

埼玉大学工学部建設系研究報告, 第22巻, 1992  
Research Report of Dept. Found. Eng. & Const. Eng., Saitama Univ., 22 (1992).

## 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

川上 英二\*・小野 牧夫\*\*

Conditional Simulation of Space-time Variation of Earthquake  
Ground Motion by Using an Autoregressive Model

Hideji Kawakami and Makio Ono

### ABSTRACT

Records of strong motion are often used as the ground motion inputs in earthquake analysis and in the design of structures. The design of underground structures, however, requires more than just the time history at any particular point on the earth's surface. It also requires the space-time variation of the ground motion. We have therefore developed a method for generating a simulated space-time variation that includes strong ground motions recorded at observation points. This simulated variation is characterized by an apparent velocity and by a coherence function. Here we presented a case study using motion recorded during the 1940 Imperial Valley earthquake.

### 1. 序 文

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<sup>1)</sup>。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。

従来, 時間に関する入力地震動としては, エル・セントロ地震, タフト地震, 十勝沖地

---

\* 埼玉大学工学部建設工学科

\*\* 埼玉大学大学院理工学研究科学生

震、新潟地震等の過去のある一地点で実測された強震観測記録に基づく波形が用いられる事が多い。また、得られた波形を場所に関して伝播させる際には、

- (1) 全く同一の波形が、ある一定のみかけ速度で水平方向に伝播する場合、

または、

- (2) 入力地震動の場所による違いが管路の挙動に及ぼす影響は、表面層の不均質性の影響に比べ少ないと考え、場所によらず同一波形、同一位相の波形を基盤から入射させる場合、を想定する事が多い。

しかし、(1)の考えに基づいた場合、地震波の水平方向のみかけ伝播速度として、石油パイプライン基準<sup>2)</sup>のように地盤のせん断波速度を用いるか、アレー観測記録の相互相関関数のピークから求められた値を用いるかでは結果が著しく異なる可能性がある。沖積地盤において、前者のせん断波速度は数百 m/s であるのに対し、後者のみかけ速度は数千 m/s であること<sup>3-5)</sup>、そして、従来の基本的な理論に従えば、

$$(\text{管路ひずみ}) = (\text{地盤の変形速度}) / (\text{地震波のみかけの伝播速度}) \quad (1)$$

であること<sup>6)</sup>を考えると、(地震波のみかけの伝播速度)としてどちらの値を使用するかで、およそ十倍ものひずみの算定結果の違いが生ずる可能性がある。また、合理的であるという点では、みかけ速度としては後者の値を用いるのが妥当であるが、この場合、波形が場所によらず同一であると仮定し、波形の変形の影響を無視しているため、危険側の評価を与える可能性があるという問題がある<sup>7)</sup>。

また、(2)の考えは主に地盤構造が場所により大きく異なる地盤に対して用いられている。しかし、例えば、地質調査によっては、地表面が水平方向に一樣な場合も多く、こうした場合には、地表面ではひずみが生じないというように危険側に評価をしてしまう問題を含んでいる。

さらに、(1)(2)では波形の変形が無視されているが、近年、アレー観測結果を用いて、地震波動の場所による変形に関する研究が行われ、この波形変形が地盤のひずみ<sup>8)9)</sup>に与える影響が無視できないことが指摘されている<sup>7)</sup>。

一方、上述の(1)(2)の方法に代わる方法として、近年、時間・空間の関数としての地震動のシミュレーションに関する研究が、幾つか行われている。相互相関関数またはクロススペクトルを満足する、場所と時間の関数としての波形のシミュレーションが、Shinozuka ら<sup>10,11)</sup>、Naganuma ら<sup>12)</sup>、星谷ら<sup>13,14)</sup>、原田ら<sup>15-17)</sup>、Deodatis ら<sup>18)</sup>等により行われている。これらの相互相関関数、クロススペクトルを用いると、観測結果のもつ情報を時間差、二地点間の距離、振動数、波数の関数として集約でき、波形の伝播、変形を共に考慮することが可能になる。

しかしながら、これらのシミュレーションでは、何れの方法においても、観測された強震記録をどの地点においても正確には満足していないために、入力波形として用いるには

実際的でなく、解析結果の説得力が弱い。このため、耐震設計に際しては、現実的な地震波形であるという理由から、実際に観測された強震波形と、(1)(2)のように簡単な波形の伝播とを仮定して応答計算を行ってしまう場合が多いものと考えられる。

建築物の耐震設計を行う場合を考えてみても、入力地震動としては、人工的にシミュレートされた波形を用いる場合もあるが、エル・セントロ地震、タフト地震、十勝沖地震等の実測された地震動波形を用いて耐震性のチェックが行われる事が多い。これは、実際に観測された波形は現実的であるという理由で尊重されている結果であると考えられる。建築物の場合には、これら一地点における波形で十分であると考えられるが、地中構造物の場合には地震動の時間のみでなく場所に関する変動、つまり、波動の伝播及び波形の変形、が重要になるため、観測された地震動波形だけでは不十分である。地中埋設管に対しても、建築物に対してと同様に、代表的な、かつ、現実的な地震波形を作るための研究が必要であると考えられる。

以上のような観点から、著者らは、① 二重フーリエ級数を用いた手法<sup>19)</sup>、② 多変数の確率過程を用いた手法<sup>21)</sup>による、現実的で波形の変形を考慮した、一地点での観測記録を含む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手法を展開した。さらに、③ 多入力線形システムの理論を用いた手法による多地点の観測記録を含む時空間波形のシミュレーション手法を展開した<sup>22)</sup>。そして、その一つの適用例として、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を求めている<sup>20-22)</sup>。

同様なシミュレーション手法として、フーリエ係数に関する条件付確率密度関数に基づく方法が盛川・亀田<sup>23)</sup>により、また Kriging 手法に基づく方法が、E.H. Vanmarcke・G.A. Fenton<sup>24)</sup>、土岐・佐藤・清野・水谷<sup>25)</sup>、星谷<sup>26)</sup>、丸山・星谷<sup>27)</sup>によっても提案されている。

本論文では、時間領域でのシミュレーション手法の中で最も単純な AR モデルを用いた手法を展開し、その適用例を示すことを目的としている。

まず、地盤の変位を互いに相関を有する定常ガウス型確率過程であると考え、多変数定常 AR モデルで表す。そして時空間確率過程は、前論文<sup>19-22)</sup>と同様に、次の2つの条件を満足するものと仮定する。

条件(A): 時空間確率過程と観測波形との時間に関する自己相関関数(またはパワースペクトル)は一致する。観測波形の自己相関関数と、従来の研究に基づく、地震波のみかけの伝播速度、波形の変形の程度(コヒーレンシー)とから、相互相関関数(またはクロススペクトル)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。

条件(B): 時空間確率過程は、観測地点において観測波形に厳密に一致する。

本論文では、条件(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、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。そして、適用例として、い

くつかのシミュレーションを行った。

## 2. 多変数定常 AR モデルによるシミュレーション<sup>13,14)</sup>

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 (速度, 加速度でも同様の議論が成り立つ) を, 互いに相関を有する平均値 0 の多変数定常 AR モデル  $u_i(t)$  で表す。

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

ここで,  $I$  は地点数であり,  $\varepsilon_i(t)$  は誤差である。また,  $M$  は定常 AR モデルの次数である。

式 (2) において, 係数  $b_{ip}(m)$ , および誤差  $\varepsilon_i(t)$  を求める必要があり, まず, 係数  $b_{ip}(m)$  を求める。この係数は誤差の自乗和を最小にするという条件, つまり,

$$\sum_{i=1}^I E[\varepsilon_i^2(t)] \rightarrow \min \quad (3)$$

より求められる。ただし,  $E[\ ]$  はアンサンブル平均を表し, 本論文では時間平均と同じである。式 (2), (3) より次式を得る。

$$R_{qi}(s) = \sum_{p=1}^i \sum_{m=1}^M b_{ip}(m) R_{pq}(m-s) \quad (4)$$

ここで,  $q=1, 2, \dots, i$

$i=1, 2, \dots, I$

$s=1, 2, \dots, M$

また  $R_{ij}(s)$  は, 2 地点での変位  $u_i(t)$ ,  $u_j(t)$  の相互相関関数であり,

$$R_{ij}(s) = E[u_i(t)u_j(t+s)] \quad (5)$$

と定義する。

式 (4) をマトリックス表示すると次のようになる。

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{21} & \dots & R_{i1} \\ R_{12} & R_{22} & \dots & R_{i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{1i} & R_{2i} & \dots & R_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{i1} \\ B_{i2} \\ \vdots \\ B_{ii} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{1i} \\ Q_{2i} \\ \vdots \\ Q_{ii} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで,

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

$$R_{pq} = \begin{bmatrix} R_{pq}(0) & R_{pq}(1) & \dots & R_{pq}(M-1) \\ R_{pq}(-1) & R_{pq}(0) & \dots & R_{pq}(M-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{pq}(1-M) & R_{pq}(2-M) & \dots & R_{pq}(0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B_{ip} = \begin{bmatrix} b_{ip}(1) \\ b_{ip}(2) \\ \vdots \\ b_{ip}(M) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$Q_{qi} = \begin{bmatrix} R_{qi}(1) \\ R_{qi}(2) \\ \vdots \\ R_{qi}(M) \end{bmatrix} \quad (9)$$

結局、式(6)の連立一次方程式を  $i=1, \dots, I$  について解くことにより、係数  $b_{ip}(m)$ , ( $i=1, 2, \dots, I$ ,  $p=1, 2, \dots, i$ ,  $m=1, 2, \dots, M$ ) を決定することができる。

次に、誤差  $\varepsilon_i(t)$  をシミュレートする。係数  $b_{ip}(m)$  が式(5)により決定されるとき、誤差  $\varepsilon_i(t)$  は次のような性質をもつことがわかる。

$$E[\varepsilon_i(t)\varepsilon_j(t)] = R_{ij}(0) - \sum_{p=1}^i \sum_{m=1}^M b_{ip}(m)R_{pj}(m) \quad (10)$$

$$E[\varepsilon_i(t)\varepsilon_j(t-s)] = 0 \quad (s=1, \dots, M) \quad (11)$$

$$E[\varepsilon_i(t)u_j(t-s)] = 0 \quad (s=1, \dots, M) \quad (12)$$

これらの性質を満たす誤差  $\varepsilon_i(t)$  は次式でシミュレートできる。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1(t) \\ \varepsilon_2(t) \\ \vdots \\ \varepsilon_I(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & & & \\ C_{21} & C_{22} & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ C_{I1} & C_{I2} & \dots & C_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \\ \vdots \\ \xi_I(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで、 $\xi_i(t)$  は平均値=0、分散=1のガウス分布に従う乱数である。また、右辺の下三角マトリックスは誤差  $\varepsilon_i(t)$  の共分散マトリックスを次式のように分解したものである。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{i1}^2 & \sigma_{i2}^2 & \dots & \sigma_{iI}^2 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \dots & \sigma_{2I}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{I1}^2 & \sigma_{I2}^2 & \dots & \sigma_{II}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & & & \\ C_{21} & C_{22} & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ C_{I1} & C_{I2} & \dots & C_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & \dots & C_{I1} \\ & C_{22} & \dots & C_{I2} \\ & & \ddots & \\ 0 & & & C_{II} \end{bmatrix} \quad (14)$$

ただし、 $\sigma_{ij}^2 = E[\varepsilon_i(t)\varepsilon_j(t)]$  であり、式(10)により求められる。

### 3. 観測地点で観測記録に一致する時空間波形

シミュレートする時空間地震波形は、観測地点において与えられた観測記録に一致しなければならない。いま、 $N$  地点において観測記録が与えられているとする。観測記録  $F_i(t)$ , ( $i=1, \dots, N$ ) は、定常 AR モデル  $u_i(t)$ , ( $i=1, \dots, N$ ) のサンプルであると考え。つまり、

$$u_i(t) = F_i(t) \quad (i=1, \dots, N) \quad (15)$$

とする。このとき、上式を満足する誤差  $\varepsilon_i(t)$ , ( $i=1, \dots, N$ ) は、式 (2), (15) より、

$$\varepsilon_i(t) = F_i(t) - \sum_{p=1}^i \sum_{m=1}^M b_{ip}(m) F_p(t-m) \quad (16)$$

となる。式 (13), (16) より、乱数  $\xi_i(t)$ , ( $i=1, \dots, N$ ) が次式により求まる値である場合、定常 AR モデル  $u_i(t)$ , ( $i=1, \dots, N$ ) のサンプルは、観測記録  $F_i(t)$ , ( $i=1, \dots, N$ ) と一致する。

$$\begin{aligned} \xi_i(t) &= [\varepsilon_i(t) - \sum_{p=1}^{i-1} c_{ip} \xi_p(t)] / c_{ii} \\ &= [F_i(t) - \sum_{p=1}^i \sum_{m=1}^M b_{ip}(m) F_p(t-m) - \sum_{p=1}^{i-1} c_{ip} \xi_p(t)] / c_{ii} \end{aligned} \quad (17)$$

結局、本手法により時空間地震波形のシミュレーションを行う場合には、式 (17) より  $\xi_i(t)$  ( $i=1, \dots, N$ ) を求め、残りの  $\xi_i(t)$  ( $i=N+1, \dots, I$ ) を乱数として発生させることになる。

### 4. 時空間地震波形の相互相関関数

本論文では、1. の条件 (A) より、変形しながら伝播する波動を、各地点での波動の振動数パワースペクトルは、観測波形のパワースペクトルと同一であるが、二地点での波動のクロススペクトルにおいて相関の程度が減少しながら伝播する波動と考えている。

実際の地震波においても、離れた二地点で観測された波形を比較すると、二地点間の距離  $|x_0|$  が大きいほど、また長周期の波より短周期の波ほど二地点での波形は異なり相関が小さくなる傾向があるもの考えられる<sup>23-30)</sup>。

そこで、前論文<sup>19-22)</sup>と同様に本論文でも、変形しながら伝播する波動のクロススペクトル  $S_{xr}(x_0, \omega)$  を、振動数  $|\omega|$  と伝播時間  $|x_0|/c$ , ( $c$ : 地震波の地表面に沿うみかけの伝播速度) の関数である  $A(|\omega| |x_0|/c)$  を用いて次式のように表せるものと仮定した。

$$S_{xr}(x_0, \omega) = S_r(\omega) \exp(-i\omega x_0/c) A(|\omega| |x_0|/c) \quad (18)$$

上式の  $S_r(\omega)$  はパワースペクトルである。また、関数  $A(\quad)$  はコヒーレンシーとよばれ

ているものであり、石井の研究<sup>23)</sup>に基づき、

$$A(|\omega||x_0|/c) = \exp\{-\alpha|\omega||x_0|/(2\pi c)\} \quad (19)$$

と仮定した。ここで、 $\alpha$ は波形の変形しやすさの程度を表すパラメーターであり、著者らはこれを変形定数と呼んでいる<sup>7),19)~22)</sup>。 $\alpha=0$ は波形が変形しない場合を表しており、 $\alpha$ が大きいく程、二地点の波形の相関は減少する。

クロススペクトルが式(18)で表される時、相互相関関数  $R_{x\tau}^0(x_0, \tau)$  はクロススペクトルを逆フーリエ変換して、

$$\begin{aligned} R_{x\tau}^0(x_0, \tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{x\tau}(x_0, \omega) \exp(i\omega\tau) d\omega \\ &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} S_{\tau}(\omega_n) \Delta\omega \cdot \exp\{-\alpha|\omega_n||x_0|/(2\pi c)\} \\ &\quad \cdot \cos\{\omega_n(\tau - x_0/c)\} \end{aligned} \quad (20)$$

で、求める事ができる。ただし、式(20)中の  $S_{\tau}(\omega_n)\Delta\omega$  は、観測波形  $F(t)$  を次式のようにフーリエ級数に展開し、

$$F(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)\} \quad (21)$$

係数  $a_n, b_n, (n=1, \dots, \infty)$  を用いると次式、

$$S_{\tau}(\omega_n)\Delta\omega = \frac{(a_n^2 + b_n^2)}{4} \quad (n=1, \dots, \infty) \quad (22)$$

のように求まる。

## 5. シミュレーションの手順

本論文で提案した多変数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の方法は、以下の手順にまとめられる。

- ① 観測波形を式(21)のように、フーリエ級数に展開し、フーリエ係数  $a_n, b_n$  を求める。
- ② 多変数ARモデル  $u_i(t)$  の番号  $i$  と地点との関係を設定する。
- ③ みかけの伝播速度  $c$ , 変形定数  $\alpha$  を想定し、式(20), (22)により相互相関関数を求

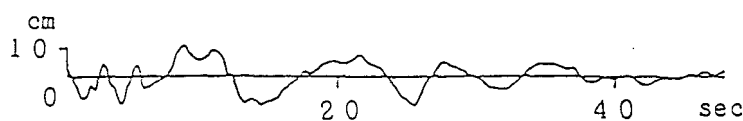


図-1 Imperial Valley 地震 (1940) の観測波形

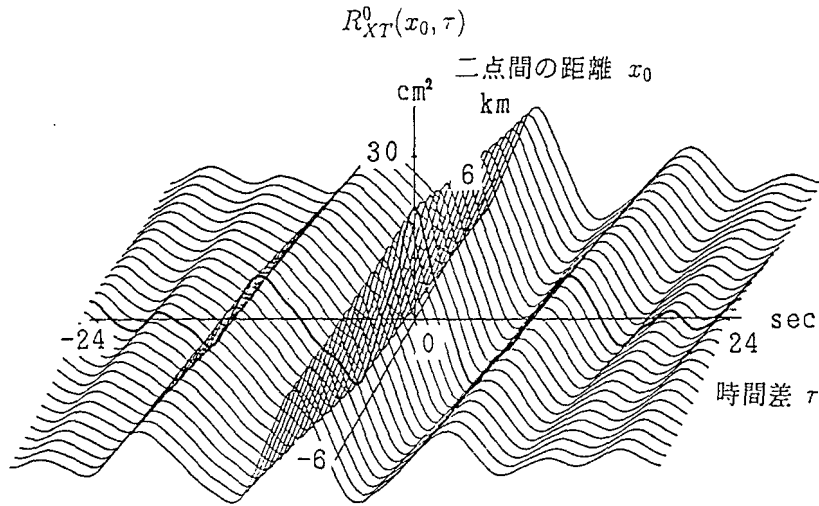


図-2 想定した相互相関関数  $R_{XT}^0(x_0, \tau)$

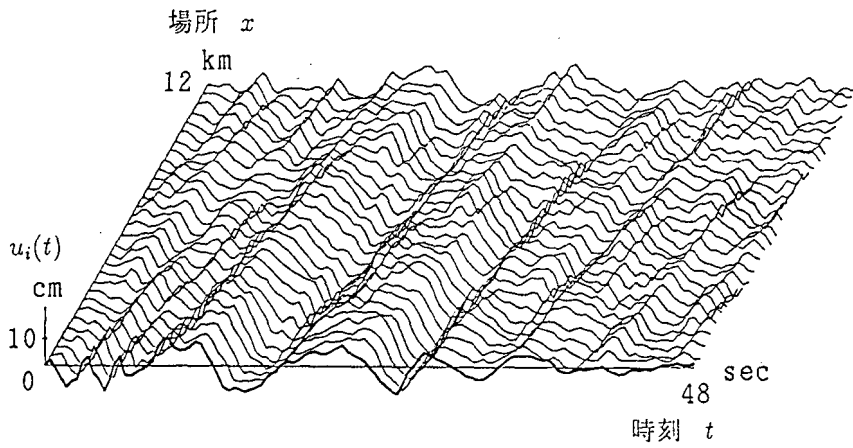


図-3 シミュレートされた時空間地震波形  $u_i(t)$

める。

- ④ 式(6)の連立一次方程式を解くことにより、 $b_{ip}(m)$ を求める。
- ⑤ 式(10)により、誤差の共分散マトリックスを求め、式(14)のように分解する。
- ⑥ 式(17)により、 $\xi_i(t)$  ( $i=1, \dots, N$ )を求める。
- ⑦  $\xi_i(t)$  ( $i=N+1, \dots, I$ )を平均値=0、分散=1のガウス分布に従う乱数として発生させる。
- ⑧ 式(13)により、誤差  $\varepsilon_i(t)$ をシミュレートする。
- ⑨ 式(2)により、時空間地震波形をシミュレートする。



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

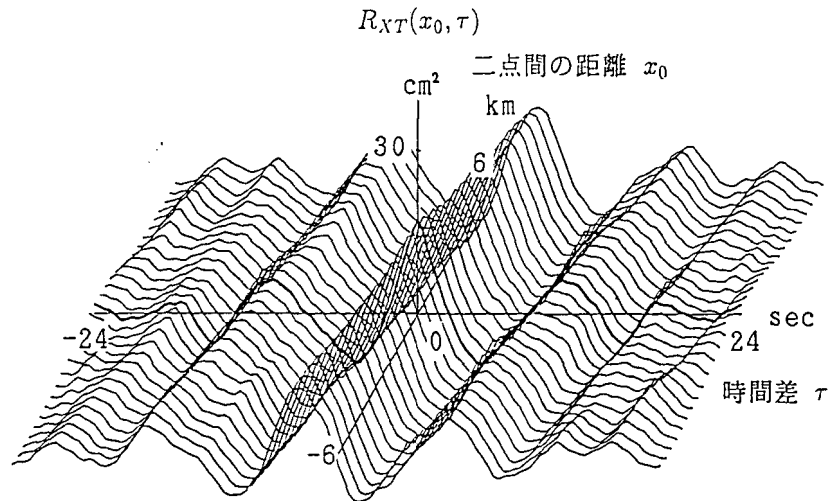


図-4 波形サンプル (図-3) の相互相関関形  $R_{xr}(x_0, \tau)$

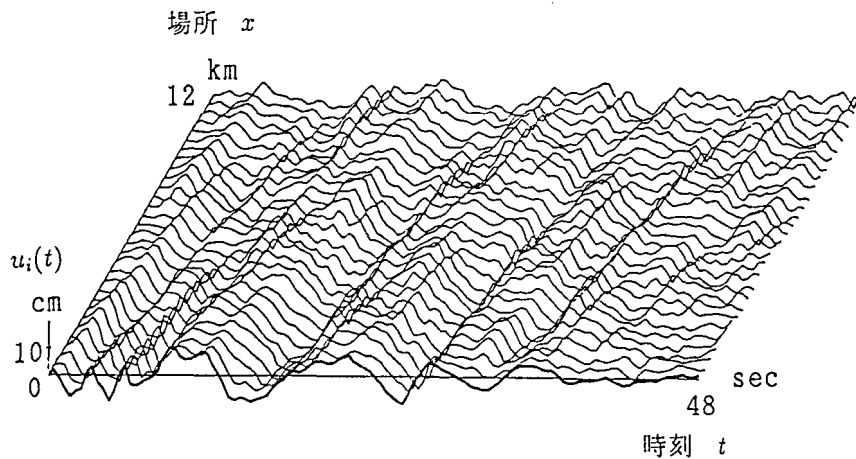


図-5 乱数を変えてシミュレートされた時空間地震波形  $u_i(t)$

## 6. 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波形を使用した<sup>31)</sup>。本方向の加速度記録は, 341.7 cm/s<sup>2</sup> 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<sup>31)</sup>, 本解析では, 図-1 に示す変位記録 (最大値=10.9 cm) を観測波形として使用した。

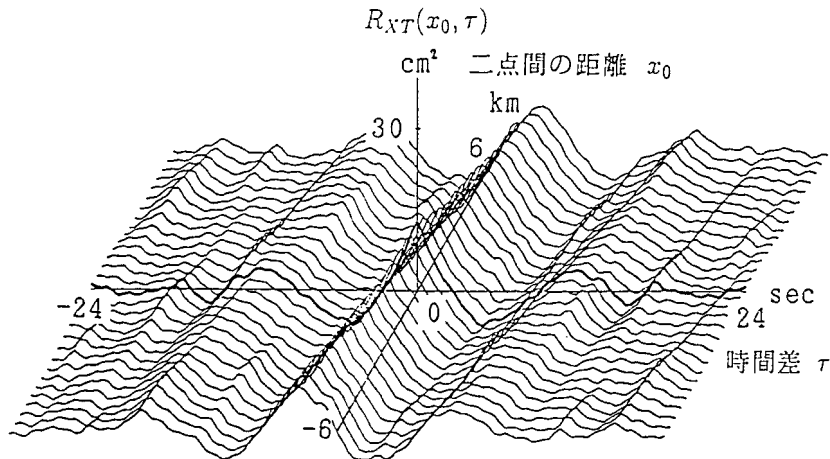


図-6 波形サンプル (図-5) の相互相関関数  $R_{XT}(x_0, \tau)$

波形をシミュレートする地点は、地点間の距離が 400 m で、0 km 地点から 12 km 地点まで直線上に並んだ合計 31 地点である。また、0 km 地点において図-1 の観測記録が得られているものとした。

波動のみかけの伝播速度を  $c=2,000$  m/sec, 変形定数を石井<sup>28)</sup>の研究に基づき  $\alpha=0.2 \times 2\pi$  と想定した場合のシミュレーションを行った。まず、相互相関関数を観測波形に基づき想定した。観測波形の記録長  $T$  を 48 sec とし式 (21) のようにフーリエ級数に展開し、式 (20), (22) より相互相関関数を求めたのが図-2 である。図-2 中の太線  $R_{XT}(0, \tau)$  は、観測波形の自己相関関数である。

AR モデルの次数を、 $M=15$  とし、想定した相互相関関数(図-2)を用いて、式 (6) より係数  $b_{ip}(m)$ , ( $i=1, \dots, 31, m=1, \dots, 15$ ) を求めた。次に、式 (13) より誤差  $\varepsilon_i(t)$ , ( $i=1, \dots, 31$ ) をシミュレートすることにより、時空間地震波形をシミュレートすることができた(図-3)。図-3 の太線で示すように、時空間波形は、0 km 地点において、観測波形(図-1)と一致しており 1. の条件 (B) を満足していることが確認できる。また、この波形の相互相関関数を求めると図-4 となり、想定した相互相関関数 (図-2) に近似的なものになっている。

また、図-5 には、図-3 と同一の条件であるが、乱数  $\xi_i(t)$  ( $i=2, \dots, 31$ ) の値のみ、図-3 とは異なる値を用いた場合のシミュレーションの結果を示す。図-5 の時空間波形の相互相関関数を図-6 に示す。図-6 の相互相関関数は、想定した相互相関関数 (図-2) に近似してはいるが、良く一致しているわけではない。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。

## 7. 結 論

地震波動の伝播に伴う埋設管路の挙動を検討する際、地震入力の時刻歴を管路に沿った各点でどのように与えるかが重要な問題である。本研究の目的は、観測された一地点での強震記録を正確に満足する。時間と場所との連続的な時空間関数としての地盤変位を合理的にシミュレートする事である。

地盤の変位を、埋設管路に沿った場所と時間とに関する時空間確率過程とし、次の2つの条件を満足するものと仮定する。

条件 (A)：時空間確率過程と観測波形との時間に関する自己相関関数（またはパワースペクトル）は一致する。観測波形の自己相関関数と、従来の研究に基づく、地震波のみかけの伝播速度、波形の変形の程度（コヒーレンシー）とから、相互相関関数（またはクロススペクトル）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。

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

前論文<sup>19-22)</sup>では、① 二重フーリエ級数を用いた手法、② 多変数の確率過程を用いた手法、③ 多入力線形システムの理論を用いた手法を展開したのに対し、本論文では、従来の多変数定常 AR モデルの理論を拡張する方法を展開した。

一つの適用例として、Imperial Valley 地震を観測波形として与え、波が正方向に伝播し、また、二地点間距離が離れる程、相関が減少するような相互相関関数を想定し、時空間関数としての波形をシミュレートした。そして、得られた時空間波形が、観測地点においては観測波形を満足している事を示した。

また、シミュレートされた時空間地震波形から得られる自己または相互相関関数が、想定した自己または相互相関関数に近似的であることを示した。

## 謝 辞

本研究をまとめるにあたり埼玉大学工学部渡辺啓行先生に貴重な御助言を頂きました。また、文部省科研費のご援助を受けました。記して感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 久保慶三郎：地震と土木構造物，鹿島出版会，p.127, 1981.
- 2) 石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示，官報，号外第125号，1973年。
- 3) Tsuchida, H. and Kurata, E.: Observation of earthquake response of ground with horizontal and vertical seismometer arrays, 第4回日本地震工学シンポジウム, pp.137-

144. 1975.
- 4) Tsuchida, H. and Iai, S.: Observation of earthquake response of ground with horizontal and vertical seismometer arrays (2nd report), 第5回日本地震工学シンポジウム, pp. 169-176, 1980.
  - 5) 田村重四郎・加藤勝行・前田 弘: 軟弱地盤表面の線上における地震動の特性について, 土木学会第29回年次学術講演会, pp. 538-539, 1974.
  - 6) 桜井彰雄: 地盤の震動解析に基づく埋設パイプラインの耐震性の研究, 1971年10月.
  - 7) 川上英二・佐藤靖彦: 地盤の相対変位・ひずみの推定結果に及ぼす地震波形の変形の影響, 土木学会論文報告集, No. 337, pp. 37-46, 1983.
  - 8) Katayama, T., Farjoodi, J. and Sato, N.: Measurement of seismic ground strain by a dense seismograph array, 8WCEE, Vol. 2, pp. 207-214, 1984.
  - 9) 高田至郎・Wright, J.P.: ライフライン系解析のための相対地盤震動, 土木学会論文報告集, No. 299, pp. 13-21, 1980.
  - 10) Shinozuka, M. and Lenoe, E.: A probabilistic model for spatial distribution of material properties, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 8, pp. 217-227, 1976.
  - 11) Shinozuka, M., Kameda, H. and Koike, T.: Ground strain estimation for seismic risk analysis, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 175-191, 1983.
  - 12) Naganuma, T., Deodatis, G. and Shinozuka, M.: ARMA model for two-dimensional processes, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113, No. 2, pp. 234-251, 1987.
  - 13) 星谷 勝・石井 清・栗田博昭: 空間時間分布特性を有する地震動シミュレーション, 土木学会論文集, No. 386/I-8, pp. 359-367, 1987.
  - 14) Hoshiya, M. and Chiba, T.: Simulation methods of multi-dimensional nonstationary stochastic processes by time domain models, 土木学会論文集, No. 296, pp. 121-130, 1980.
  - 15) 原田隆典・篠塚正宣: 表層地盤の確率応答と地震動の空間-時間パワースペクトル, 第19回地震工学研究発表会講演概要, pp. 33-36, 1987.
  - 16) 否笠友紀・原田隆典: 確率特性を有する地盤の応答と地震動の空間-時間特性について, 土木学会第43回年次学術講演会, I-463, pp. 976-977, 1988.
  - 17) Harada, T. and Shinozuka, M.: Stochastic analysis of seismic ground motions in space and time, Proc., 9WCEE, pp. II-825~830, 1988.
  - 18) Deodatis, G. and Shinozuka, M.: Digital simulation of seismic ground motion using stochastic wave theory, Proc., 9WCEE, pp. II-801~806, 1988.
  - 19) 川上英二: 一地点の観測記録を含む地震波形の時空間関数のシミュレーション, 土木学会論文集, No. 410/I-12, pp. 435-443, 1989.
  - 20) 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, pp. 1311-1316, 1990.
  - 21) 川上英二・小野牧夫: 一地点での観測記録を用いた時空間地震波形のシミュレーション, 土木学会論文報告集, No. 441, pp. 167-175, 1992.
  - 22) 小野牧夫・川上英二: 多地点での観測記録を用いた時空間地震波形のシミュレーション, 土木学会第47回年次学術講演会, I-636, pp. 1446-1447, 1992.
  - 23) 盛川 仁・亀田弘行: 既知波形を条件とした確率波のシミュレーション, 土木学会第46回年次学術講演会, I-356, pp. 750-751, 1991.
  - 24) Vanmarcke, E.H. and Fenton, G.A.: Conditioned simulation of local fields of earthquake ground motion, Structural Safety, Vol. 10, 1991.
  - 25) 土岐憲三・佐藤忠信・清野純史・水谷治弘: 非均質な確率場を考慮した時空間波形のシミュ

## 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

- レーション, 土木学会第47回年次学術講演会, I-340, pp. 856-857, 1991.
- 26) 星谷 勝: 確率場の条件付きシミュレーションに関する考察, 土木学会第47回年次学術講演会, I-341, pp. 858-859, 1992.
  - 27) 丸山 収・星谷 勝: 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, pp. 860-861, 1992.
  - 28) 石井 清: 確率論手法による地震波の入力損失の効果の検討, 第16回地震工学研究発表会講演概要, pp. 317-320, 1981.
  - 29) 沢田 勉: 地震動の工学的諸特性の解析とその応用に関する研究, 1988年8月.
  - 30) Katayama, T., Yamazaki, F., Nagata, S., Lu, L. and Turker, T.: Development of strong motion database for the Chiba seismometer array, Earthquake Disaster Mitigation Engineering, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, January, 1990.
  - 31) Hudson, D. et al.: Strong motion earthquake accelerograms, digitized and plotted data, EERL 71-50, California Institute of Technology, 1971.