

武蔵工業大学 正会員 星行 勝
 フジタ工業(株) 正会員 斎藤 悦郎
 武蔵工業大学 O学生員 丸山 収

1. はじめに

既存の橋梁の動特性(ω, β)を精度よく知ることは、動的設計、老朽化、安全性、及び歩行者の振動感覚等の評価に対して非常に重要である。現在、一般的には、地震観測、常時微動の測定、起振機実験、走行車輛による振動測定、衝撃試験等から、動特性を推定している。

本研究は、走行車輛による振動測定から得られるデータを基に、若者が開発した、EK-WGI法を用いて橋梁の動特性、車輛の重量、及び走行速度を推定するものである。

ここで、第一段階として、EK-WGI法による荷重-橋梁系の動特性推定問題の有効性を検証するためにあらかじめ与えられた諸元をもつモデルを用いた。この目的のため、まず荷重-橋梁系モデルを用いて、応答計算を行ない、その応答波形を、EK-WGI法の観測データとした。なおモデルは、滑らかな路面を有する単純桁橋上を、集中荷重Pが走行するものとした。

2. 応答計算

図-1に示すような橋梁系のn次固有振動モードを、 $\varphi_n(x)$ とし、また時間関数を $g_n(t)$ とすると、任意の観測位置 X_1 での動的たわみは次式で示される。

$$Z(X_1, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(X_1) \cdot g_n(t) \quad (1)$$

また、接地力Pは、時間tに於ける位置 $X=Vt$ で一定であるとすると、 $g_n(t)$ における微分方程式は次式で与えられる。

$$\ddot{g}_n(t) + 2\beta_n \omega_n \dot{g}_n(t) + \omega_n^2 g_n(t) = \frac{2\beta P}{WL} \sin \frac{n\pi Vt}{L} \quad (2)$$

($0 \leq t \leq \frac{L}{V}$)

$$\text{ここで } \varphi_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{L}$$

(1), (2)式よりn次振動モードにおける X_1 での運動方程式は次式で示される。

$$\ddot{Z}_n(X_1, t) + 2\beta_n \omega_n \dot{Z}_n(X_1, t) + \omega_n^2 Z_n(X_1, t) = \frac{2\beta P}{WL} \sin \frac{n\pi Vt}{L} \sin \frac{n\pi X_1}{L} \quad (3)$$

$$\text{ここで } \omega_n = \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{W}}, \quad \beta_n = \frac{1}{2\omega_n} \frac{8C}{W}$$

次にEK-WGI法に用いる観測データを作成する。荷重-橋梁系モデルの諸元は、図-1に示した。また、ここでは、位置 $X=L/6$ での応答波形を観測データとした(図-2)。なお、橋梁系の2次以上の高次振動は、1次振動に比較して小さいことから、1次振動のみ考慮した。

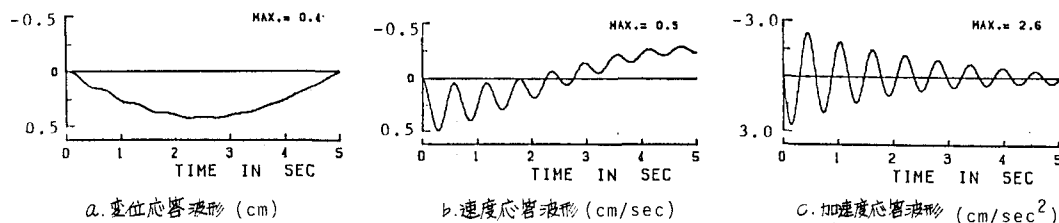


図-2. 応答波形

3. EKF-WGI法

*3)

EKF-WGI法は、時系列解析である現代制御理論の、拡張カルマンフィルタアルゴリズムと、グローバルに重みおのせ、くり返す方法である。拡張カルマンフィルタは、非線形の状態方程式と観測方程式から構成されている。(3)式の運動方程式と推定するパラメータ(β, ω, P, V)と、非線形状態方程式に組み込むためには、状態空間による表示が必要である。

ここでは、1次振動モードのみ考慮するため、(3)式は以下の様に示される。

$$\ddot{z}_1(x_1, t) + 2\beta_1 \omega_1 \dot{z}_1(x_2, t) + \omega_1^2 z_1(x_3, t) = \frac{2\beta P}{WL} \sin \frac{\pi V t}{L} \sin \frac{\pi x_4}{L} \quad (4)$$

次に状態量と、 $X_1 = z_1, X_2 = \dot{z}_1, X_3 = \ddot{z}_1, X_4 = \beta_1, X_5 = \omega_1, X_6 = P, X_7 = V$ とし表わす。

そして、パラメータは定数であるものとし、線形加速度法を用いて離散化すると、(5)式 of 非線形離散型状態方程式が得られる。

$$X_{k+1} = \begin{bmatrix} X_1(k+1) \\ X_2(k+1) \\ X_3(k+1) \\ X_4(k+1) \\ X_5(k+1) \\ X_6(k+1) \\ X_7(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \frac{\Delta^2}{2} A_1) X_1(k) + (\Delta + \frac{\Delta^2}{2} B_1) X_2(k) + (\frac{\Delta^2}{2} + \frac{\Delta^2}{2} C_1) X_3(k) + \frac{\Delta^2}{2} P_1 X_6(k) \left\{ -\frac{2\beta}{WL} \sin \frac{\pi \Delta(k+1) X_7(k)}{L} \sin \frac{\pi X_4}{L} \right\} \\ \frac{\Delta}{2} A_1 X_1(k) + (1 + \frac{\Delta}{2} B_1) X_2(k) + (\frac{\Delta}{2} + \frac{\Delta}{2} C_1) X_3(k) + \frac{\Delta}{2} P_1 X_6(k) \left\{ -\frac{2\beta}{WL} \sin \frac{\pi \Delta(k+1) X_7(k)}{L} \sin \frac{\pi X_4}{L} \right\} \\ A_1 X_1(k) + B_1 X_2(k) + C_1 X_3(k) + P_1 X_6(k) \left\{ -\frac{2\beta}{WL} \sin \frac{\pi \Delta(k+1) X_7(k)}{L} \sin \frac{\pi X_4}{L} \right\} \\ X_4(k) \\ X_5(k) \\ X_6(k) \\ X_7(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $P_1 = -\{1 + \Delta\{X_4(k)\}\{X_5(k)\} + \frac{\Delta^2}{2}\{X_5(k)\}^2\}^{-1}$, $A_1 = P_1\{X_5(k)\}^2$, $\Delta = \Delta t$, Δ : 時刻間

$B_1 = P_1\{2\{X_4(k)\}\{X_5(k)\} + \Delta\{X_5(k)\}^2\}$, $C_1 = P_1\{\Delta\{X_4(k)\}\{X_5(k)\} + \frac{\Delta^2}{2}\{X_5(k)\}^2\}$

また、変位応答波形と観測データとした場合の観測方程式は、以下の様に示される。

$$y_k = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0] X_k + v_k \quad (6)$$

ここで、 y_k : Δt 時間での応答変位, v_k : ガウス白色雑音

4. 推定結果

表-1 真値

表-2 初期条件

表-1には各パラメータの真値を示した。時系列解析法では、任意の初期条件を与える必要があり、表-2に初期条件を示した。図-2に示した各応答波形(変位、速度、加速度)を用いて各パラメータの推定を行なった(表-3)。

パラメータ	真値
β_1	0.0421
ω_1	10.690 (rad/sec)
P	13.6 (ton)
V	12.0 (m/sec)

パラメータ	初期値
β_1	0.01
ω_1	10.0 (rad/sec)
P	10.0 (ton)
V	10.0 (m/sec)

表-3 推定結果

表-3と表-1を比較すると、非常に良い精度で、各パラメータを推定できることがわかる。また、表-2の初期条件では、変位、速度、加速度の順に、安定した結果を得るまでのくり返し回数が必要であることがわかる。

パラメータ	Dis.	Vel.	Acc.
β_1	0.0421	0.0420	0.0420
ω_1 (rad/sec)	10.689	10.690	10.689
P (ton)	13.6	12.47	13.12
V (m/sec)	12.0	12.1	12.44
くり返し回数(回)	5	8	9

今後は、路面の凹凸、走行荷重のモデル化、及び吸振器への、非線形状態方程式と拡張する予定である。また、実験データに基づいて、既存橋梁の動特性の推定を行なう予定である。

*参考文献 1) 星野, 斎藤; 拡張カルマンフィルタを用いた同定問題の各振動系への応用, 土壌集 Vol.33, p.99-107, 1983

2) 星野, 斎藤; 線形多自由度系の動特性の推定, 土壌集(投稿中)

3) Jozwiński, A. H.; Stochastic Process and Filtering Theory, 1970

4) 吉村, 高坂, 内野; 単一走行車両による道路橋の非定常ランダム応答解析, 土壌集 Vol. 25, p.33-44, 1977