

京都大学防災研究所 正 員 佐藤忠信
 京都大学大学院 学生員 ○菊川雅士

1. 概説

従来、集中質点モデルにモデル化される多層構造物の場合、その運動方程式は、任意の階についての応答が、地震外力による慣性力、及びその階とその上下の階の状態の影響のみを受けるものとして表現されている。従って、構造物の運動方程式をそのまま適用するだけでは構造形式や地盤の影響を考慮することができず、構造物についての正確な力学モデルを構築することができない。本研究ではモデルの構造を支配している運動方程式に着目し、任意の階の応答が系全体の影響を受けるものとして、観測データから粘性減衰係数、及び剛性の同定を行い、応答の再現を行う。同定の際用いる手法としては、学習則としてカルマンフィルターを適用したニューラルネットワーク理論を用いている。

2. 解析手法

学習則にカルマンフィルターを適用したニューラルネットワークの学習アルゴリズムは以下になる。

- (1) 時刻 t の設定
- (2) 重み係数ベクトルの推定値の計算

$$\mathbf{W}_{t/t-1} = \mathbf{I} \mathbf{W}_{t-1}$$
- (3) 推定誤差の共分散マトリックスの計算

$$\mathbf{P}_{t/t-1} = \mathbf{I} \mathbf{P}_{t-1}$$
- (4) カルマンゲインの計算

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t/t-1} \mathbf{H}_t^T (\mathbf{H}_t \mathbf{P}_{t/t-1} \mathbf{H}_t^T + \mathbf{R}_t)^{-1}$$
- (5) 重み係数ベクトルの更新

$$\mathbf{W}_t = \mathbf{W}_{t/t-1} + \mathbf{K}_t (\mathbf{y}_t - \mathbf{H}_t \mathbf{W}_{t/t-1})$$

- (6) 推定誤差の共分散マトリックスの更新

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_{t/t-1} - \mathbf{K}_t \mathbf{H}_t \mathbf{P}_{t/t-1}$$

- (7) 時刻を $t+1$ に更新し手順 (2) にもどる。

$\mathbf{H}_t$ 、 $\mathbf{y}_t$ は教師信号、 $\mathbf{W}_t$ は重み係数ベクトル、 $\mathbf{P}_t$ は重み係数の推定誤差の共分散、 $\mathbf{R}_t$ は測定誤差の共分散である。

3. 運動方程式同定

本研究では、図1に示す線形8自由度モデルを対象に、得られた観測データを用いてモデルを支配している運動方程式を同定しその応答を再現することを目的としている。線形8自由度モデルの運動方程式は任意の階の応答が系全体の影響を受けるものとするとき次式のように表現される。

$$\ddot{\mathbf{x}}_i = \sum_{j=1}^8 a_{ij} \mathbf{x}_j + \sum_{j=1}^8 b_{ij} \dot{\mathbf{x}}_j + c_i \ddot{\mathbf{x}}_0$$

同定を行う際に必要となる観測データを得るため、モデルにEl Centro地震観測記録を入力し応答計算を行う。こうして得られた観測データを教師信号として図2に示すニュー

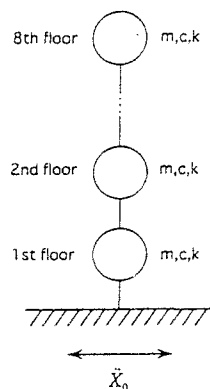


図1 線形8自由度モデル

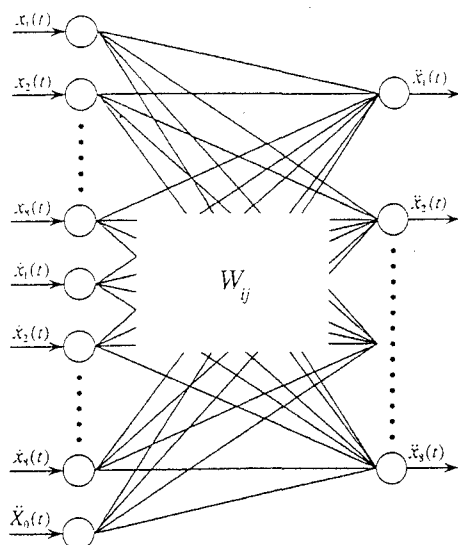


図2 ニューラルネットワークモデル

ラルネットワークに与え、運動方程式を支配するパラメーター a_{ij} 、 b_{ij} 、及び c_i をネットワークの重み係数として学習させる。

4. 解析結果及び考察

観測値として得られる加速度応答にその最大値の10%にあたるホワイトノイズを混入して学習を行った。各時刻の重み係数の同定値を用いて応答を再現したものが図3であり、上段が8階、下段が4階の応答である。太線が再現波形、細線が教師信号として用いた観測波形を表し、左から変位応答、速度応答、及び加速度応答を表している。

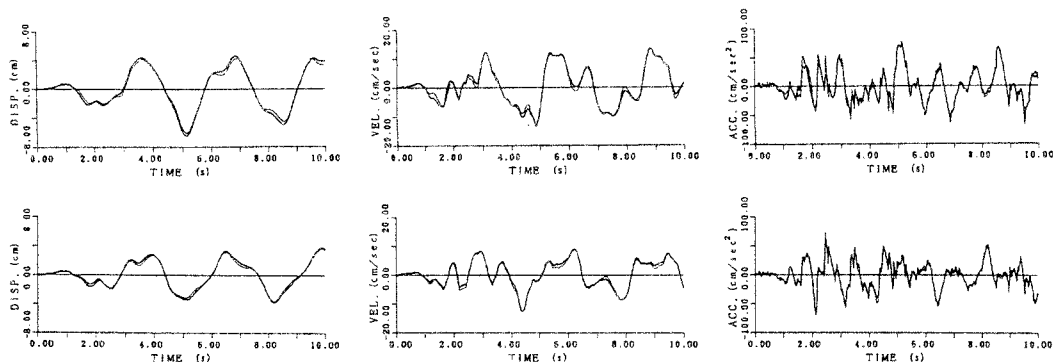


図3 観測波形及び再現波形

実際の観測波形とはほぼ同様の応答を再現することができており、この手法が有効であるといえる。

次に、8階、6階、4階及び2階の観測データが得られた場合について、それら4つの階の変位応答、速度応答、及び加速度応答の相関関係を表す運動方程式の同定を行った。先の場合と同様、加速度応答にはホワイトノイズを混入している。各時刻の重み係数の同定値を用いて、このモデルを観測データが得られた階のみで構成されているとみなし、線形4自由度モデルとして応答を再現したものが図4であり、上段が8階、下段が4階の応答である。太線が再現波形、細線が教師信号として用いた観測波形を表し、左から変位応答、速度応答、及び加速度応答を表している。

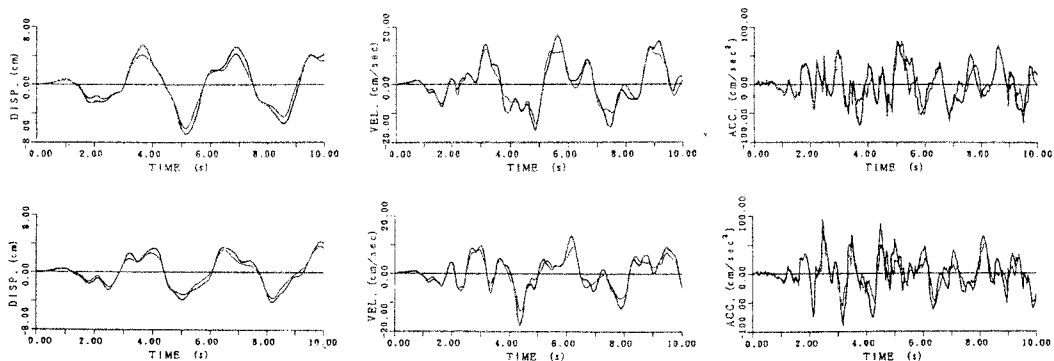


図4 観測波形及び再現波形

本来、質量、剛性、及び粘性減衰係数といったパラメーターを用いて応答計算を行うが、それらを加速度応答に対する変位応答、及び速度応答の影響を表すパラメーターとして捉え、ニューラルネットワークを用いて学習を行うことで、観測データが少ない場合においてもデータの得られた階のみの相関関係を表す運動方程式を同定し、応答を再現することができた。