

I-419

多変数ARモデルを用いた観測波形を含む時空間地震波形

埼玉大学工学部 正会員 川上 英二

東京ガス 正会員 小野 牧夫

1. 目的

トンネル、パイプライン、地中埋設管路等の地震波の伝播に伴う動的応答解析、耐震設計を行う場合、まず、管路・地盤・基盤を力学的にモデル化し、地盤または基盤における地震動を入力する必要がある。地盤または基盤からの地震入力、は、管路に沿った各点で与える必要があり、この各点での変位の時刻歴を、つまり、時空間の関数としての地震波形をどのように想定するかは、管路の応答に支配的な影響を及ぼすため重要な問題である。

このような観点から、著者らは、地中線状構造物に対する地震動の時間のみでなく場所に関する変動、つまり、波の伝播及び波形の変形、を考慮した代表的な、かつ、現実的な地震波形を作るための手法の研究が必要であると考えている。

著者らはこれまでに、二重フーリエ級数を用いる手法^{1) 2)}、従来の多変数の確率過程を拡張する方法³⁾、多入力の線形システムの理論を用いる方法⁴⁾を既に展開している。また、盛川・亀田⁵⁾、丸山・星谷⁶⁾によっても各種方法が提案されている。

本研究は、多地点の地震波形を多変数のAR (autoregressive, 自己回帰) モデルを用いて表す従来の方法をもとに展開したものである⁷⁾。そして、複数の観測記録が与えられている場合を想定し、これら観測記録を含む時空間関数としての地震波形をシミュレートするための手法の開発を目的としている。

2. 方法

地盤の変位を互いに相関を有する複数の確率過程と考える。この時空間確率過程は、次の2つの条件を満たすものと仮定する。

条件(A) : 時空間確率過程の相互相関関数は、想定した相互相関関数に一致する。

条件(B) : 時空間確率過程は、多地点の観測地点においては観測波形に厳密に一致する。

(1) 多変数ARモデルによるシミュレーション

地点 i と時刻 t (ここで、 t は整数としても一般性を失わない。) における地盤の変位は、従来、互いに相関を有する平均値 0 の多変数ARモデル $u_i(t)$ で表されている。

$$u_i(t) = \sum_{p=1}^i \sum_{m=1}^M b_{ip}(m) u_p(t-m) + \varepsilon_i(t) \quad (i=1, 2, \dots, I) \quad (1)$$

ここで、 I は地点数、 $\varepsilon_i(t)$ は誤差波形、 M は多変数ARモデルの次数である。係数 $b_{ip}(m)$ は、ユール・ウォーカー方程式から求めることができる。

(2) 多変数両側ARモデルによるシミュレーション

地点 i と時刻 t (t は整数) における地盤の変位を、平均値 0 の次の時系列モデル $u_i(t)$ で表す。

$$u_i(t) = \sum_{m=-M}^{-1} b_{i,i}(m) u_i(t+m) + \varepsilon_i(t) \quad (2)$$

$$u_i(t) = \sum_{p=1}^{i-1} \sum_{m=1}^M b_{ip}(m) u_p(t+m) + \sum_{m=-M}^{-1} b_{i,i}(m) u_i(t+m) + \varepsilon_i(t) \quad (i=2, \dots, I) \quad (3)$$

式(2)は、従来のARモデルであるが、式(3)は既に計算されている波形 $u_p(t+m)$, ($p=1, \dots, i-1$) については過去の値だけでなく、現在および未来の値をも考慮している。係数 $b_{ip}(m)$ は、式(1)のARモデルの場合と同様に連立一次方程式により求めることができる。

(3) 観測地点では観測記録に一致する時空間地震波形

与えられた K 地点の観測記録を時空間確率過程のサンプルであると考え、(1)、(2)のモデルともに、誤差波形 $\varepsilon_i(t)$ ($i=1, \dots, K$) を作成する過程において、乱数ではなく、観測記録に一致するような値を用いることになる⁷⁾。結局、観測地点において観測記録に一致するという時空間地震波形の条件付シミュレーションを行う場合には、無条件シミュレーションの場合と異なり、条件付シミュレーションが無条件シミュレーションの部分集合となっていることが理解できる。

3. 数値計算結果

観測波形には、Imperial Valley 地震(1940年5月18日、マグニチュード7.1)の El Centroの地点で観測された南北方向の変位記録(最大値 = 10.9 cm)を観測波形として使用した。波形をシミュレートする地点は、地点間の距離が400mで、0km地点から12km地点まで直線上に並んだ合計31地点とした。ここでは、観測地点が3地点(0km地点、6km地点、12km地点)で得られている場合を想定した。

想定した相互相関関数に対し、シミュレートした時空間地震波形を図-1から図-3に示す。観測記録は図中の太線で示している。伝播速度が同じで変形定数が違う波形サンプル(図-1と図-2)を比較すると、波動の伝播に伴う波形の変形の程度が異なっている様子がわかる。また、変形定数が同じで伝播速度が違う波形サンプル(図-1と図-3)を比較すると、波形のピークの伝播の速度が異なっている様子がわかる。さらに、シミュレートした時空間地震波形の相互相関関数は、想定した相互相関関数に近似的なものになった。

以上の数値計算において、シミュレートした時空間地震波形の相互相関関数は、想定した相互相関関数に近似してはいるが一致しているわけでない。設計に用いる時空間波形の作成に当たっては、幾つかのシミュレーションを行い、相互相関関数の近似度の良いものを使用する必要があると考える。

参考文献

- 1)川上:土木学会論文集, No. 410/I-12, 1989.
- 2)川上:第8回日本地震工学シンポジウム, 1990.
- 3)川上・小野:土木学会論文報告集, No. 441, 1992.
- 4)小野・川上:土木学会第47回年次学術講演会, I-636, 1992.
- 5)盛川・亀田:既知波形を含む条件付確率場のシミュレーション理論, 都市耐震センター研究報告, 京都大学防災研究所, 1991.
- 6)丸山・星谷:定常均一場の条件付き地震波動シミュレーション, 土木学会第47回年次学術講演会, I-342, 1992.
- 7)川上・小野:多変数ARモデルを用いた観測記録を含む時空間地震波形のシミュレーション, 埼玉大学建設系研究報告, Vol. 22, 1992.

$$\alpha = 0.2 \times 2\pi$$

$$c = 1000 \text{ m/sec}$$

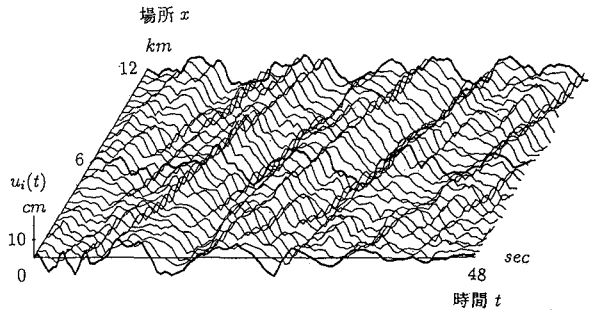


図-1 波形サンプル

$$\alpha = 0.1 \times 2\pi$$

$$c = 1000 \text{ m/sec}$$

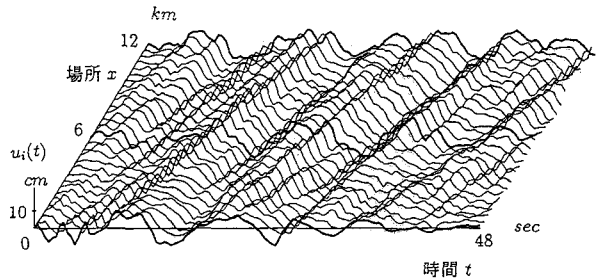


図-2 変形定数を変化させた場合の波形サンプル

$$\alpha = 0.2 \times 2\pi$$

$$c = 2000 \text{ m/sec}$$

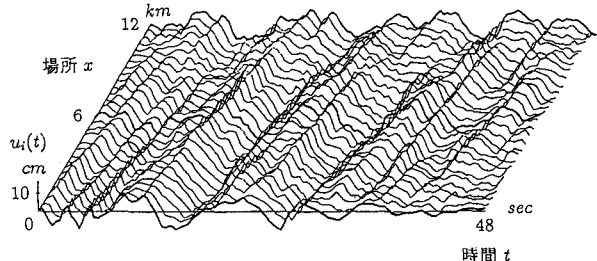


図-3 伝播速度を変化させた場合の波形サンプル