

I-161 斜張橋における施工誤差のシステム同定に関する研究

川崎重工業（株） 正会員 梅田聡
川崎重工業（株） 正会員 坂井藤一

1. まえがき

構造物の設計、製作及び架設の各工程において誤差が存在すると、架設・完成時の形状や応力状態（精度）は計画どおりの値とはならない。著者らは架設・完成時の精度を保持するためには、種々の誤差とそれらが及ぼす影響を的確に把握し、それに基づき精度改善対策を施すことが重要であると考え、このための手法として、測定データより最小2乗法を応用して未知量である誤差要因を同定する、いわゆる逆問題手法を提案している¹⁻³⁾。本研究は、この手法を実際の斜張橋架設管理に適用するとして、適切な測定項目とはいかなるものであるか、また測定誤差が存在する時に同定精度はどのような影響を受けるかなどについて、現実的な斜張橋モデルを用いて検討を行なったものである。

2. 誤差要因の同定手法

構造物を形成する各部材には誤差要因として死荷重、剛性、部材長、目違い、角折れなどの誤差が存在すると思われる。ある特定の構造物の架設状態を対象とした場合、この値は確定値であるものの、既知の値でないことが多い。我々が知り得るのは、結果として現われる変形なり、応力なりの誤差量（計測値）である。この両者の関係は、線形化して式（1）のように表わされる。次に、誤差要因 r の最適推定値 $\hat{r}$ は最小2乗法を適用し、目的関数（2）を最小とすることにより式（3）のように表わされる。

$$\tilde{y} = H r + \varepsilon \quad \text{ただし、} r \text{は誤差要因、} \tilde{y} \text{は変形・応力の誤差（測定値）} \quad (1)$$
$$H \text{は影響行列、} \varepsilon \text{は測定誤差などの残差}$$

$$\pi = \varepsilon^T W \varepsilon \quad \text{ただし、} W \text{は重み係数行列} \quad (2)$$

$$\hat{r} = G \cdot \tilde{y} \quad \text{ただし、} G = (H^T W H)^{-1} H^T W \text{は反影響行列} \quad (3)$$

なお、式（3）を用いて $\hat{r}$ を同定する過程においては、 $\tilde{y}$ の測定データ数の不足を補うために重複計測値を利用することが有効であるが、この場合にはKalman Filterを用いると計算処理上効率がよい。

3. 数値解析

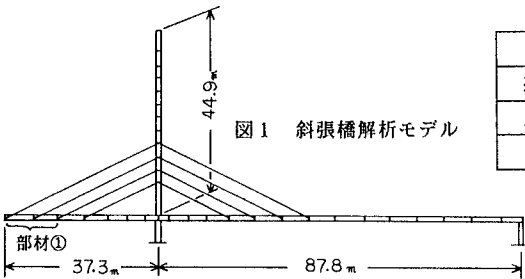


表1 設計諸元

	設計値
死荷重 W	18.0 ~ 19.5 t/m
主桁剛性 I	1.49 ~ 2.05 m ⁴
ケーブル剛性 A	0.0072 m ⁴

表2 設定した誤差要因とその同定精度

誤差要因	設定値	測定回数 1	測定回数 5	標準偏差 σ_i	標準偏差 σ_{i^*}
死荷重 部材①	5.00 (%)	5.78	5.05	0.49	0.55
角折れ 部材①右端	-0.100 (deg.)	-0.137	-0.104	0.011	0.011
部材長 部材①	-4.00 (mm)	-2.40	-3.60	1.75	1.33

本同定手法が実橋の架設精度管理に適用できるかを検討するために、現実的なモデルとして図1に示すような斜張橋が張り出し架設されている状態を設定した。主な設計諸元を表1に示す。設定した誤差要因は問題を単純にするために、張り出し部材のみに死荷重、角折れ、部材長の誤差要因が存在するとし、その大きさは精度管理基準値を参考に妥当なオーダーの値を与えた。測定項目は現状の架設時に一般に計測を実施している桁の鉛直変位、塔頂の水平変位及び全ケーブル張力を選び、残差は測定誤差のみとし、測定機器の精

度などを考慮して変位とケーブル張力の測定誤差の標準偏差を2mm, 5tとした。これらを基に乱数シミュレーションによって測定データを作成し、これから誤差要因を同定した結果を表2に示す。この結果より、誤差要因はかなり精度よく同定されており、現状の測定項目及び測定精度にて十分同定が可能であることが確認された。なお、部材長の誤差が他に比べ精度よく同定できていないのは桁の水平変位が計測されていないためであると推測される。

4. 測定項目と同定精度に関する考察

解析結果より、本手法を用いて誤差要因を同定できることは示されたが、この解析結果の信頼性などはどうであろうか。そこで、選定した測定項目及び測定誤差と同定精度の関係などについて、さらに考察してみる。式(1), (3)より次のような式が導ける。

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{G} \cdot \tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{G} (\mathbf{H}\mathbf{r} + \boldsymbol{\varepsilon}) = \mathbf{r} + \mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

したがって、 $\hat{\mathbf{r}}$ の同定精度は $\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}$ によって表わされる。今、残差は測定誤差とし、各測定誤差の間に相関関係がないとすれば、 $\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}$ の*i*成分の標準偏差 σ_i は測定誤差の標準偏差 σ_ε により次のように表わされる。

$$\sigma_i = \sqrt{\sum \mathbf{G}_{ij}^2 \cdot \sigma_{\varepsilon_j}^2} \quad (5)$$

これにより、各測定項目に測定誤差が存在するとして、右辺の各成分を比較すると、同定精度に及ぼす各測定項目重要度のランクが分かり、また、各測定誤差の下における同定精度の信頼性が評価される。

これらについて、解析例により説明する。表2には、誤差要因 $\mathbf{r}_i$ の同定精度の標準偏差 σ_i も示してある。これらの値は、3のシミュレーションの結果の信頼性を示す指標になっている。次に、 $\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}$ の各成分を誤差要因別に図2に示す。これを見ると、張り出し先端付近の変位、塔の変位、張り出し側のケーブル張力及びケーブルを介した桁の変位の影響が大きく、これらの測定項目が同定精度を支配していることを意味する。そこで、図2の中で影響の大きい7点のみを選び、さらに桁の先端の水平変位を加えたものを測定項目として標準偏差 σ_i^* を計算した結果を表2に示す。 σ_i と σ_i^* の値を比較すると、さほど差は見られない。これは、誤差要因を精度よく同定するためには、限定された測定項目で十分であるということである。言い換えると、このような測定項目を選定し、かつ精度よく測定しておくことが、誤差要因を精度よく同定するうえで重要なことである。

5. まとめ

誤差要因の同定手法を斜張橋の架設管理へ実用化するための検討を行ない、通常の測定項目と測定精度において主要な誤差要因の同定は十分可能であることが確認された。また、測定誤差の存在の下における信頼性、及び同定精度を維持するための測定項目の選定法について考察を加えた。今後、これらの結果を基に、本手法を架設管理へ実用化していきたい。

参考文献1) 赤尾、坂井、竹村、松本：“橋梁の施工精度に関する研究”川崎重工技報96号 1987.7

2) 梅田、坂井：“鋼橋における施工誤差のシステム同定”土木学会第43回年次講演会I 277

3) F. Sakai, A. Umeda: "Structural Error Identification for Control of

Construction Accuracy" ICOSAR, 1989.8

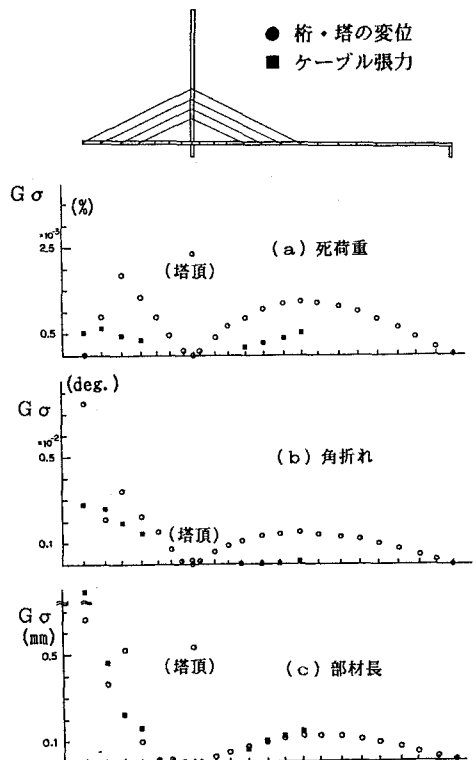


図2 同定精度 $\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\sigma}$ の成分比較