

I-193

地盤の非線形特性のパラメータ同定の基礎的研究

東電設計(株) 正会員 栗田哲史 正会員 吉田郁政 正会員 福井史朗

1. はじめに

地盤の動的変形特性は、通常、不攪乱試料による室内動的試験で求められているが、室内試験に供する試料は各種の乱れが入り込むことから、可能な限り原地盤状態での変形特性の把握が必要である。一方、近年地盤の鉛直アレー観測により強震記録が取得され、貴重なデータの有効活用が望まれる。そこで各種同定手法による地盤特性の同定が行われている。本研究は、**Masing's law**を用いて地盤の非線形性を表し、そのパラメータを拡張**Kalman filter**により推定する手法を提案する。また、簡単なモデルの数値解析によってその有効性を示す。

2. 非線形モデル

非線形モデルは、**Masing's law**と履歴則に従うモデルを用いる¹⁾。せん断ひずみを γ 、せん断応力を τ で表し、骨格曲線が以下のように表現できるとする。

$$\tau = f(\gamma) \quad (1)$$

この関数を奇関数： $-f(\gamma) = f(-\gamma)$ であり

$$\frac{df(\gamma_1)}{d\gamma} \geq \frac{df(\gamma_2)}{d\gamma} \quad |\gamma_1| < |\gamma_2| \quad (2)$$

とする。この時、**Masing's law**は次式のように表される。

$$\frac{\tau - \tau_0}{2} = f\left(\frac{\gamma - \gamma_0}{2}\right) \quad (3)$$

ここで、 (γ_0, τ_0) は骨格曲線の原点(イニシャルポイント)である。

次に、以下の履歴則を設けて非線形モデルを規定する。

履歴則：

- (1) 最初のターニングポイント(ひずみ速度の符号が変化する点)が現れるまで、応力-ひずみ曲線は骨格曲線となる。
- (2) ターニングポイントが現れた後の応力-ひずみ曲線は、**Masing's law**に従う履歴曲線となる。
- (3) 履歴曲線のターミナルポイント(イニシャルポイントが位置する最新の履歴曲線と出会う点)を越えた場合は、1つ前の履歴曲線に従う。

骨格曲線 $f(\gamma)$ は各種の関数が提案されているが、本研究では図-1に示すような任意の線分によって骨格曲線を表す。この線分数を増やせば任意の関数形を近似的に表すことができる。

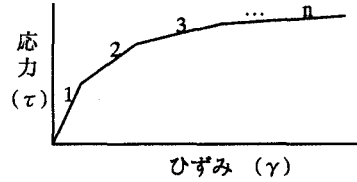


図-1 任意線分で表した骨格曲線

3. 拡張Kalman filterによる同定の定式化

拡張**Kalman filter**によるパラメータ同定の定式化は星谷・斎藤の提案する手法²⁾を踏襲した。但し、非線形応答解析を時間増分領域で定式化したため、状態ベクトル x は変位増分、速度増分で与えた。

$$x = \{ \Delta u, \Delta \dot{u}, s \}^T \quad (4)$$

ここで

Δu : 変位増分ベクトル
 $\Delta \dot{u}$: 速度増分ベクトル
 s : 同定パラメータ

同定パラメータは、せん断剛性の第1勾配から第n勾配までと粘性減衰である。但し、剛性は剛性の値そのものではなく初期剛性 G_0 に対する比を同定するように定式化した。また、勾配の変化点のひずみは既知とした。尚、粘性減衰は履歴減衰を補うものとして考えている。

4. 数値解析結果

解析で対象としたモデルは、図-2(a)に示すような2層地盤であり応力-ひずみ関係は**Tri-Linear**モデルで表されるものとした。地盤の G_t/G_0 - γ 関係を図-3に示す。ここで、 G_t は接線剛性を表している。地盤構造を図-2(b)のように5層に分割してモデル化した。図-2に示した物性と図-3の関係をj用いて線形加速度法により非線形応答解析を行なった。入力波を図-4(a)に、各層の加速度応答波形を図-4(b)に示す。また、応力-ひずみ曲線を図-5に示す。解析は、この時の第1層の加速度応答と入力加速度を観測値として想定し、せん断剛性の G_0 に対する比($G_{t1}/G_0, G_{t2}/G_0, G_{t3}/G_0$)と粘性減衰(h)の同定を行なった。ここで、 G_0 は図-2の V_s と ρ より計算した値である。拡張**Kalman filter**は**On-Line**手法であるが、非線形パラメータの同定は、感度が小さいパラメータが存在するためグローバルな繰返し計算を行ない解の収束性を向上させている。繰返し計算を行なうとき、推定誤差の共分散マトリックスは初期化している。各パラ

メータの収束過程を図-6に示す。ここで、 $G_{t1}/G_0, G_{t2}/G_0, G_{t3}/G_0$ はせん断剛性の各勾配の G_0 に対する比であり、 h は粘性減衰を表している。観測データが第1層の応答のみであるにもかかわらず、3回程度の繰返し計算で真値に収束している。

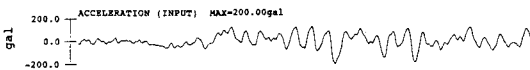
5. おわりに

Masing's lawと履歴則を用いて地盤の非線形特性を表し、拡張Kalman filterを用いてそのパラメータの同定を行なった。数値解析による結果は非常に良好であり、本手法の有効性が確認できた。今後は、アレー観測により得られた実地震のデータを用いて地盤特性の同定を行なって行く予定である。

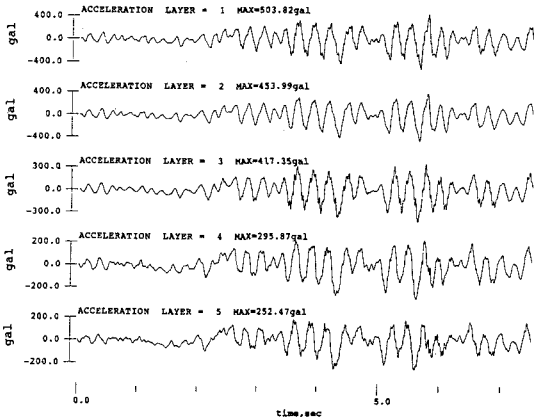
謝辞 本研究を行うにあたり武蔵工業大学の星谷勝教授に多くの御助言を頂いた。末筆ながらここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Ohsaki, Y.: Some Notes on Masing's Law Non-Linear Response of Soil Deposits, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B), Vol. XXXV, No.4, 1980.
- 2) 星谷勝・斎藤悦郎: 拡張カルマン・フィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用, 土木学会論文報告集, 第339号, pp.59~67, 1983.



(a) 入力加速度波形



(b) 応答加速度波形

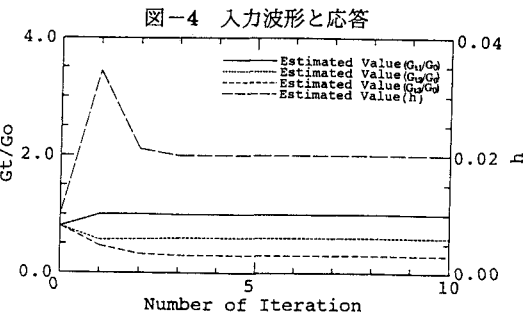
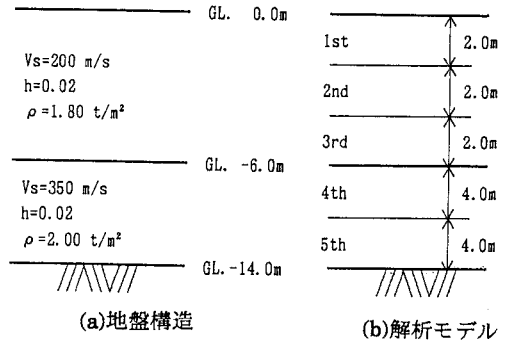


図-6 同定パラメータの収束過程



(a) 地盤構造 (b) 解析モデル
図-2 地盤構造とモデル化

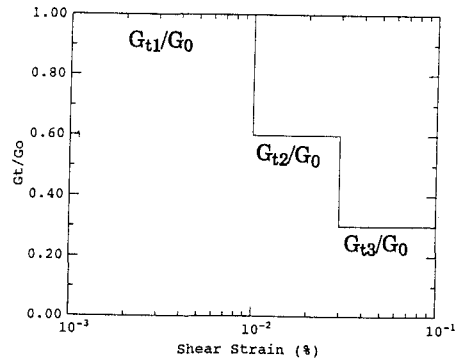


図-3 $G_t/G_0 - \gamma$ 関係

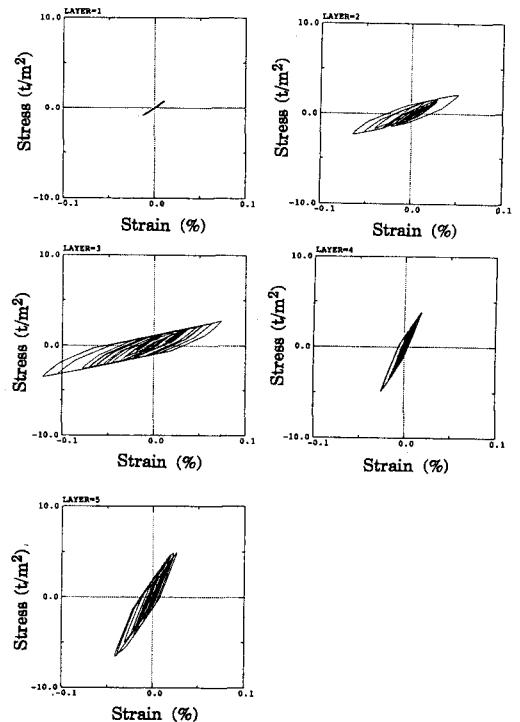


図-5 応力-ひずみ曲線