

I-506 強度の非線形性を示す構造系の同定

武威工業大学 正会員 丸山 収
武威工業大学 正会員 星谷 勝

1. はじめに

既存構造物の維持管理の必要性が強く認識されるようになり、健全度評価に関する研究が盛んに行われている。一方、既存構造物の健全度を評価するうえで、重要となるパラメータ同定手法の研究も盛んに行われている。このような背景のもとで、著者らは自ら提案するEK-WGI法^{1,2)}を用いて、動的な入力を受けるバネ二重型復元力特性の同定¹⁾、さらに強度および剛性の劣化を伴う非線形構造系の同定²⁾に関する研究を行ってきた。

最近、構造系のシステム同定に関係する研究者の間では、完全弾塑性に近い挙動を示す構造系の復元力特性同定の可能性についての議論がなされている²⁾。そこで本研究は、(1)強い非線形性を示すバネ二重系の構造同定の可能性を検証すること。また、(2)拡張加減振フィルタを適用する場合のノイズは、ガウス白色雑音とする前提があるが、観測データに含まれるノイズの性質が同定結果に及ぼす影響について検討を加えること。以上、2つの目的で行われたものである。

2. 観測データの作成

本研究で採用する1自由度非線形構造系の基本運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{u}(t) + 2\beta_0 \omega_0 \dot{u}(t) + \omega_0^2 \Phi(u(t)) = -\ddot{f}(t) \quad (1)$$

ここで、 β_0 ：粘性減衰定数、 ω_0 ：微小線形振動時の固有円振動数、 $\Phi(u(t))$ ：バネ二重型復元力特性
 $\ddot{f}(t)$ ：入力加速度、 $u(t)$ ：相対変位応答である。

ここで、シミュレートした応答波形には、(CASE-1)構造系固有の固有振動数を含んだ周波数帯域 0.1~10(Hz)のガウス白色雑音を加えた。また、(CASE-2)CASE-1のガウス白色雑音を非線形関係式： $g(x)=x^3$ により非ガウス性に変換したものをノイズとして加えた。以上、2つの応答波形を解析に用いた。

また、付加するノイズの観測データに対する比率： ν は次式で定義した。

$$\nu = \frac{\sum V(t)^2}{\sum u^*(t)^2} \times 100.0 \quad (\%) \quad (2)$$

ここで、 $V(t)$ ：ノイズの時刻： t での値、 $u^*(t)$ ：応答波形の時刻： t での値である。

ノイズの作成は、まず0.1~10(Hz)で一様のパワー（レベル： $S_0=1\text{cm}^2\cdot\text{sec}$ ：変位のとき、レベル： $S_0=1\text{cm}^2/\text{sec}$ ：速度のとき）のワースペクトルに基づき1つのサンプル波形： $V^*(t)$ をつくる。次に任意の比率： $\nu(\%)$ に対して、 $V^*(t)$ の振幅を $\sqrt{(\nu \sum u^*(t)^2 \times 0.01) / (\sum V^*(t)^2)}$ 倍に修正して $V(t)$ を作成した。したがって、 $\nu(\%)$ のノイズを含んだ応答波形は、 $u(t)=u^*(t)+V(t)$ （変位の場合）となる。

応答計算は線形加速度法で行い、付加するノイズはCASE-1およびCASE-2共に、 $\nu=0\%$ から1%刻みで10%まで考慮することとした。さらに、応答計算の際に用いた構造系の諸元は、 $\beta_0=0.05$ 、 $\omega_0=12.56(\text{rad/sec})$ 、降伏変位： $X_e=0.3(\text{cm})$ 、弾塑性傾斜率： $\alpha=0.1$ および時間刻み： $\Delta t=0.01(\text{sec})$ とした。図-1には、入力波形および $\nu=5\%$ (CASE-1)のノイズを含んだ変位応答波形および速度応答波形を示した。図-2には、構造系の真の復元力特性と図-1に示した入力および応答波形、さらに既知の構造系の諸元を用いて1式より：

$\Phi(u) = -[\ddot{u}(t) + 2\beta_0 \omega_0 \dot{u}(t) + \ddot{f}(t)] / \omega_0^2$ をもとに算出した復元力特性を示した(CASE-1： $\nu=5\%$)。

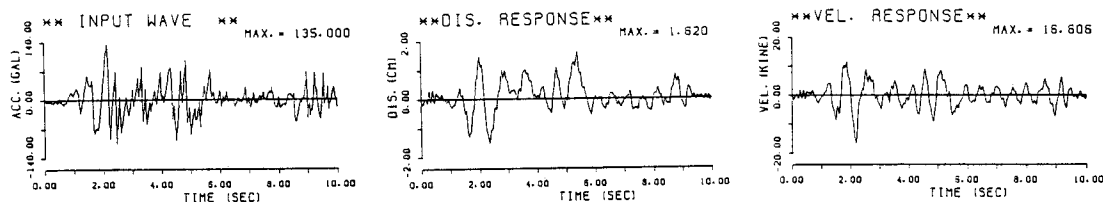


図-1. 入力および応答波形 (CASE-1: $\nu=5\%$)

3. 復元力特性の同定

本研究で採用する同定手法は、星谷・斉藤¹⁾の提案するEK-WGI法である。また、同定に際して拡張カルマンフィルタのアルゴリズムの状態方程式および観測方程式は、星谷ら¹⁾による定式化をもとに作成した。

図-3には同定すべきパラメータのうち、降伏変位: X_e および弾塑性傾斜率: α のEK-WGI法による同定結果を、付加するノイズ²⁾の比率を示標として示した。さらに図-4には、(CASE-1)でノイズレベル: $\nu=5\%$ の場合にEK-WGI法の1回目と10回目のグローバルな繰り返し時に同定された復元力特性: $\hat{u}(t) \sim \hat{\phi}(t)$ を示した。ここで、図-4に示した復元力特性の同定結果において、弾性領域から塑性領域の移行または塑性領域から弾性領域の移行が時刻 $t_k = \Delta t \cdot k$ から $t_{k+1} = \Delta t \cdot (k+1)$ の間で起こると、データの時間刻み内の制御は考えていないので、同定を精度良く制御できないために(Λ)状の復元力特性を示すこととなる。

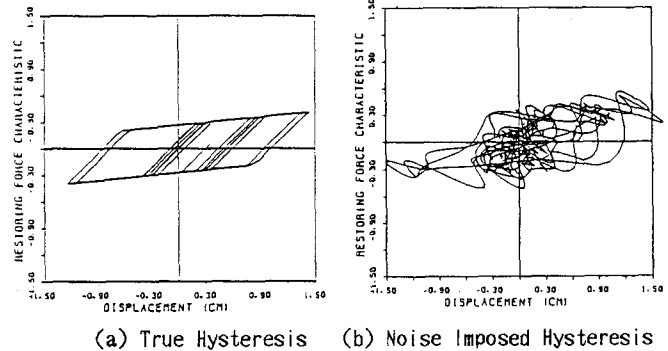


図-2. 復元力特性

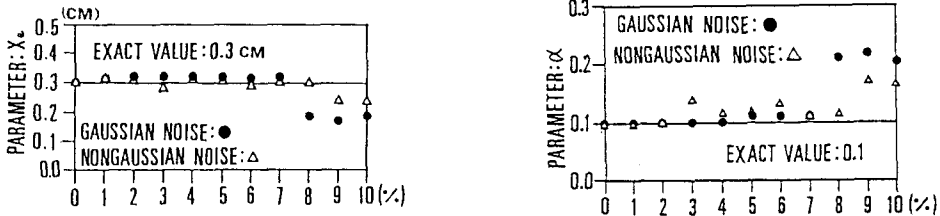


図-3. パラメータ: X_e および α の同定結果

図-3より、7%程度までのノイズについては、精度良い同定が可能であることが明かとなった。今回行った数値計算結果ではガウス性(CASE-1)、非ガウス性(CASE-2)のノイズの性質が、同定結果に与える影響については、明確な結論は得られなかった。また、図-2(b)に示したように、 $\nu=5\%$ (CASE-1)の場合において観測データから直接計算した復元力特性は非常に乱れたものとなっているが、EK-WGI法による同定結果(図-4(b))は、塑性領域の挙動も正確に表現しており、EK-WGIのグローバルな繰り返しの有効性が確認できた。また付加するノイズの性質について、(1)ガウス性の白色雑音については、観測データに $\nu=7\%$ 程度含まれていても、復元力特性の同定が可能であることが明かとなった。その際、観測データから直接求めた復元力特性から判断して、得られた結果は十分なものと思われる。(2)非ガウス性のノイズについては、さらにノイズの分布形状等も考慮した検討が必要である。

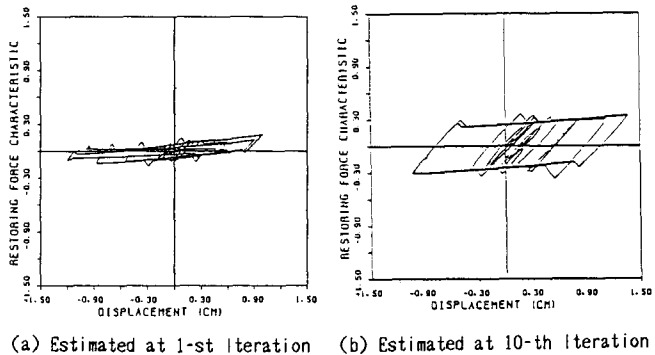


図-4. 復元力特性の同定結果

法による同定結果(図-4(b))は、塑性領域の挙動も正確に表現しており、EK-WGIのグローバルな繰り返しの有効性が確認できた。また付加するノイズの性質について、(1)ガウス性の白色雑音については、観測データに $\nu=7\%$ 程度含まれていても、復元力特性の同定が可能であることが明かとなった。その際、観測データから直接求めた復元力特性から判断して、得られた結果は十分なものと思われる。(2)非ガウス性のノイズについては、さらにノイズの分布形状等も考慮した検討が必要である。

- 参考文献(1)M.Hoshiya and E.Saito, Structural Identification By Extended Kalman Filter, Journal of Eng. Mech., Vol.110, No.12, ASCE, Dec., 1984
(2)M.Hoshiya and O.Maruyama, Kalman Filtering of Versatile Restoring Systems, Proc. of Stochastic Approaches in Earthquake Engineering, US-Japan Joint Seminar, Boca Raton, Florida, May, 1987