

道路標識の振動応答計測と解析モデルのパラメータ推定

東京理科大学 学生員 ○金子 丈一郎
東京理科大学 正会員 佐伯 昌之

1. 本研究の背景と目的

著者らは道路附属物を対象として、振動モニタリングによる異常検知システムの開発を進めている。ただし、振動特性が日常的に変動する問題や、より損傷に敏感な観測量の特定など、他の構造物と同様な検討すべき課題がある。本研究は、道路標識の振動特性の変動要因を解明するために、道路標識の振動特性を再現する数値モデルを構築することを試みた。

2. 道路標識の振動応答解析モデル

本研究では、北林 (2018) らが実施した道路標識の強制加振実験のデータと、それを基にして構築した有限要素モデルを使用した^{1,2)}。この実験では、学内に設置された 3.02m の単柱型道路標識に対し、2.00m に設置した精密小型加振機で道路標識を強制加振し、その応答を 2.9m 及び 1.5m に設置した加速度センサ I、II で観測した。図-1 に実験の様子と、モデルの概略を示す。観測値は 1 次モードの固有振動数 f_1 、ピーク振幅 $A_{11} \cdot A_{12}$ 、減衰比 h_1 と 2 次モードの固有振動数 f_2 、ピーク振幅 $A_{21} \cdot A_{22}$ 、減衰比 h_2 である。ただし、センサ j から得られる i 次モードの振幅を A_{ij} とする。道路標識は片持ち梁としてモデル化し、長さ 1cm の梁要素で 302 要素に等分割した。さらに、実験で使用した各機材及び標識板の設置位置に該当する要素には、その質量を付加した。さらに、水平バネと回転バネを用いたスウェイロッキングモデルを仮想的に導入し、基礎部の動きを表現できるようにした。モデルパラメータは、曲げ剛性 EI 、1 要素あたりの質量 m 、水平バネ ks 、回転バネ kr の 4 つである。JIS 規格によると、この単柱型道路標識の鋼管の外径は 60.5mm±1%、厚さは 2.3mm±0.3mm と規定されている。強制加振実験により推定されたデータ統計量を表-1 に示す。

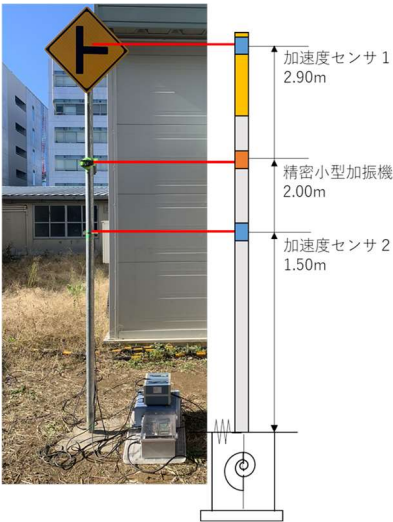


図-1 強制加振実験の様子とモデルの概略

表-1 強制加振実験で推定された平均的な観測量

	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	A_{11} [m/N]	A_{12} [m/N]	A_{21} [m/N]	A_{22} [m/N]
Ave.	4.206	30.152	1.369 × 10 ⁻²	5.417 × 10 ⁻³	3.425 × 10 ⁻⁴	4.758 × 10 ⁻⁴
Std.	0.0217	0.0573	7.352 × 10 ⁻⁴	7.367 × 10 ⁻⁶	2.943 × 10 ⁻⁴	9.514 × 10 ⁻⁶

3. 最急降下法によるモデルパラメータ推定

この 6 つの観測値 $f_1, f_2, A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ を用いて 4 つのモデルパラメータ EI, m, ks, kr を最急降下法で逆推定する。 EI と m については、プログラム内ではヤング係数 E と密度 ρ を求めることで推定する。また、目的関数は式(1)のように設定した。ただし、 Σ は観測誤差の分散共分散行列である。

$$J = \{\tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{y}(\mathbf{x})\}^T \Sigma^{-1} \{\tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{y}(\mathbf{x})\}$$
$$\mathbf{x} = [EI, \rho, ks, kr]^T \tag{1}$$
$$\tilde{\mathbf{y}} = [f_1, f_2, u_{11}, u_{12}, u_{21}, u_{22}]^T$$

まず、式(1)における観測誤差の分散共分散行列について、共分散の値は 0 と仮定した。その場合、式(1)は

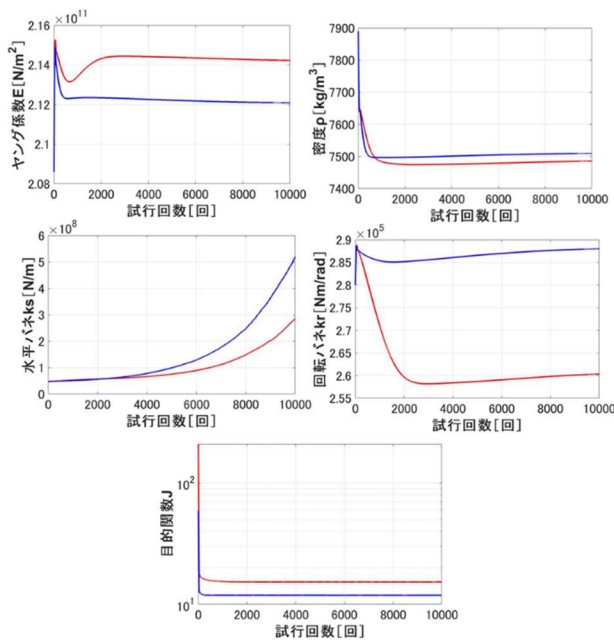


図-1 収束計算の試行回数と

モデルパラメータ・目的関数の関係

式(2)のようになる。この式から、観測データの平均値に含まれる観測ノイズが標準偏差 σ よりも小さい場合には、 $|f_1 - \bar{f}_1|/\sigma < 1$ となることが期待され、目的関数の値は $J < 3$ となるはずである。

$$J = \frac{1}{2} \frac{(f_1 - \bar{f}_1)^2}{\sigma_{f_1}^2} + \frac{1}{2} \frac{(f_2 - \bar{f}_2)^2}{\sigma_{f_2}^2} + \frac{1}{2} \frac{(A_{11} - \bar{A}_{11})^2}{\sigma_{A_{11}}^2} + \frac{1}{2} \frac{(A_{12} - \bar{A}_{12})^2}{\sigma_{A_{12}}^2} + \frac{1}{2} \frac{(A_{21} - \bar{A}_{21})^2}{\sigma_{A_{21}}^2} + \frac{1}{2} \frac{(A_{22} - \bar{A}_{22})^2}{\sigma_{A_{22}}^2} \quad (2)$$

推定結果を図-1の赤線に示す。この結果から、目的関数の値が20程度の大きさとなっており、数値モデルが観測データを表現できないことが分かる。

4. モデル誤差の検討

次に、実験上とプログラム上での相違によって生じるモデル誤差について検討した。観測値の精度が高くても、モデル誤差が大きければ、このFEMモデルで表現できないからである。

北林(2018)らが行った実験の状況において、モデル化するとき不明な点がいくつかあった。例えば、実験で使用了センサのサイズは3cmであるが、この質量をどの要素に配分するのか、また、設置における人為的誤差がどの程度か、等である。そのため、実験状況やモデ

ル化での不明な点について、モデルの設定値を微妙に変化させつつ、観測値がどの程度変化するかを推定した。

上記の推定からモデル誤差を定量化し、式(1)の分散共分散 Σ に足すことで、モデル誤差の影響を加味することとした。その推定結果を図-1の青線に示す。

観測誤差のみを考慮した場合と比べると目的関数の値は半分程度となり、小さくはなったが、妥当な値までは収束しなかった。修正前後において、観測値とプログラムの収束値との誤差率を表-2示す。

表-2 観測量の誤差率 (%)

	f_1	f_2	A_{11}	A_{12}	A_{21}	A_{22}
赤	0.52	-0.01	9.34	3.16	5.18	-4.58
青	0.76	-0.05	8.35	1.61	5.59	-4.15

表-2より、修正前後で誤差率に大きな変化はなく、以前として観測値を説明するようなモデルになっていないことが分かる。特にピーク振幅については、誤差率が大きく、パラメータ推定に影響を及ぼしている可能性がある。そのため、目的関数とモデルパラメータが妥当な値に推定されない原因がモデル誤差以外にも存在すると言える。

また、式(1)の目的関数で共分散の値を設定し、推定を行ったが、図-1の結果と大きな差は見られなかった。

5. まとめ

モデル修正、目的関数の修正を検討したが、正しいモデルの構築には至らなかった。また、モデル誤差は推定結果にある程度の影響を及ぼすが、他の主要因があると考えられる結果となった。今後は、スウェイロッキングモデルや強制加振実験を再検討し、引き続き妥当なモデルの構築を試みる。

参考文献

- 1) 北林和良, 辻貴洋, 籬はるか, 佐伯昌之: 道路標識の振動応答解析モデルの構築, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.74, No.2, I_561-I_570, 2018
- 2) 金子丈一郎, 佐伯昌之: 道路標識の振動応答解析モデルのパラメータ推定, 土木学会全国大会第74回年次学術講演会