震動系の非線形復元力に関する研究

京都大学防災研究所　正　員　土岐　憲三
京都大学防災研究所　正　員　佐藤　忠信
京都大学防災研究所　正　員　清野　純史
京都大学大学院　学生員　○吉澤　睦博

1.はじめに　非線形な復元力特性に関しては、対象とする構造系あるいは構造部材の特性を的確に表現できるようにこれまで数多くのモデルが提案されている。本研究ではWenらが提案したVersatile型モデルとRamberg-Osgoodモデルを用いて震動系の非線形な履歴復元力を表現し、これらを拡張カルマンフィルターに適用できるように定式化する。そして実験記録を用いてモデルの有用性を検証する。

2.非線形復元力モデル　非線形復元力は変位との関数で表されるが、ここでは次式で与えられる2つの復元力モデルを考える。　i)Versatile型モデル $\frac{dZ}{dt} = -\alpha \mid \frac{dy}{dt} \mid\mid Z^{n-1} \mid Z - \beta \frac{dy}{dt} \mid Z^n \mid + K\frac{dy}{dt}$　(1)

α, β, n :パラメータ

ii)Ramberg-Osgoodモデル

骨格曲線上 $\frac{y}{y_y} = \frac{Z}{Z_y} + \alpha \left(\frac{Z}{Z_y}\right)^\gamma$　(2)　履歴曲線上 $\frac{y - y_0}{2y_y} = \frac{Z - Z_0}{2Z_y} + \alpha \left(\frac{Z - Z_0}{2Z_y}\right)^\gamma$　(3)

y_y : 基準化変位, Z_y : 基準化復元力, α, γ : パラメータ　y_0 : 最新の反転値の変位, Z_0 : 最新の反転値の復元力

Versatile型モデルは式(1)より、履歴は速度の符号が等しければ復元力の値の等しい点において同じ剛性をもち、またz=0であれば初期剛性が維持されることがわかる。Ramberg-Osgoodモデルの構成式は式(2)および式(3)に示されるようにzの奇数次の代数方程式であるため厳密解は求めにくく、逐次近似計算を要する。モデルは骨格曲線と履歴曲線から成り、履歴法則である反転乗り移り法則により支配される。

3.拡張カルマンフィルターへの定式化　簡単のため非線形1自由度振動系における定式化について以下に述べる。状態ベクトルに組み込むパラメータは、加速度、速度、変位、復元力、質量、粘性減衰、剛性、各モデルのパラメータである。これらを非線形離散型システムに組み込むには、モデル式を離散システムとして表現するために時刻t+1の復元力を変位のまわりにTaylar展開する。高次までTaylar展開する程、かえって2乗誤差を含んでしまう場合も存在するので1次までを考慮してモデル化を行い、システムノイズ　を付加することによって状態方程式を定義すると次式を得る。

i)Versatile型モデル　$z_{t+1} = z_t + (\gamma z_t + k)(y_{t+1} - y_t) + \omega_t$　(4)　ただし $\gamma = \pm\alpha\pm\beta$

ii)Ramberg-Osgoodモデル

骨格曲線 $z_{t+1} = z_t + \frac{z_y}{y_y}\frac{y_{t+1} - y_t}{1 + \alpha\gamma(\frac{z_t}{z_y})^{\gamma-1}} + \omega_t$　(5)　履歴曲線　$z_{t+1} = z_t + \frac{z_y}{y_y}\frac{y_{t+1} - y_t}{1 + \alpha\gamma(\frac{z_t - z_0}{2z_y})^{\gamma-1}} + \omega_t$　(6)

また線形加速度法と運動方程式より次の3つの基本式が得られる。

$$\dot{y}_{t+1} = \dot{y}_t + \frac{\Delta}{2}(\ddot{y}_t + \ddot{y}_{t+1}) \quad (7)$$

$$y_{t+1} = y_t + \Delta\dot{y}_t + \frac{\Delta^2}{3}\ddot{y}_t + \frac{\Delta^2}{6}\ddot{y}_{t+1} \quad (8)$$

$$m\ddot{y}_{t+1} + c\dot{y}_{t+1} + z_{t+1} = -m\ddot{u}_{t+1} \quad (9)$$

式(4)～(9)を解き拡張カルマンフィルターの定式化に従い状態遷移マトリクスが求められる。そこで非線形1自由度振動系の正弦波入力の応答を求め、この応答波形を観測データとして系の同定を行った。結果としてはVersatile型モデルはかなり同定精度がよいが、Ramberg-Osgoodモデルは剛性がかなり小さく見積られてしまった。原因としては状態遷移マトリクスが複雑なこと、粘性、剛性およびαが負になってしまうことがあげられる。これに対処するために観測更新後においても状態量を更新することが考えられる。

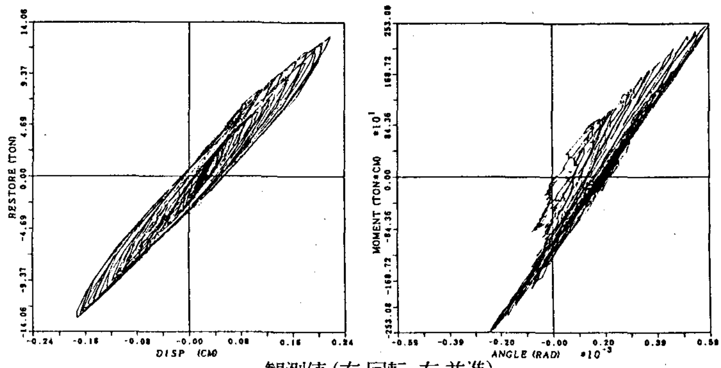
4.実験データを用いた非線形復元力の同定　近年、地盤-構造物系の非線形応答解析を行うハイブリッド実験システムが開発され、ほぼ実物大の試験体を用いて行っている。そこで杭基礎のハイブリッド実験により得られたデータから3.で展開した同定手法により非線形復元力特性の同定を行った。復元力モデルは、

Kenzo TOKI. Tadanobu SATO. Junji KIYONO. Mutuhiro YOSIZAWA

Versatile型モデルを用い、試験体は並進・回転の連成系とした。なお入力波形はスイープ波形である。結果を図-1に示す。回転のモーメントが大きく見積られているがこれは硬化型の履歴形状に同定されたためと考えられる。今回の同定では拡張カルマンフィルターのアルゴリズムを初期値に重みをつけて繰り返すEK-WGI法を用いてパラメータ収束の改善を図ったが、長いステップでフィルタリングを行うと状態量の変化に更新が追従出来ない場合がある。そこでこれを改良するために短いステップで同様の同定を行い最適推定値を決定することを試みた。0〜3秒のデータをもとにしたのが図-2であり概ね同定ができている。

5.まとめ　同定問題においてVersatile型モデルは履歴法則が簡単であり適用がし易い。しかし硬化型の履歴を示すこともあり実験現象に合わない同定を行う可能性もある。Ramberg-Osgood型モデルは履歴法則およびモデルの構成式が複雑であり適用が難しい。しかし履歴形状は常に軟化型を示すなどの特徴があり、Ramberg-Osgoodモデルの適用が今後の課題である。またカルマンフィルターによるパラメータ同定の精度をあげる方法としてフィルタリング区間を区切ることが提案できる。

参考文献 1)Wen:Metod for Randam Vibration of Hysteretic Systems, Jounal of the engineering mechanics division, Vol102, No.EM2 1976
2)土岐憲三・佐藤忠信・清野純史・市原和彦:地盤―構造物系の非線形復元力特性の同定, 京都大学防災研究所年報 No.31 B-2 1988



観測値(右:回転, 左:並進)

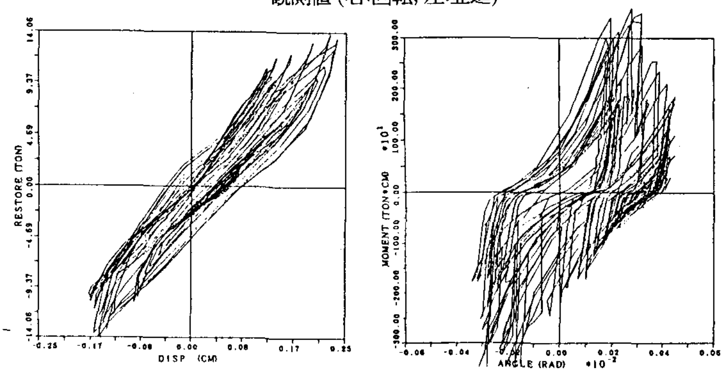
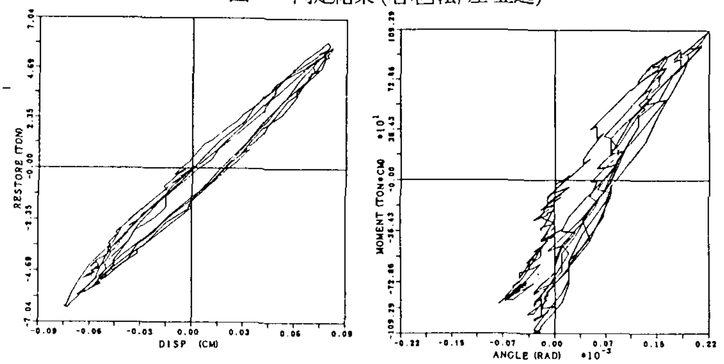


図-1　同定結果(右:回転, 左:並進)



0〜3秒の観測値(右:回転, 左:並進)

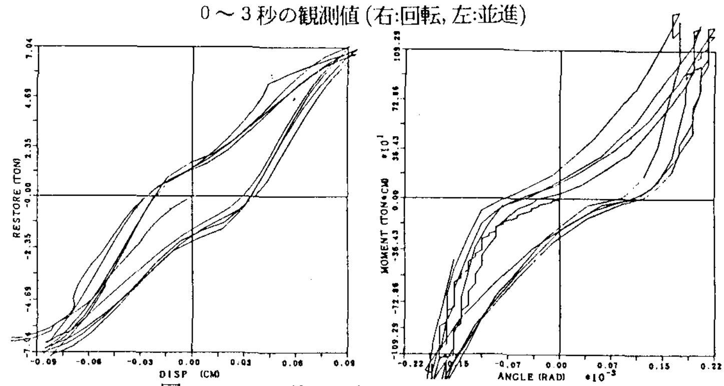


図-2　0〜3秒の同定結果(右:回転, 左:並進)