

武蔵工業大学 正会員 星谷 勝
武蔵工業大学 学生員 〇山崎見弘

フジタ工業(株) 正会員 斉藤悦郎
武蔵工業大学 学生員 丸山 収

1. はじめに

本研究は、非線形システムの等価線形化を拡張カルマンフィルター^(*)1)を用いて行ない、その可能性を検討したものである。この方法は、拡張カルマンフィルターを同定問題へと拡張し、非線形システム^(*)2)の入力及び出力波形から、そのシステムのパラメータを推定するものである。まず、入力が正弦波、ホワイトノイズにおけるバイリニア系の等価線形化を行ない、過去の研究例と数値的に比較した。次に、非線形非定常システムの^(*)3)液状化を伴う地盤を取り上げ、軟化を考慮した線形モデルにより等価線形化を行ない、その可能性とパラメータ ω_{eq} , β_{eq} の物理的な意味を明らかにした。^(*)4)^(*)5)

2. バイリニア系の等価線形化

1) 入力が正弦波の場合^(*)3)

モデルケースはB9, B7.5, B5 (例えば, B5; $\omega_0 = 2.07$, $X_e = 0.05$, $\alpha = 0.5$) モデルの3ケースとした。拡張カルマンフィルターを用いる際に必要となる支配方程式は、線形1自由度系として組み込み、また、出力波形は応答変位を用いた。次に、入力が正弦波の場合には、図式的に ω_{eq} , β_{eq} を求めることができる(図-1)。

$$\omega_{eq} = \omega_0 \tan \theta \quad (1)$$

$$\beta_{eq} = \beta + \beta_{reg} \quad (\text{ただし, } \beta_{reg} = \frac{1}{4\pi} \frac{dW}{dW}) \quad (2)$$

ここで、 ω_{eq} : 等価固有円振動数 β : 粘性減衰定数

β_{reg} : 履歴減衰定数 β_{eq} : 等価減衰定数

W: 履歴曲線ABDEの面積 ΔW : ΔODX の面積

表-1は、各モデルケースに対して、両方法による ω_{eq} , β_{eq} を比較したもので、ほぼ良い一致を示すことがわかり、本方法の有効性が明らかになった。

2) 入力がホワイトノイズの場合

ホワイトノイズ入力に対するバイリニア系の等価線形化問題は、理論的^(*)4)、実験的な方法^(*)5)を用いて行なわれている(図-2.3)。ここでは、拡張カルマンフィルターを用いた同定結果を同図にプロットしてみた。まず、それぞれの β , α に対して X_e をパラメトリックに変化させ、 ω_{eq} , β_{eq} の同定を行なう。次に、ホワイトノイズを入力とした時の応答波形の2乗平均値を計算した。

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\pi S_0}{2\beta_{eq}\omega_{eq}}}$$

$$\sigma_{\dot{x}} = \sqrt{\frac{\pi S_0}{2\beta_{eq}\omega_{eq}}}$$

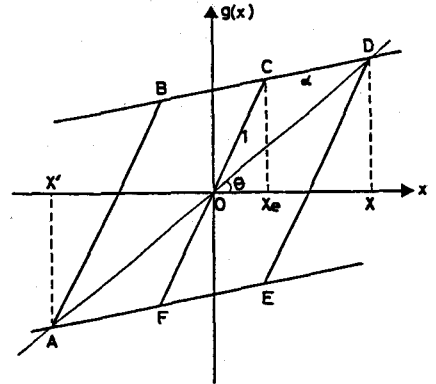


図-1 バイリニア系の復元力特性

表-1 等価線形化の同定結果

パラメータ	モデル	B 9	B 7.5	B 5
同定結果	$\hat{\omega}_0$	6.88	6.77	6.70
	$\hat{\beta}$	0.1157	0.1344	0.1539
式 (1) (2)	ω_{eq}	6.79	6.53	6.34
	β_{eq}	0.1160	0.1366	0.1580

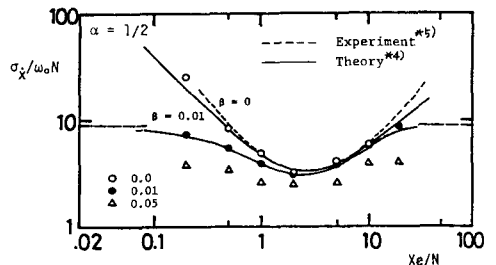
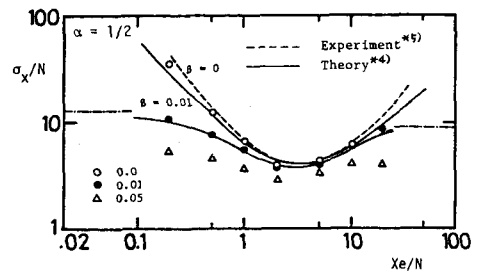


図-2 二乗平均変位及び速度 ($\alpha = 1/2$)

なお、図中の $N = \sqrt{\frac{2S_0}{\omega^3}}$ S_0 : パワースペクトル密度関数
 またここでは、観測波形として応答変位、応答速度波形を用いた。図-2は $\alpha = 1/2$ (緩やかな非線形) のときであり、同定した値が、理論値、実験値と比較的良好一致している。
 また図-3は、 $\alpha = 1/21$ (完全弾塑性に近い非線形系) のときであるが、同定した値が $X_e/N < 1$, $X_e/N > 10$ では理論値、実験値と一致するが、 $X_e/N = 1 \sim 10$ では一致しない。この原因としては、応答パワースペクトル密度がピークを2つ持つ等によるものと思われる。

3. 液状化問題への応用例^{*6)}

観測波形の作成は、Finn^{*7)}の有効応力解析法を用いた。

拡張カルマンフィルターに用いる出力波形は、応答変位、応答速度波形とした。そして、時間軸を区間に分割し、区間内は定常であるものとして、各区間に対して W_{eq} , β_{eq} の同定を行なった。図-4は、Managua Nicaragua $N S$ 成分の入力波形に対する、入力加速度、応答変位、間隙水圧比、

W_{eq} , β_{eq} の経時変化を示したものである。同図より、間隙水圧比の上昇に伴い、 W_{eq} は減少し、 β_{eq} は増加する傾向を示し、液状化発生過程の軟化現象を W_{eq} , β_{eq} を用いて表現できることがわかる。また、間隙水圧比が60%以上になると、応答変位波形は急激に長周期化するとともに、軸ズレ現象も生ずる。この現象は W_{eq} , β_{eq} の急変として表現される。また、同拡張カルマンフィルターを用いて支配方程式を線形に W_{eq} , β_{eq} が変化するものとして同定を行なったが、間隙水圧比が60%以上では同定が不可能となった。次に、間隙水圧比が100%になると W_{eq} , β_{eq} は一定値となった。この現象は、有効応力解析法において、100%以後の応答計算における安定性を保つことで、初期剛性に対して3%の剛性を残して一定にしているためである。この3%は、固有円振動数で5.93 rad/secとなり、同定結果と一致する。なお、60%以上の間隙水圧比以後の応答変位波形には軸ズレが生ずるため、拡張カルマンフィルターに用いる支配方程式にも、この現象を考慮している。以上により、液状化発生過程の複雑な現象を、拡張カルマンフィルターを用いて、 W_{eq} , β_{eq} により表現できることが明らかになった。

*参考文献

- 1) Jazwinski, A.H.: Stochastic Process and Filtering Theory, 1970.
- 2) Carmichael, D.G.: The State Estimation Problem in Experimental Structural Mechanics, Application of Statistics & Probability Soil and Structural Engineering, 3rd, Inter. Conf. 1977. 2.
- 3) 星谷, 奇藤: 拡張カルマンフィルターを用いた同定問題の各種振動への応用, 土論集, 投稿中
- 4) 竹尾: 不規則外力を受ける双一次履歴系の等価線形化について, 土論集, 1973. 11.
- 5) Ivan, W.D.: Response of the Bilinear Hysteretic System to Stationary Random Excitation, Jour. ASA, Vol. 43, No. 3, 1968.
- 6) 星谷, 奇藤: 液状化に伴う地震の等価線形化, 土論集, 投稿中
- 7) Finn, W.D.L.: An Effective Stress Model for Liquefaction Proc. ASCE, Vol. 103, No. GT6, 1977.
- 8) 池田: 液状化に伴う地震応答の等価線形化特性, 武蔵工大土木部, 修士論文 昭和57年度

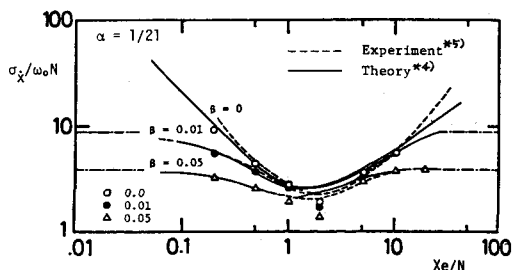
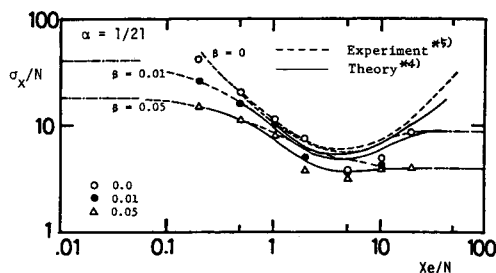


図-3 二乗平均変位及び速度 ($\alpha = 1/21$)

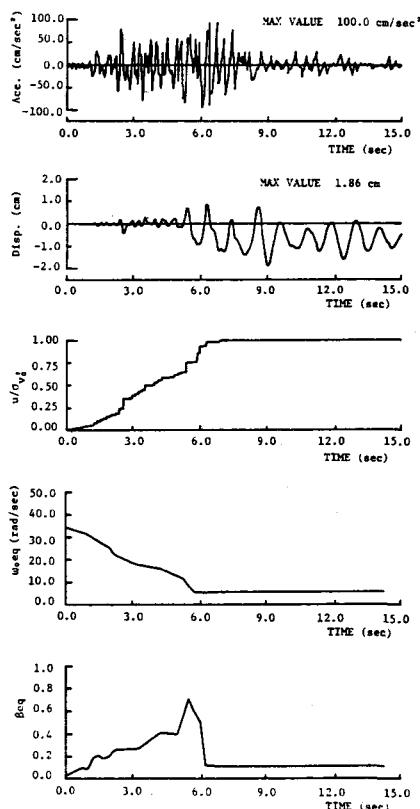


図-4 入力加速度、応答変位、
 間隙水圧比、 W_{eq} , β_{eq} の経時変化