

I-597

一地点の観測記録を含む地震波形の時空間確率過程のシミュレーション

埼玉大学工学部 学生員 小野 牧夫

埼玉大学工学部 正会員 川上 英二

1. 目的

トンネル、パイプライン、地中埋設管路等の地震波動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、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、時間及び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。

波動の水平方向の伝播速度として、地盤のせん断波速度を用いる(石油パイプライン基準)か、アレー観測記録の相互相関関数のピークから求めた値を用いるかでは、値が十倍程度も異なり、構造物の応答が著しく異なる可能性がある。合理的であるという点では、後者の値を用いるのが妥当であるが、従来のように、波形の変形を無視すると、危険な設計を行う可能性がある。

以上のような観点から、著者らは、二重フーリエ級数を用いた、現実的で、波形の変形を考慮した、地中埋設構造物に対する時空間関数としての入力波をシミュレートするための方法を展開している¹⁾。本研究では、より簡便な方法として、二重フーリエ級数の代わりに、従来の多変数の確率過程の理論を拡張する方法を展開し、その適用例を示すことを目的としている。

2. 方法

地盤の変位を、互いに相関を有する複数(m)個の確率過程 $U_i(t)$ (場所 i , 時間 t) で表す。この確率過程は、次の2つの条件を満足するものと仮定する。

(A) 確率過程の自己相関関数(パワースペクトル)は、観測波形の自己相関関数に一致する。この自己相関関数と、波動の伝播速度、波形の変形の程度(コヒーレンシー)とから、相互相関関数(クロススペクトル)を想定する。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。

(B) 一地点の観測地点においては観測波形を厳密に満たす。

本研究では、(A)で与える相互相関関数を、波が正方向にある一定の速度で伝播し、また、二地点間距離が離れる程、相関が減少するような関数とした。また、(B)の条件に関しては、観測波形に一番目の波形 $U_1(t)$ を一致させた。

確率過程 $U_i(t)$ としては、従来²⁾示されている次式を用いた。

$$U_i(t) = \sum_{p=1}^i \sum_{n=1}^N |H_{ip}(\omega_n) \sqrt{\Delta\omega}| \sqrt{2} \cdot \cos\{\omega_n t + \theta_{ip}(n) + \phi_{pn}\} \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

ただし、直流成分は存在しないものと想定している。また、 $\omega_n = 2n\pi/T$ (T は記録の観測時間)である。

$H_{ip}(\omega) \sqrt{\Delta\omega}$ は、(A)で与えるクロススペクトルを成分とするマトリックスを分解して与えられる。また $\theta_{ip}(n)$ は、 $H_{ip}(\omega_n) \sqrt{\Delta\omega}$ の位相角である。

位相角の内、 ϕ_{pn} ($p=2, \dots, m, n=1, \dots, N$) は、 $0 \sim 2\pi$ の範囲で互いに独立な一様乱数とする。一方、 ϕ_{1n} ($n=1, \dots, N$) は、(B)の条件より、まず、観測波形 $F(t)$ を、

$$F(t) = \sum_{n=1}^N \{ a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t) \}$$

とフーリエ級数に展開し、一番目の波形 $U_1(t)$ と比較して、次式のように決定する。

$$\phi_{1n} = \tan^{-1} \left(\frac{-b_n}{a_n} \right) \quad (n=1, \dots, N)$$

3. 数値計算および結果

観測波形としては、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波形を使用した。本方向の加速度記録は、 341.7 cm/s^2 の最大値を示したものであり、El Centro 地震波として、建築物等の動的解析に用いられる代表的な地震波形の一つである。この加速度記録を積分した変位記録も発表されており、本解析では、図-1に示す変位記録(最大値 = 10.9 cm)を観測波形とし、記録長 T を 48 sec として、1 波から29波までのフーリエ級数に展開した。

波形をシミュレートする地点(場所)は、地点間の距離が 400 m で、正負両方向に $\pm 6 \text{ km}$ まで 31個の地点である。波形 $U_i(t)$ の内、 $i=1$ の波形を原点 $x=0$ での観測波形とし、 $i=2, 4, 6, \dots$ を正の地点での波形、 $i=3, 5, 7, \dots$ を負の地点での波形とし、 i が大きくなる程原点から正負交互に遠ざかる地点での波形とした。

数値計算の結果、与えられた観測波形(図-1)と相互相関関数(図-2、波動の伝播速度 = 1000 m/s 、変形定数¹⁾ = $0.2 \times 2\pi$)に対して、時空間関数としての波形をシミュレートすることができた(図-3)。そして、得られた時空間波形が、一地点(図-3太線)においては観測波形(図-1)と一致している事が確認できる。図-3の時空間波形から相互相関関数を、時間差 $-24 \text{ sec} \leq \tau \leq +24 \text{ sec}$ 、2地点間距離 $-6 \text{ km} \leq x_0 \leq +6 \text{ km}$ の範囲で計算した。この時空間波形の一つのサンプルから得られる自己または相互相関関数は、仮定した自己または相互相関関数(図-2)に近似的である。さらに、自己または相互相関関数のアンサンブル平均は、仮定した自己または相互相関関数に一致する事を確認した。

参考文献

- 1) 川上英二: Imperial Valley 地震の観測記録を含む時空間関数としての地震波形のシミュレーション, 第8回日本地震工学シンポジウム, 1990.
- 2) Shinozuka, M. and Jan, C.-M.: Digital simulation of random processes and its applications, Journal of Sound and Vibration, Vol.25, No.1, pp.111-128, 1972.

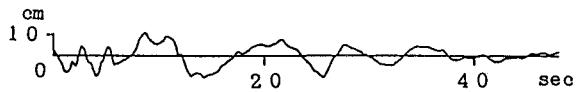


図-1 Imperial Valley 地震(1940)の観測波形

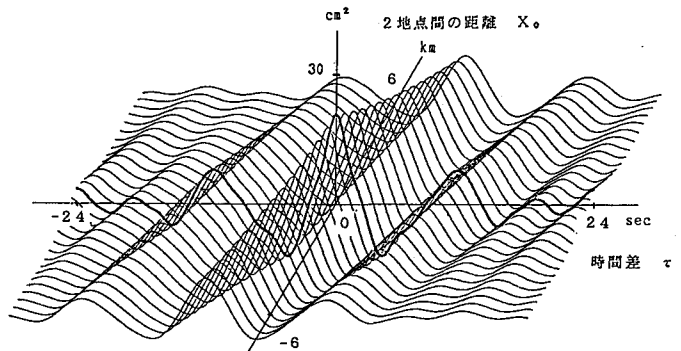


図-2 想定した相互相関関数 $R_{X_T}(x_0, \tau)$

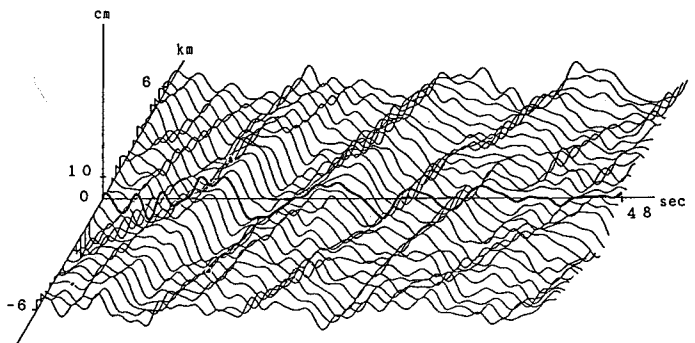


図-3 時空間確率過程 $U_i(t)$ のシミュレーション結果