

(37) 構造系に対する入力地震動の同定

武蔵工業大学 学生員○丸山 収
武蔵工業大学 正会員 星谷 勝

1. はじめに

本研究は、地震時に於ける構造系の絶対速度および加速度応答波形を観測データとして得たときに、その構造系に対する入力地震動を同定するための一手法について検討したものである。構造系に対する入力地震動の同定に関する研究には、OTTらの1自由度線形構造系に対するKalman Inverse Filterを、多自由度系に拡張して多点異入力構造系の入力地震動の同定を行った清野らの研究がある。本研究では、入力地震動を同定するために、拡張カルマンフィルタアルゴリズムにBoucおよびWenらの提案する多面型 (Versatile型) 復元力特性モデルを用いた状態方程式の定式化^{4,5)}を行い、地震時挙動特性が既知である非線形構造系から得られた観測データに対しても適応可能とした。ここでは、第一段階として線形の復元力特性を有する1自由度構造系を対象として、多面型モデルにより定式化された入力地震動同定手法の検討を数値シミュレーションにより行う。

2. 基本構造系および拡張カルマンフィルタへの定式化

本研究で採用する1自由度構造系の基本運動方程式は次式で表される。また、(1)式を時間微分することにより(2)式を得る。

$$\ddot{z}(t) + 2h\omega_0(\dot{z}(t) - \dot{f}(t)) + \omega_0^2\phi(Z(t) - f(t)) = 0 \quad (1)$$

$$\ddot{z}(t) + 2h\omega_0(\dot{z}(t) - \dot{f}(t)) + \omega_0^2\phi(Z(t) - f(t)) = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\phi(Z(t) - f(t))$: 非線形復元力特性、 ω_0 : 微小線形振動時の固有円振動数、 h : 微小線形振動時の減衰定数、 $\dot{f}(t)$: 入力速度、 $\dot{z}(t)$: 絶対速度応答、 $[\cdot]$: 時間微分である。さらに、非線形復元力特性 $\phi(Z(t) - f(t))$ は、時間微分の形で表現されたBoucおよびWenの提案する多面型復元力特性モデルを用いると次式の様になる。

$$\phi(Z(t) - f(t)) = \frac{[A(t)(\dot{z}(t) - \dot{f}(t)) - \nu(t)(\beta|\dot{z}(t) - \dot{f}(t)|)^{n-1}\phi(t) + \gamma(\dot{z}(t) - \dot{f}(t))|\phi(t)|^h]}{\eta(t)} \quad (3)$$

ここで、 $\beta, \gamma, A(t), \nu(t), \eta(t)$ および n は、多面型復元力特性モデルの履歴性状を支配するパラメータである。また、 $A(t), \nu(t)$ および $\eta(t)$ は (4) 式で与えられるひずみエネルギーの関数であり、構造系の劣化状態を支配するパラメータ $\delta A, \delta \nu$ および $\delta \eta$ を用いると (5) 式の様になる。(3)、(4) および (5) 式で表される多面型 (Versatile型) モデルは各パラメータの与え方により、強度と剛性の劣化を含め多くの種類の履歴性状を表現することができる。

$$\dot{\varepsilon}(t) = \omega_0^2 \phi(t) [\dot{z}(t) - \dot{f}(t)] \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} A(t) &= 1.0 - \delta_A \varepsilon(t) \\ \nu(t) &= 1.0 + \delta_\nu \varepsilon(t) \\ \eta(t) &= 1.0 + \delta_\eta \varepsilon(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

次に、本研究に拡張カルマンフィルタを適用するためには、構造系の基本運動方程式(2)式および多面型復元力特性モデル(3)、(4)および(5)式を用いて状態方程式の定式化を行う必要がある。ここで、入力加速度が線形に変化するという仮定を用い、 $X_1 = \dot{z}(t)$ 、 $X_2 = \ddot{z}(t)$ 、 $X_3 = \phi(Z(t) - f(t))$ 、 $X_4 = \varepsilon(t)$ 、 $X_5 = f(t)$ 、 $X_6 = \dot{f}(t)$ とおき、さらに $X_7 = \ddot{f}(t)$ および $X_8 = \dot{f}(t)$ とおくと (5) 式の様に非線形連続型状態方程式へと表現することが出来る。また、構造系の地震時復元力特性を示す多面型モデルの各パラメータについては、既知の値として与えることとする。観測方程式は、例えば構造系の絶対速度応答の1波を観測データとして用いる場合(7-a)、さらに絶対速度および絶対加速度応答の2波を観測データとして用いる場合には(7-b)式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ -2h\omega\omega_0(x_2-x_7) - \omega_0^2 [(1.0-\delta_A x_4)(x_1-x_6) - (1.0+\delta_v x_4)(\beta|x_1-x_6|^{n-1}x_3 + \gamma(x_1-x_6)|x_3|^n)] \\ \frac{(1.0+\delta_\eta x_4)}{(1.0-\delta_A x_4)(x_1-x_6) - (1.0+\delta_v x_4)(\beta|x_1-x_6|^{n-1}x_3 + \gamma(x_1-x_6)|x_3|^n)} \\ \omega_0^2 x_3(x_1-x_6) \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ 0 \end{bmatrix} + R \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{Y} &= \begin{bmatrix} 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \end{bmatrix} Y + V_y(a) \\
 \dot{Y} &= \begin{bmatrix} 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \\ 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \end{bmatrix} Y + V_y(b)
 \end{aligned} \quad (7)$$

R, V : 白色雑音

3. 数値計算

本研究では、多面型モデルにより定式化された入力地震動同定手法の適応性を調べるために、観測データは、あらかじめ設定した入力波形および既知の諸元を有する多面型復元力特性モデルを用いて数値計算により作成した。入力波形としては、0.1~10.0Hzの周波数帯域でフラットなパワースペクトルを有するホワイトノイズを加速度波形とし、さらに積分して速度入力波形とした(図-1)。これらの波形を(2)式に対する入力波形として、ルンゲクッター・ジル法により観測データである構造系の絶対速度および絶対加速度応答波形を求めた(図-2)。応答計算の際用いた構造系および多面型モデルの諸元は、 $h_0=0.1$, $\omega_0=7.07$ (rad/sec), $\beta=\gamma=\delta_A:\delta_v=\delta_\eta=0.0$ として、構造系は線形の復元力特性を有する1自由度系を用いた。

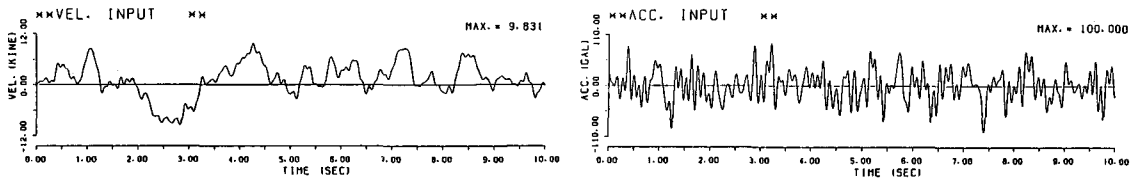


図-1。入力速度および加速度波形

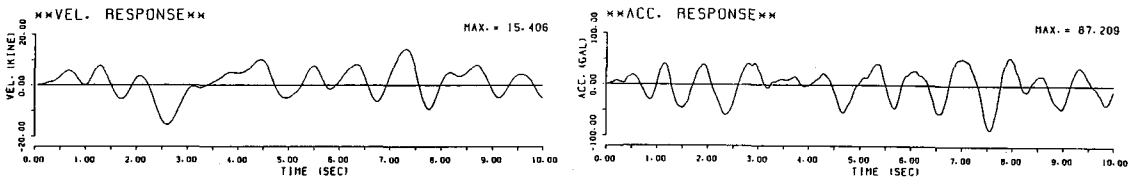
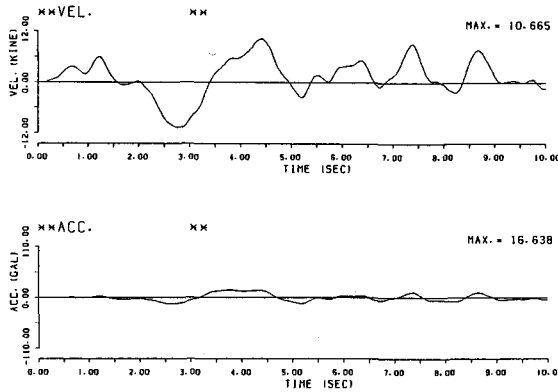


図-2。絶対速度および加速度波形

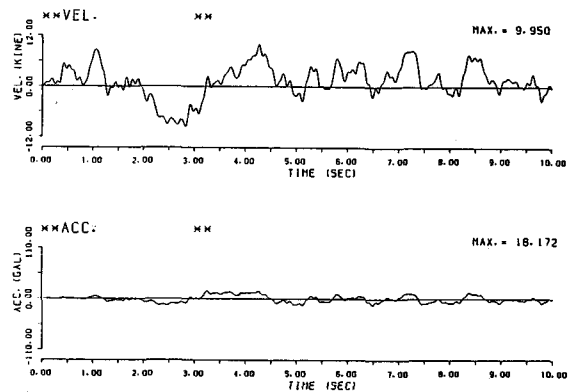
4. 同定結果

入力地震動の同定は、観測データの与え方により2ケース(CASE-1およびCASE-2)について行った。つまり、CASE-1は、絶対速度応答のみ観測データとして得られた場合、さらにCASE-2は、絶対速度および絶対加速度応答が観測データとして得られた場合である。ここで、CASE-1およびCASE-2の同定を行う際に用いる観測方程式は、それぞれ7-(a)式および7-(b)式で与えられる。図-3には、CASE-1による同定結果、図-4には、CASE-2による同定結果の入力速度および加速度波形を示した。



CASE-1

図-3。同定結果



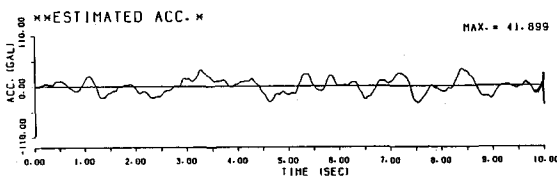
CASE-2

図-4 同定結果

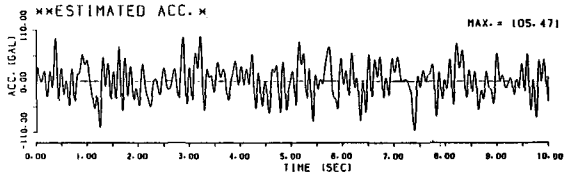
CASE-1の場合に同定された入力波形を応答計算の際に用いた既知の入力波形と比較すると、入力速度波形に関しては、全体の傾向は一致しているが高周波成分が除かれたなめらかな波形となっていることがわかる。さらに、加速度波形に関しては、非常に精度の悪い同定結果となっている。また、CASE-2で同定された入力速度波形に関しては、振幅および形状についても既知の入力速度波形と非常に良い対応を示していると思われる。しかし、加速度波形の同定については、CASE-1の場合同様精度の悪い同定結果となっている。

CASE-1およびCASE-2より、入力速度波形に関しては、ある程度同定可能と思われる。さらに、CASE-2の結果より、観測データとして絶対速度および絶対加速度応答が得られれば、精度よく入力速度波形を同定できるものと思われる。しかしながら、入力加速度波形については、拡張カルマンフィルタによる直接同定では、精度の良い結果は得られなかった。

次に、CASE-1およびCASE-2の同定で得られた各速度波形を、フーリエ変換を用いて数値微分して加速度波形を求めた(図-5(a),(b))。CASE-2より同定された入力速度波形を微分した場合には、既知の入力加速度波形と非常に良い対応を示していることがわかる。また、CASE-1で同定された速度波形を微分した場合には良い結果は得られなかった。



(a) CASE-1



(b) CASE-2

図-5。数値微分による入力加速度波形

5. まとめ

本研究は、地震時に於ける構造系の絶対速度および絶対加速度応答波形を観測データとして得たときに、その構造系に対する入力地震動を同定するための一手法について検討した。その際、拡張カルマンフィルタアルゴリズムの状態方程式に対して多面型モデルを用いた定式化を行い、既知の諸元を有する1自由度線形構造系を用いて数値シミュレーションにより提案する方法の検討を行った。その結果、観測データとして構造系の絶対速度および絶対加速度応答波形が得られる場合には、入力速度波形を精度良く同定することができた。また、入力加速度波形については、拡張カルマンフィルタによる直接同定では、精度の良い結果は得られなかった。しかし、精度の良い入力速度波形の同定が可能であれば、同定された速度波形を数値微

分することにより加速度波形の同定が可能であると思われる。さらに、入力速度波形の同定が可能であれば、積分および微分することにより容易に入力変位および入力加速度波形を求めることができるものと思われる。

参考文献

1. Ott, N. and H.G. Meder, The Kalman Filter as a Prediction Error Filter, Geophysical Prospecting 20, 549-560.
2. 清野、土岐、佐藤、カルマンフィルターによる多点異入力系の入力地震動の同定、土木学会第41回年次学術講演会概要集、I-401
3. 土岐、佐藤、清野、市原、カルマンフィルタを用いた断層破壊過程の同定、京都大学防災研究所年報、No.29, B-2, 1986年4月
4. Hoshiya, H., and Maruyama, O., Identification of a Restoring Force Model by EK-WGI Procedure, The 3rd International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, at Princeton, 1987.
5. Baber, T.T., and Wen, Y.K., Random Vibration of Hysteretic Degrading System, Jour. of Eng. Mech., Vol.107, No.EM6, ASCE, 1981