

徳島大学大学院

学生員○篠原 充

(株)日本構造技術研究所

正会員 原井大輔

徳島大学工学部

正会員 澤田 勉

1. はじめに

本研究は、カルマンフィルタの重み付きローカルな繰り返し法 (EK-WLI 法) を用いた等価線形的同定により、土の非線形履歴復元力を推定し、解析結果よりその妥当性を検証したものである。系の入出力記録には、鉛直アレー観測記録を用いた。

非線形系を等価線形的に同定する方法は、非線形パラメータを直接同定できないという欠点はあるが、手法的には簡単である¹⁾。また、同定された等価線形パラメータを用いることにより履歴復元力特性を間接的に同定できるため、従来の研究に対する補完的な手法として有用であると考えられる。

ところで、EK-WLI 法を用いた 1 自由度非線形系の等価線形的同定において、非線形性を表わすモデルとして Bi-linear モデルを用いた場合に、履歴復元力特性を間接的に推定できることが示されている¹⁾。しかし、実観測記録を用いた本手法による履歴復元力特性の推定は行われていない。

一方、地盤の動特性は非常に複雑であり、未だ説明されていない点が多い。これまでに、土の非線形性を表わすモデルとして、Hardin-Drnevich モデルや Ramberg-Osgood モデルなどが提案されている。しかし、これらが精確に土の非線形性を表わしているとは言い難い。したがって、本手法により、強震動鉛直アレー観測記録を用いて、地盤の履歴復元力特性を推定できるか否かを検討することは、重要である。

このような観点より、本研究では、EK-WLI 法を用いた 1 自由度非線形系の等価線形系の同定手法を実地盤に適用させ、強震動鉛直アレー観測記録を使用して、土の非線形履歴復元力特性の推定を行い、本手法の妥当性を検討する。

また、兵庫県南部地震により液状化した、神戸ポートアイランドの鉛直アレー観測記録を用いて、液状化時における土の非線形履歴復元力特性の推定を行う。

2. 同定の手順

本研究は、土の非線形履歴復元力を推定するため、観測記録として鉛直アレー観測記録を用いる。これは、地盤中に深度方向へ鉛直に設置された地震計により、同時観測された絶対加速度記録である。図 1 に同定の手順を示す。まず、鉛直アレー観測記録が得られる地盤 (アレー観測地盤) をモデル化する。アレー観測記録の地表から②番目の記録を入力し、①番目の記録を応答とすることにより、1 自由度系とみなすことができる。また、非線形性を示す動特性を等価的に線形とすることにより、同定モデルは (b) に示す 1 自由度等価線形系とする。同定モデルである等価線形系の運動方程式から状態方程式を作成し、また、観測記録から観測方程式を作成する。そして、これら 2 つの方程式を用いて EK-WLI 法により同定を行う。これにより、等価線形パラメータが推定されるが、等価線形的な同定では、非線形パラメータを直接推定することができないため、等価線形パラメータを用いて土の非線形履歴復元力特性を推定する。

3. EK-WLI 法

非線形系の同定では、パラメータの時間変動に追従することが必要である。ここでは、その追従性を

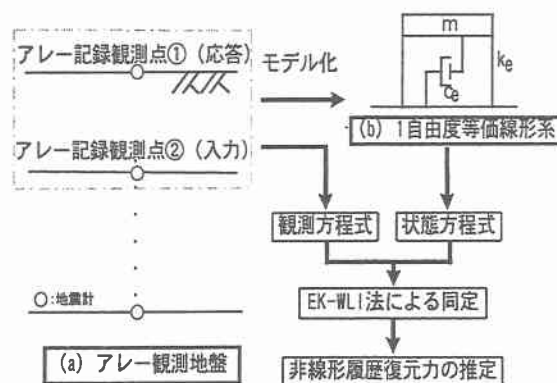


図1 同定の手順

有する，カルマンフィルタの重み付きローカルな繰り返し法（EK-WLI 法）について述べる．

一般のカルマンフィルタによる推定値は，時間が経過するとパラメータが一定値に収束するため，非線形性によるパラメータの時間変動に追従できない．そこで，各時刻でのローカルな繰り返しに重みを導入し，パラメータの非線形性に対する追従性を改善したものが，EK-WLI 法である．

以下では，EK-WLI 法の適用法について説明する．

時刻 $k+1$ におけるカルマンフィルタのローカルな繰り返しを考える．時刻 k での状態量 $X(k)$ とその誤差共分散行列 $P(k)$ が既知であるとき，時刻 $k+1$ での状態推定量 $X(k+1)$ は次のようにして求められる．

① 拡張カルマンフィルタを用いて，時刻 $k+1$ での状態推定量 $X'(k+1)$ とその誤差共分散行列 $P_1(k+1)$ を求める．

② 得られた $P_1(k+1)$ に重み r を乗じて誤差共分散行列を修正する．

③ 上で求めた $X'(k+1)$ と $P(k+1)$ を用いて，図 2 に示すように，時刻 $k+1 \rightarrow k+m+1 \rightarrow k-m+1 \rightarrow k+1$ の順に拡張カルマンフィルタを用いて，各時刻での最適状態推定量とその誤差共分散行列を求めていく．

④ 過程③を n 回繰り返し，最終的に時刻 $k+1$ での最適状態推定量 $X(k+1)$ とその誤差共分散行列 $P(k+1)$ を得る．

以上のローカルな繰り返し過程における重み： r ，解析データ数： m ，およびローカルな繰り返し数： n を適切に設定すれば，非線形性に対する同定パラメータの追従性が良くなり，精度の良い履歴復元力特性の推定が行える．

4. 解析条件および同定結果

本研究で用いた鉛直アレー観測記録²⁾の諸元を，表 1 に示す．SKN26 は東京大学生産技術研究所（千葉実験所構内観測点）の記録であり，KBP は兵庫県南部地震における神戸ポートアイランドの記録である．

これら，2 つの記録を用いて得られた履歴復元力の同定結果を図 3 に示す．

SKN26 では，地盤が硬く変位量も小さいため，ほとんど線形的な履歴復元力曲線が得られた．

KBP については，液状化による非線形な履歴復元力曲線が得られた．

表 1 対象地震の諸元

地震名	マグニチュード	最大加速度(gal)	地盤
SKN26	6.7	240.24	硬い
KBP	7.2	341.22	液状化

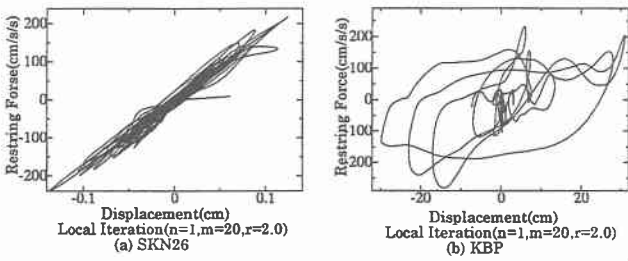


図 3 履歴復元力の同定

5. おわりに

本研究で得られた結果を要約すれば，以下のようになる．

- 1) EK-WLI 法を用いた等価線形的同定により，土の非線形履歴復元力特性を推定することは可能である．
- 2) EK-WLI 法の各パラメータを適切に与えることにより，土の非線形に対する追従性が改善され，その履歴復元力特性を精度よく推定することができる．

参考文献

- 1) 澤田・原井・平尾・成行・辻原：カルマンフィルタにおける非線形 1 自由度系の等価線形的同定法，応用力学論文集，Vol. pp.99-108，1998．
- 2) （財）震災予防協会：強震動アレー観測記録データベース，No.1,1993，No.2,1995．