

ロッキング振動が上部構造物の同定精度に及ぼす影響

徳島大学大学院○学生員 原井大輔 徳島大学大学院 学生員 周 濱
徳島大学工学部 正 員 沢田 勉 徳島大学工学部 正 員 平尾 潔

1. はじめに 地震記録を用いて多自由度系の動特性を同定する場合、基礎は固定と仮定することが多い。しかし、構造物と基礎の間に生じる動的相互作用は、上部構造物に大きな影響を及ぼす。特にロッキング振動は、各質点の応答に関与するため、上部構造物の同定ではこれを無視することができない。従来の研究によると、基礎の水平動とロッキング振動の観測記録が得られる場合について、同定が可能であることがわかってきている。しかし、ロッキング振動が観測されることはまれである。このような観点より、基礎上面で水平動のみの観測記録が得られているという前提のもと、基礎を固定と仮定した場合の同定精度を検討する。また、ロッキング振動の割合を変化させ、その割合と同定精度の関係を検討する。

2. 手法の概要 図-1のような構造物-基礎系において、各質点の加速度観測記録 $\ddot{z}_i(t)$ 、基礎上面での水平動 $\ddot{z}_0(t)$ が得られているとする。なお、観測記録は応答解析より得られる加速度応答にホワイトノイズを付加して作成する。また、基礎上面での水平動 $\ddot{z}_0(t)$ は、次式より求める。

$$\ddot{z}_0(t) = \ddot{z}_H(t) + h_R \ddot{\theta}(t) \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、 h_R は基礎上面からロッキング中心までの高位差、 $\ddot{z}_H(t)$ はスウェイ振動の絶対加速度である。このとき、上部多自由度系の運動方程式を絶対加速度、速度および変位を用いて表すと次のようになる。

$$[M]\{\ddot{z}(t)\} + [C]\{\dot{z}(t)\} + [K]\{z(t)\} = \{f(t)\} \quad \cdots (2)$$

ここで、 $\{z(t)\} = \{z_1(t), \cdots, z_n(t)\}$ は上部多自由度系に含まれる各質点の絶対変位、 $[M]$ は質量行列、 $[C]$ は減衰行列、 $[K]$ は剛性行列である。また、右辺の $\{f(t)\}$ は次のようになる。

$$\{f(t)\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ c_n \dot{z}_0(t) + k_n z_0(t) \end{Bmatrix} \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

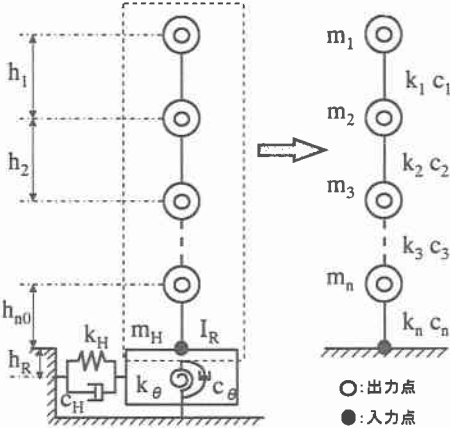
上部多自由度系の同定では、次に示す離散型非線形状態方程式(4)と離散型非線形観測方程式(5)について拡張カルマンフィルターを適用する。

$$x(k+1) = G(x(k)) \quad \cdots \cdots \cdots (4) \quad , \quad y(k) = h(x(k)) + v(k) \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

ここで、 x は状態ベクトル、 y は観測記録、 v はホワイトノイズであり、 $k, k+1$ は時刻を表す。式(4)の状態方程式は、式(2)の運動方程式の数値積分(Newmarkの β 法)を基本とし、これに各質点のパラメータ(ばね定数、減衰係数)を並列に組み込んだものである。以上のような拡張カルマンフィルターを用いて、各時刻の状態推定量を逐次同定する。

3. 数値計算および考察

基礎上面で水平動のみの観測記録が得られたという条件のもと、拡張カルマンフィルターを用いて線形5自由度系の各質点のばね定数および減衰



(a)構造物-基礎系 (b)上部多自由度系

図-1 多自由度系モデル

表-1 線形5自由度系の諸元

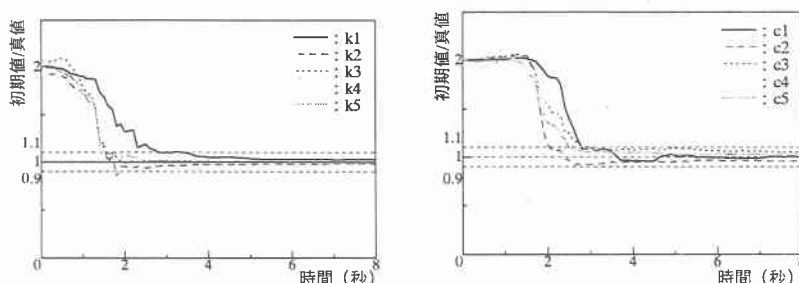
質点番号 No.i	質量 m_i [t]	ばね定数 k_i [kN/m]	減衰係数 c_i [t/s]	層間の高低差 h_i [m]
1	7.0×10^2	2.1×10^6	1.4	3.5
2	7.0×10^2	2.1×10^6	1.4	3.5
3	7.0×10^2	2.1×10^6	1.4	3.5
4	7.0×10^2	2.1×10^6	1.4	3.5
5	7.0×10^2	2.1×10^6	1.4	3.5
sway	m_H 7.0×10^3	k_H 2.1×10^7	c_H 1.4×10^1	h_R 2.0
rocking	I_θ [kN・m・s ² /rad] 7.0×10^{10}	k_θ [kN・m/rad] 2.1×10^{14}	C_θ [kN・m・s/rad] 1.4×10^8	

係数を同定する。本研究では実際の観測記録は用いず、入力加速度としてエルセントロ地震波を用いて応答計算したものにノイズを付加し、これを観測波形として用いた。ただし、観測記録は絶対加速度時刻歴とする。また、時間刻みは $t = 0.02(\text{sec})$ 、継続時間は $8.00(\text{sec})$ とした。表-1 に、応答計算に用いた線形 5 自由度系の諸元を示す。また、これらの系の質量は既知とする。以下では、表-1 に示す各質点のばね定数および減衰係数を真値として、初期値が真値の 2 倍の場合について、線形 5 自由度系の各質点のばね定数および減衰係数を同定する。なお、状態推定量の誤差共分散の初期値は 1.0 とし、観測ノイズの共分散は $1/25000$ とする。

(1) ロッキング振動を考慮しない場合の同定結果

場合に、上部構造物の同定が可能か否かを検討する。図-2 は、ばね定数および減衰係数の同定結果の一例であり、横軸は時間、縦軸は初期値/真値を示す。ただし、各パラメータの初期値は表-1 の真値の 2 倍とし、観測ノイズは 10% とする。これらの図から、水平動のみの観測記録の場合でも、基礎のロッキング振動が小さい場合には、全てのパラメータが真値に収束し、同定が可能であることがわかる。

ここでは、基礎上面で水平動のみの観測記録が得られた



(a)ばね定数

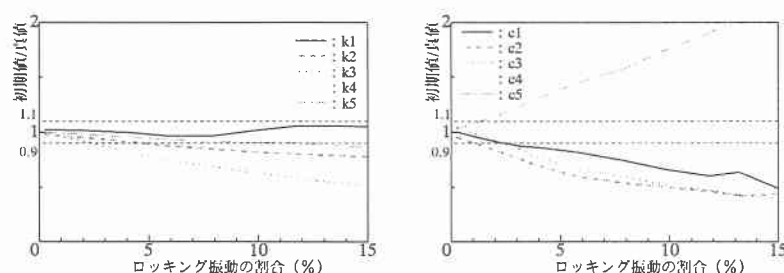
(b)減衰係数

図-2 同定結果(ノイズ 10%, 初期値 2 倍)

(2) ロッキング振動の割合と同定精度の関係

本研究で用いた同定モデルは構造物-基礎系モデルから上部構造物のみを取り出したものであり、その同定問題では状態方程式および観測方程式でロッキング振動の影響は考慮されていない。したがって、観測記録に含まれるロッキング振動は一種のノイズとして扱われる。ここでは、このようなロッキング振動がパラメータの収束性および精度にどのような影響を及ぼすかを検討する。図-3 は、水平動に含まれるロッキング振動の割合

本研究で用いた同定モデルは構造物-基礎系モデルから上



(a)ばね定数

(b)減衰係数

図-3 ロッキング振動の割合と同定精度の関係

(横軸)と初期値/真値(縦軸)の関係を表したものである。これらの図より、水平動に含まれるロッキング振動の割合が大きくなると同定精度が悪くなること、減衰係数はばね定数に比べてロッキング振動の影響を受けやすいことがわかる。また、ロッキング振動の割合と同定精度の関係は、水平動に含まれるロッキング振動が 5%以内であれば、ほぼ線形になることがわかる。実在構造物では、水平動に含まれるロッキング振動は 2%程度であり、精度の良い同定は可能である。

4. おわりに 本研究では、基礎上面で水平動のみの観測記録が得られているという前提のもと、基礎を固定とした場合について、上部構造物のパラメータを同定した。その結果、同定は可能であることがわかった。また、水平動に含まれるロッキング振動の割合と同定誤差の関係はほぼ線形であり、比例関係が認められた。さらに、実在構造物でも精度の良い同定は可能であることがわかった。

5. 参考文献 (1)有本 卓；カルマンフィルター，産業図書，1979。(2)周他；ロッキング振動の存在下における上部構造物の同定に関する一考察，平成 8 年度第 2 回四国支部技術研究発表会講演概要集，pp.92-93，1996.5。(3)小坪清真；土木振動学，森北出版，1973。(4)小高他；建築構造学 7 耐震・台風構造，鹿島出版会，1972。