工事に適用すれば、誤差要因の推定が可能となる。誤差要因を正確につかむことができれば、Forward 解析を適用することにより次ステップの系および完成系を精度よく予測することができる。現地計測は通常数回行うので、そのつど本法を適用して誤差要因の抽出を行えば、誤差要因分析の精度が高くなる。ただし、本法は誤差量の展開を1次式で行っているので、誤差要因の適切な選択と誤差モード計算時の想定誤差が現実とあまりかけ離れないよう配慮が必要である。現在、大阪市北港に架設中の自碇式吊橋北港連絡橋に本法を採用しており、その結果については別途発表する予定である。

参考文献

1)藤澤伸光：斜張橋架設時のシム量決定方法，橋梁と基礎、１９８４年９，１０月号

2)古川、井上他：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 1986年10月

3)松川、亀井、田中：斜めハンガーを有する自碇式吊橋(北港連絡橋)の架設施工管理、土木学会 第41回年次学術講演会講演概要集(昭和61,11) Ⅰ－198