

武蔵工業大学 正会員 星谷 勝
 フジタ工業(株) 正会員 青藤 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、老朽化、安全性、及び歩行者の振動感覚等の評価や、また動的設計に用いる基本データとして、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、起振実験、走行車輛による振動測定、衝撃試験等のデータを用いて、これらを周波数領域に変換し、求められた応答関数の形状から、動特性の推定が行なわれている。本研究は、走行車輛による振動測定データを基に、著者が開発した、E K - W G I 法^(#1)を用いて、橋梁の動特性の推定を試みたものである。E K - W G I 法は、時系列解析法である現代制御理論の拡張カルマンフィルター^(#2)を、グローバルにくり返す方法である。したがって、本方法では、得られたデータ^(#4)を、周波数領域に変換することなく、時系列で処理できるという特徴がある。

本研究の第一段階として、すでに著者は、滑らかな路面を有する単純桁上を集中荷重 P が、走行する場合のモデルに対し、応答計算を行ない、これらのデータを用いて、E K - W G I 法から、精度の良い動特性が推定できることを示した。本報告では、滑らかな路面を有する単純桁上を、走行車輛荷重(バネ-マス系)が、一定速度で走行する場合について検討した。なお、本方法の推定結果の精度を検証するために、第一段階と同様に、あらかじめ与えられた諸元をもつモデルを用いて、応答計算を行ない、その応答波形をE K - W G I 法の観測データとした。

2. 応答計算

応答計算には、図-1に示すモデルを用いた。ここで、車輛系の鉛直変位 $u(t)$ 、橋梁系の任意点 x_1 での n 次振動モードに対する動的たわみ $z_n(x_1, t)$ とすると、それぞれ、次の運動方程式が得られる。

<車輛系>

$$\ddot{u}(t) + 2\beta\omega \dot{u}(t) + \omega^2 u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \dot{z}_n(x_1, t) \left\{ 2\beta\omega \frac{X_n(vt)}{X_n(x_1)} \right\} + z_n(x_1, t) \left\{ 2\beta\omega \frac{\dot{X}_n(vt)}{X_n(x_1)} + \omega^2 \frac{X_n(vt)}{X_n(x_1)} \right\} \right\} \quad (1)$$

<橋梁系> $\ddot{z}_n(x_1, t) + 2\beta_n \omega_n^2 \dot{z}_n(x_1, t) + \omega_n^2 z_n(x_1, t) + \frac{2P}{WL} X_n(vt) X_n(x_1) = \frac{2P\beta}{WL} X_n(vt) X_n(x_1) \quad (2)$

また、任意点 x_1 での動的たわみは、 $z(x_1, t) = \sum_{n=1}^{\infty} z_n(x_1, t) \quad (3)$

但し、 β : 車輛系の減衰定数、

β_n : 橋梁系の n 次振動における減衰定数 $\beta_n = \frac{1}{2\omega_n} \frac{c}{W}$

ω : 車輛系の固有円振動数、

ω_n : 橋梁系の n 次振動における固有円振動数 $\omega_n = \left(\frac{W_n}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{W}}$

$X_n(x)$: 橋梁系の n 次振動モード

$$X_n(x) = \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

E K - W G I 法に用いる観測データは、車輛系の応答変位波形(図-2)と橋梁上の観測点 $x_1 = L/5.0$ での応答変位波形(図-3)とした。なお、橋梁系の2次以上の高次振動は、1次振動に

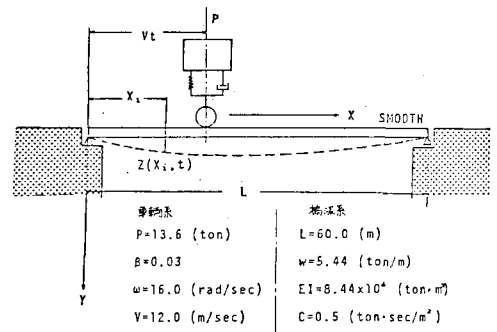


図-1 車輛-荷重モデル

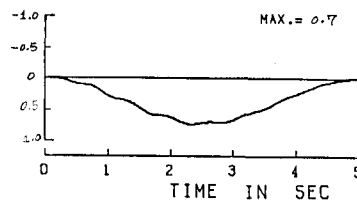


図-2 車輛系の鉛直変位応答 (cm)

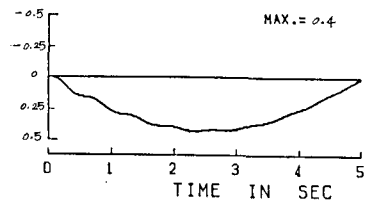


図-3 橋梁系の変位応答 (cm)

比較して小さいこと及び、1次振動のみ考慮した。

3. 推定モデル

パラメータの推定に際して、次に示す、2通りの推定モデルについて検討を行なった。

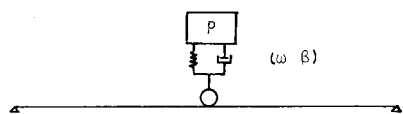


図-4. CASE 1の推定モデル

表-1. CASE 1の推定結果

パラメータ	B	ω (rad/sec)	B_1^2	ω_1^2 (rad/sec)	P (ton)	V (m/sec)
正解値	0.030	16.00	0.042	10.689	13.6	12.0
初期値	0.1	5.0	0.1	5.0	5.0	***
CASE 1-1	0.0302	16.002	****	*****	****	****
CASE 1-2	****	****	0.0421	10.689	****	****
CASE 1-3	0.0301	15.999	0.0421	10.689	****	****
CASE 1-4	0.030	15.999	0.0421	10.689	13.599	****

CASE 1は、式(1)、(2)をそのまま、拡張カルマンフィルタ状態方程式に組み込んだ、推定モデルを用いた場合である(図-4)。

なお、この場合には、拡張カルマンフィルタアルゴリズムに用いる遷移マトリックスが、かなり複雑になる。

CASE 2は、第一段階で定式化した推定モデルを用いた場合すなわち、バネ・マス系の走行車両荷重 W 、走行集中荷重の寄与モデルとして、置きかえた場合である(図-5)。

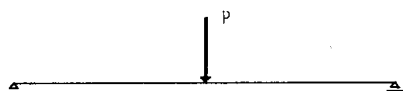


図-5. CASE 2の推定モデル

4. 推定結果

表-2. CASE 2の推定結果

パラメータ	B^2	ω^2 (rad/sec)	P (ton)	V (m/sec)
正解値	0.042	10.689	13.6	12.0
初期値	0.10	5.0	5.0	10.0
CASE 2-1	0.060	10.682	****	****
CASE 2-2	0.059	10.689	****	12.0
CASE 2-3	0.0439	10.301	12.628	****
CASE 2-4	0.0442	10.299	12.626	12.0

EK-WG法に用いた、パラメータに対する状態数 n の初期条件は、表-1、表-2に示した。また、状態量の真の値と誤差の共分散 $P(t_0)$ 、重み W 及び、観測方程式に付加するノイズの共分散 R_{tk} は、CASE 1に対して、 $P(t_0)=1.0$ ($i \neq j, 0.0$) $i=1 \sim 6$, $P(t_0)=100.0$ ($i=j, 0.0$) $i=7 \sim 12$, $W=1000.0$, $R_{tk}=0.01$, CASE 2に対して、

$P(t_0)=1.0$ ($i \neq j, 0.0$) $i=1 \sim 3$, $P(t_0)=100.0$ ($i=j, 0.0$) $i=4 \sim 7$, $W=1000.0$, $R_{tk}=0.01$, また、表-1、2の****印は、正解値を既知量として与えた場合である。

① CASE 1に対して：CASE 1-1は、車両系の動特性のみを未知量とした場合、CASE 1-2は、橋深系の動特性のみを未知量とした場合、CASE 1-3は、車両系と橋深系の動特性を未知量とした場合、またCASE 1-4は、車両系と橋深系の動特性と、車両重量を未知量とした場合である。表-1から明らかな様にそれぞれのケースに対して、非常に良い精度で推定できることがわかる。なお現在のところ、走行速度を未知量とした場合には、グローバルな繰り返しを行っても、初期値があまり変化しない点から、推定が難しく今後の検討を要する。

② CASE 2に対して：CASE 2-1は、橋深系の動特性を未知量とした場合、CASE 2-2は、橋深系の動特性と走行速度を未知量とした場合、CASE 2-3は、橋深系の動特性と車両重量を未知量とした場合、またCASE 2-4は、橋深系の動特性と、車両重量および走行速度を未知量とした場合である(表-2)。CASE 2-1、CASE 2-2の様に、車両重量を既知量とした場合には、橋深系の固有円振動数に関しては、かなり良い精度で推定されるが、橋深系の減衰定数に関しては、40%程度大き目に推定されてしまう。CASE 2-3、CASE 2-4の様に、車両重量を未知量とした場合には、車両重量が、7%程度小さ目に推定されるが、橋深系の動特性値は、実用上問題のない程度の精度で推定できる。なお、速度に関しては、CASE 2-3、CASE 2-4の様に、非常に良い精度で推定できる。

*参考文献 1) 屋谷 有隆：拡張カルマンフィルタを用いた同定問題の各種動系への応用，土橋集 Vol. 339 P59~67, 1983

2) Jazwinski A.H.: Stochastic Process and Filtering Theory, 1970

3) 葛村 孝雄：単一走行車両による道路橋の非定常プログラム応答解析，土橋集 Vol. 258 P35~44, 1977

4) 屋谷 有隆，丸山：単一走行荷重による単軌行橋の動特性の推定，第14回土木工学部年次研究発表会講演要旨集 (I-12)