

(39) 地盤の地震時復元力特性の同定

武蔵工業大学○正会員 星谷 勝
武蔵工業大学 学生員 丸山 収

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復元力特性を同定する手法を開発し、提案する手法の有効性を示したものである。

ここでは、現代制御理論の拡張カルマンフィルターにより同定が可能となるように問題の定式化を行っている。具体的には、拡張カルマンフィルターアルゴリズム中の状態方程式を、BoucおよびWenらが提案する多面型の復元力特性モデル²⁾を用いて定式化し、比較的多くの種類の非線形挙動が同定できる様になっている。

以下では、実表層地盤から得られた観測記録を用いて、提案する手法の有効性について検討する。

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。

$$\ddot{u}(t) + 2h_0\omega_0\dot{u}(t) + \omega_0^2\phi(u(t)) = -\ddot{f}(t) \quad (1)$$

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_0 : 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なる。

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

ここで、 β 、 γ 、 $A(t)$ 、 $\nu(t)$ 、 $\eta(t)$ 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(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 δA 、 $\delta \nu$ および $\delta \eta$ を用いると(4)式の様になる。

$$\dot{\varepsilon}(t) = \omega_0^2 \dot{u}(t) \phi(u(t)) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A(t) &= 1.0 - \delta_A \varepsilon(t) \\ \nu(t) &= 1.0 + \delta_\nu \varepsilon(t) \\ \eta(t) &= 1.0 + \delta_\eta \varepsilon(t) \end{aligned} \quad (4)$$

次に、本研究に拡張カルマンフィルター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¹⁾を行う必要がある。

ここで、 $X_1 = u(t)$ 、 $X_2 = \dot{u}(t)$ 、 $X_3 = \phi(u(t))$ 、 $X_4 = \varepsilon(t)$ 、 $X_5 = h_0$ 、 $X_6 = \omega_0$ 、 $X_7 = \beta$ 、 $X_8 = \gamma$ とおき、さらに $X_9 = \delta A$ 、 $X_{10} = \delta \nu$ および $X_{11} = \delta \eta$ とおくと(5)式のよう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。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -2x_5x_6x_2 - x_6^2x_3 - \ddot{f}(t) \\ \frac{(1.0 - x_9x_4)x_2 - (1.0 + x_{10}x_4)(x_7x_2x_3^{n-1}x_3 + x_8x_2x_3^n)}{1.0 + x_{11}x_4} \\ x_6^2x_3x^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5) \quad \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \\ 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \end{bmatrix} X + V \quad (6)$$

V: 白色雑音

3. 強震記録に基づく実地盤の地震時非線系挙動の同定

本研究では提案する地震時非線系挙動同定手法についての検討を、1980年の千葉県中部地震から得られた表層地盤の観測記録を用いて行う。1980年9月25日の千葉県中部地震は、マグニチュード：M=6.1、震源深さ：D=80 kmおよび震央距離： $\Delta=22$ kmであった。図-1および図-2に、それぞれ強震記録ならびに地震観測地点の地盤概要を示した。図-1において、地盤地表部(-1m)および基盤(-41.8m)での最大加速度は、それぞれ193.6ガル、63.5ガルである。さらに、図-1に示した観測記録を基に、基盤に対する地盤地表部での相対加速度記録を求め、逐次積分して速度記録および変位記録とした(図-3)。

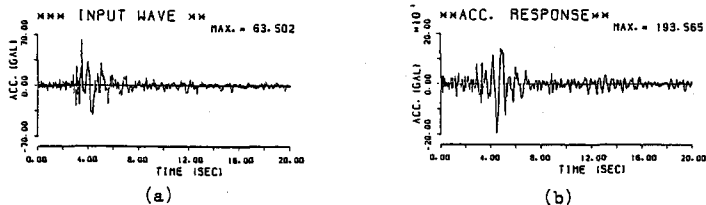
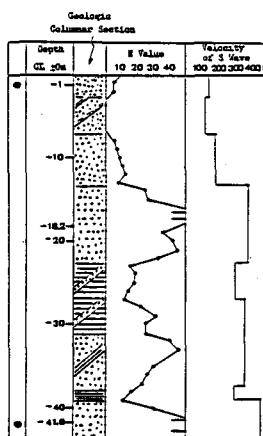


Figure 1. Base and Surface Ground Motions



acceleration seismograph was illustrated ; ●

Figure 2. Geological Profile

パラメータの同定は、二段階に分けて行った。まず、地表部の観測記録(図-3(a),(b))および基盤入力記録(図-1(a))に於て、初期微小振動時には線形的な挙動を示すものとして、微小線形振動時のパラメータ h_0 および ω_0 の同定を行う。(2)式において線形系の復元力特性を示すように、 $X_7(=\beta)=0.0$, $X_8(=\gamma)=0.0$, $X_9(=\delta A)=0.0$, $X_{10}(=\delta \nu)=0.0$ および $X_{11}(=\delta \eta)=0.0$ と予め固定して、観測記録の初期微小振動区間：0~3.5(sec)を用いて h_0 および ω_0 の同定を行った。表-1には、同定に用いた初期条件を示した。さらに、図-4にはEK-WG I法のグローバルな繰り返しによる同定結果の収束過程を示した。図-4より、EK-WG I法のグローバルな繰り返しにより安定した同定結果($\hat{h}_0=0.0558$, $\hat{\omega}_0=9.334$ rad/sec)が得られていることがわかる。

Table 1. Initial Conditions for Linear Model

Initial Conditions	X_1	X_2	X_3	X_4	$X_5(=h_0)$	$X_6(=\omega_0)$
$\hat{X}(t_0/t_0)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	15.0
$P(t_0/t_0)$	1.0	1.0	1.0	1.0	100.0	100.0

Note: Covariance of V=100.0, ω_0 : rad/sec

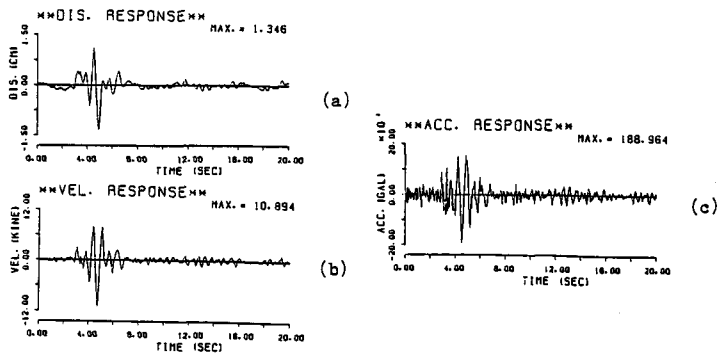


Figure 3. Response Time Histories

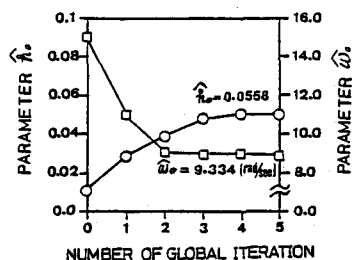


Figure 4. Convergency Process in Number of Iterations

次に第二段階では、第一段階で同定した結果 ($\hat{h}_0=0.0558$ および $\hat{\omega}_0=9.334$ rad/sec) を固定し、同定を行う。また、今回用いた観測記録では、地盤が非線形的な挙動を示したのは非常に短い間と思われるので、強度および剛性の劣化に関するパラメータについては省略することとした。つまり構造系の強度および剛性の劣化を示すパラメータ (δ_A 、 δ_V および δ_η) を0.0として固定する。従って、同定するパラメータは劣化を伴わない場合の非線形性状を表現する $X_7(=\beta)$ および $X_8(=\gamma)$ である。また、同定に際して、パラメータ n の値は1.0として与えた。表-2には、同定に用いた初期条件を示した。

図-5には、EK-WGI法のグローバルな繰り返しによる同定結果の収束過程を示した。さらに、図-6(次項)には、一回目および五回目のEK-WGI法によるグローバルな繰り返し時に同定された復元力特性： $(\hat{u}(t) \sim \hat{\phi}(u(t)))$ の経時変化、さらに(1)式： $(\phi(u(t)) = (-\ddot{f}(t) - \ddot{u}(t) - 2h_0\omega_0\dot{u}(t)) / (\omega_0^2))$ を基に、図-3に示した観測データを用いて計算した復元力特性の経時変化を示した。

図-6より、同定された復元力特性は、線形的な挙動を示すものであると言える。また、図-6(a)に示した復元力特性はノイズを含んだ応答波形から算出されたものであることを考慮すれば、本手法により同定された復元力特性は、ノイズの影響を除去した真の地震時復元力特性に近いものであると思われる。

Table 2. Initial Conditions for Nondegrading Model

Initial Conditions	X_1	X_2	X_3	X_4	$X_5(=h_0)$	$X_6(=\omega_0)$	$X_7(=\beta)$	$X_8(=\gamma)$	$X_9(=\delta_A)$	$X_{10}(=\delta_V)$	$X_{11}(=\delta_\eta)$
$\hat{X}(t_0/t_0)$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0558	9.334	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$P(t_0/t_0)$	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	5.0	5.0	0.0	0.0	0.0

Note: Covariance of $V=100.0$, ω_0 : rad/sec

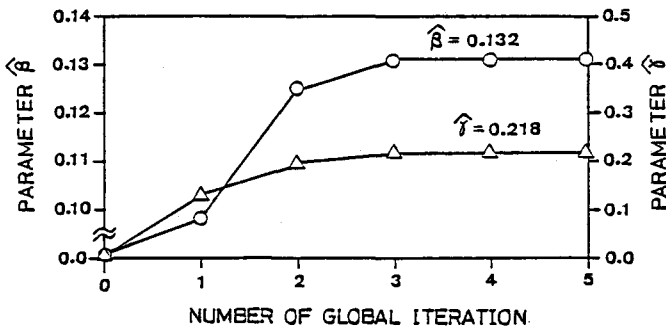


Figure 5. Convergence Process in Number of Iterations

4. まとめ

本研究は、基盤に対する地震入力波形と地表での応答波形を観測データとして得たときに、その表層地盤系の地震時非線形特性を同定したものである。解析手法は、拡張カルマンフィルタアルゴリズムに重み付きグローバルな繰り返しを併用したEK-WGI法を用い、状態方程式および観測方程式は、構造系の基本運動方程式にBoucおよびWenの提案する多面型の復元力特性モデルを用いて定式化した。その結果表層地盤系の地震時非線形挙動を精度良く同定することができた。

今後本手法は、種々の地盤から得られた強震記録の蓄積により、地盤の強震時に於ける非線形性状のモデル化および地盤の液状化の過程における非線形復元力特性の把握などに、有効な手段となるものと思われる。

最後に千葉県中部地震の解析を行う上で、清水建設(株)田蔵 隆氏および技術研究所振動グループの方々の協力を得た。記して深謝の意を表します。

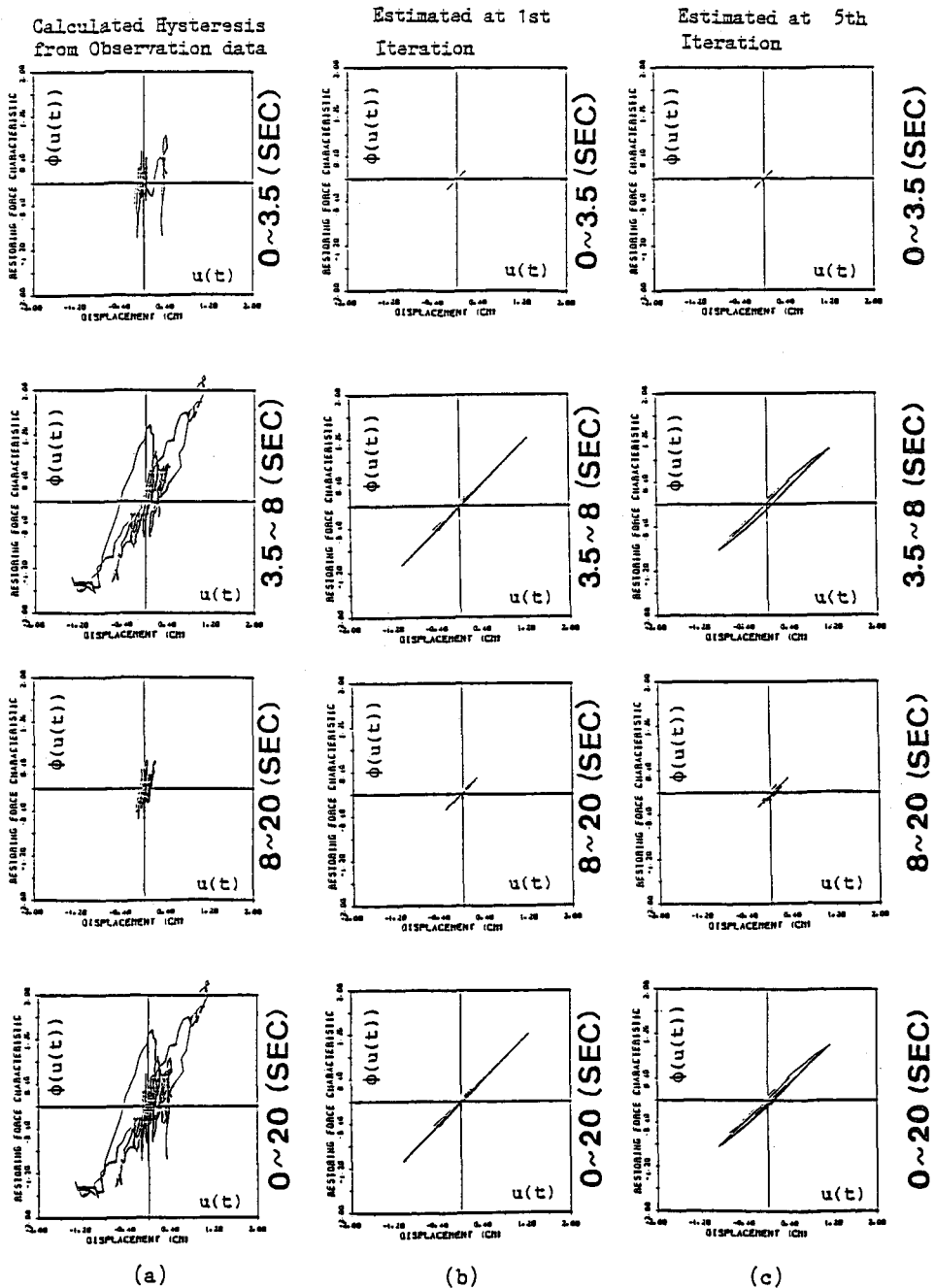


Figure 6. Estimated Hysteresis Restoring Force Characteristics

参考文献

1. Hoshiya, M., 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.
2. Baber, T. T., and Wen, Y. K., Random Vibration of Hysteretic Degrading System, Jour. of Eng. Mech. Vol. 107, No. EM6, ASCE.
3. 後藤、亀田ほか、デジタルフィルターによるSMAC-B2加速度計記録の補正について、土論集、No. 277 pp. 57-69, 1978年9月。