

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、構造系に対する地震入力波形と応答波形を観測データとして得たときに、その構造系の地震時非線形特性を同定する手法を開発し、数値シミュレーションによりその有効性を示したものである。ここでは、拡張カルマンフィルタにBoucおよびWenらの提案する多面型（Versatile型）の復元力特性モデルを用いた状態方程式の定式化を行った。そして、この状態方程式に基づいて、構造系の地震時非線形挙動を同定するための一手法を示した。

2. 基本構造系

本研究で採用する1自由度多面型復元力特性モデルの基本運動方程式は次式で表される。

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

ここで、 $\phi(u(t))$: 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、 $\ddot{f}(t)$: 入力加速度、 $u(t)$: 相対変位応答である。さらに、非線形復元力特性 $\phi(u(t))$ 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ようにになる。

$$\dot{\phi}(u(t)) = \frac{A(t)\dot{u}(t) - v(t)(\beta\dot{u}(t)\phi(u(t)) + \gamma\dot{u}(t)\phi(u(t))^{n-1})}{\eta(t)} \quad (2)$$

ここで、 β 、 γ 、 $A(t)$ 、 $v(t)$ 、 $\eta(t)$ 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、 $A(t)$ 、 $v(t)$ および $\eta(t)$ は（3）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 δ_A 、 δ_v および δ_η を用いると（4）式の様になる。

$$\varepsilon(t) = \int \omega_0^2 \dot{u}(t) \phi(u(t)) dt \quad (3) \quad A(t) = 1.0 - \delta_A \varepsilon(t), \quad v(t) = 1.0 + \delta_v \varepsilon(t), \quad \eta(t) = 1.0 + \delta_\eta \varepsilon(t) \quad (4)$$

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、基本構造系の運動方程式（1）および多面型復元力特性モデル（2）、（3）および（4）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、 $X_1 = u(t)$ 、 $X_2 = \dot{u}(t)$ 、 $X_3 = \phi(u(t))$ 、 $X_4 = \varepsilon(t)$ 、 $X_5 = h$ 、 $X_6 = \omega_0$ 、 $X_7 = \beta$ 、 $X_8 = \gamma$ とおき、さらに $X_9 = \delta_A$ 、 $X_{10} = \delta_v$ および $X_{11} = \delta_\eta$ とおくと（5）式の様に連続型の状態方程式へと表現することが出来る。なお、パラメータ n については、あらかじめ既知の値として与えることとした。また、観測方程式は、構造系の変位および速度応答波形が観測されるものとして（6）式で与えた。

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \\ \dot{X}_6 \\ \dot{X}_7 \\ \dot{X}_8 \\ \dot{X}_9 \\ \dot{X}_{10} \\ \dot{X}_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 \\ -2X_5X_6X_2 - X_6^2X_3 - \ddot{f}(t) \\ \frac{(1.0 - X_9X_4)X_2 - (1.0 + X_{10}X_4)(X_7X_2X_3^{n-1}X_3 + X_8X_2X_3^n)}{1.0 + X_{11}X_4} \\ X_6^2X_3X_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \\ 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (6)$$

V: 白色雑音

3. 数値計算例

本研究では、多面型モデルにより定式化された地震時非線形挙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（1979年、Imperial Valley記録）および既知の諸元（ $h=0.1$ 、 $\omega_0=7.07\text{rad/sec}$ 、 $\beta=0.05$ 、 $\gamma=0.05$ 、 $\delta_A=0.001$ 、 $\delta_v=0.002$ 、 $\delta_\eta=0.002$ ）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。また、観測データは(7)式より求められたノイズを含む応答波形とした。図-1には、入力波形および観測データであるノイズを含んだ応答波形、さらに図-2には、構造系の真の復元力特性およびノイズを含む観測データから(8)式をもとに求めた復元力特性を示した。

$$(\text{例えば変位波形の場合}) u(t)_{\text{noise}} = u(t) + \dot{u}(t) * R(t) * 0.1 \quad (7)$$

$$\Phi(u(t)) = [-\ddot{f}(t) - \ddot{u}(t) - 2\text{howou}(t)] / (\omega_o^2) \quad (8)$$

ここで、 $R(t)$: 平均値0の乱数 ($-1 \leq R(t) \leq 1$)

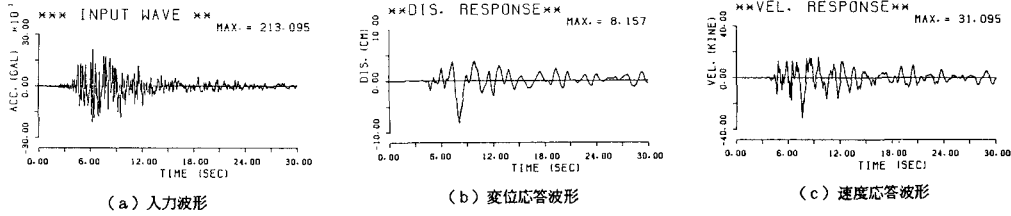


図-1. 入力および観測データ

パラメータの同定は二段階に分けて行った。まず、第一段階として線形系に關与するパラメータ (h_o および ω_o) は観測データの初期微小振動区間 (0~4sec) を用いて同定した¹⁾ ($\hat{h}_o = 0.102$, $\hat{\omega}_o = 7.05$)。次に、第一段階で得られた結果を固定し、第二段階では観測データの全継続時間を用いて履歴パラメータの同定を行った。なお、パラメータの同定に際しては、著者らが提案する拡張カルマンフィルタアルゴリズムに重みを付けてグローバルに繰り返す手法 (EK-WGI法)¹⁾ を用いた。

図-3には、EK-WGI法の1回目および5回目のグローバルな繰り返し時に得られた復元力特性 ($\hat{u}(t) \sim \hat{\Phi}(u(t))$) を示した。なお、比較のために真の復元力特性およびノイズを含む観測データから(8)式により求められた復元力特性の経時変化を示した。図-3より同定された復元力特性は、真の復元力特性と非常に良い対応をしていることが分かる。また、グローバルな繰り返しにより同定結果の精度も向上している。

4. まとめ

本研究で行った定式化によれば、構造系の劣化を含む地震時非線形挙動の同定が可能であることが数値実験により明らかになった。今後は、実構造系への適用へと発展させていく予定である。

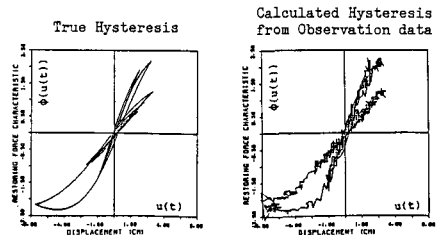


図-2. 復元力特性

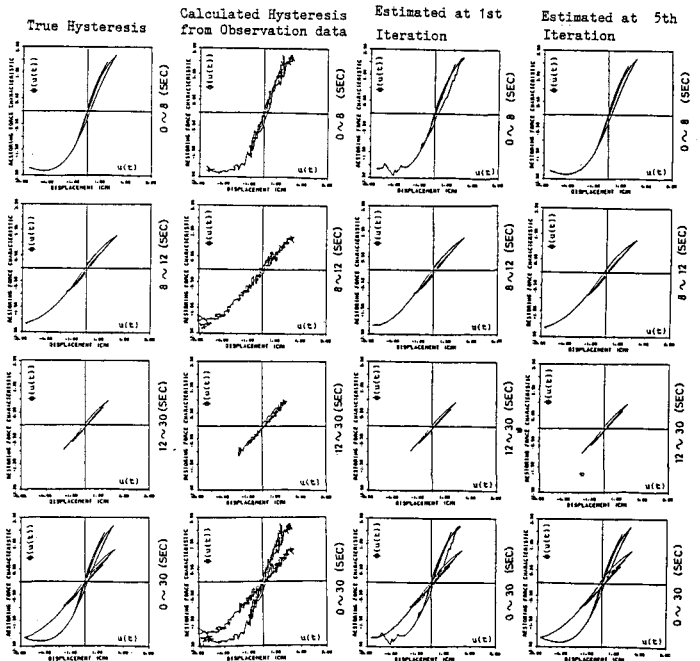


図-3. 同定結果

参考文献: (1) M. Hoshiya and O. Maruyama, Identification of a Restoring Force Model by EK-WGI Procedure, Proceedings of The 3rd International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, at Princeton in June 1987 (to be appered).

(2) Baber, T. T., and Wen, Y. K., Random Vibration of Hysteretic Degrading System, Journal of Eng. Mech., Vol. 107, No. EM6, ASCE, 1981.