

Columbia University 正 篠塚正宣
 宮崎大学工学部 正 原田隆典
 清水建設大崎研究室 正 山崎文雄

1. まえがき: ライフライン等を含む地中構造物の耐震設計下は, 構造物周辺地盤の地震時変位分布が重要な設計パラメータとなるため地盤の変位分布を仮定し, これを地盤ばねを介して構造物に作用させ, 断面力や変形を照査する, いわゆる“応答変位法”が多用されている。地震時の地盤の変位分布に関しては, 定量的資料に欠ける現状であるが, アレー観測データの整理や有限要素法等の数値解析結果の蓄積により定量化されていくものと思われる。これらの資料をどのような形にまとめるかについては, もっと積極的な検討が必要であるが(1), 例えば, 得られたデータをサンプル関数と解釈して, これより空間相関関数等の統計量に整理する方法(2)は現実的な方法の一つのように思われる。ここでは, 空間相関関数あるいは空間スペクトル密度関数が与えられたときに地震時の地盤の変位分布を計算する方法と計算例について説明する。なお, 実測データと数式の簡略化のため, 水平面内の地震時の地盤変位分布に焦点を絞って説明する。したがって, 地中パイプライン等の耐震解析にそのまま利用できるものと思われるが, 地中タンク等のように深さ方向の分布も必要なものでは, さらに, 深さ方向の座標を考慮しなければならない。

2. 空間相関関数と空間パワースペクトル密度関数: $x-y$ 平面内で時間 t とともに変動する平均値 $= 0$, 均質な確率過程 $f(x, y, t)$, $g(x, y, t)$ を考えると, 時間-空間相互相関関数は次のように定義される。

$$Q(\xi_x, \xi_y, \tau) = \begin{bmatrix} Q_{ff}(\xi_x, \xi_y, \tau), & Q_{fg}(\xi_x, \xi_y, \tau) \\ Q_{gf}(\xi_x, \xi_y, \tau), & Q_{gg}(\xi_x, \xi_y, \tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E[f(x+\xi_x, y+\xi_y, t+\tau)f(x, y, t)], & E[f(x+\xi_x, y+\xi_y, t+\tau)g(x, y, t)] \\ E[g(x+\xi_x, y+\xi_y, t+\tau)f(x, y, t)], & E[g(x+\xi_x, y+\xi_y, t+\tau)g(x, y, t)] \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに, $\xi_x = \xi_y$ は $x-y$ 平面内の 2 点間距離, τ は時間差を表す。地中構造物等の耐震設計では, 時刻 t における地盤の変位分布が必要であるため, 式(1)で, $\tau = 0$ といふ空間相関関数が重要な統計量となる。時間-空間確率過程にエルゴード性を仮定するならば, この空間相関関数 $R_{jk}(\xi_x, \xi_y)$ は次のような時間積分,

$$R_{jk}(\xi_x, \xi_y) = Q_{jk}(\xi_x, \xi_y, 0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T j^{(n)}(x+\xi_x, y+\xi_y, t) k^{(n)}(x, y, t) dt \quad (2)$$

または, 空間積分, ($j, k = f, g$)

$$R_{jk}(\xi_x, \xi_y) = Q_{jk}(\xi_x, \xi_y, 0) = \lim_{L_x, L_y \rightarrow \infty} \frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} j^{(n)}(x+\xi_x, y+\xi_y, t) k^{(n)}(x, y, t) dx dy \quad (3)$$

より計算できる。ここに, $j^{(n)}(x, y, t)$ は $j(x, y, t)$ の n -th サンプル関数である。現実には, アレー観測といえども観測値 $j^{(n)}(x, y, t)$ は $x-y$ 平面内の数点で記録されるため, 式(3)の空間積分は不可能で式(2)によるなければならない。

3. SMART-1 アレー記録による空間相関関数: 図-1 に, SMART-1 アレーの形状を示すが, 以後の解析では, x 軸を震源方向に, y 軸を $x-y$ 座標系の記録を用いる。このアレーで記録された Event 5 (1981 年 2 月 29 日) の加速度記録より変位記録を計算して, 式(2)を用いて震源方向 (x 軸, $\phi = 77^\circ$ 図-1 参照) の変位に関する空間相関関数 $R_{uu}(\xi_x, \xi_y)$ を計算した。データの数は少ないが, $C=0.0$, $M=0.5$, $O=0.5$ を規準とした相関関数の形状はほぼ同じで, また, $R_{uu}(\xi_x, \xi_y) = R_{uu}(\xi_y, \xi_x)$ の関係もほぼ成立している。図-2 には, $R_{uu}(\xi_x, \xi_y)$ のものも, $\xi_x \geq 0$, $\xi_y \geq 0$ の領域に絞って示している。このデータより震源方向の変位の空間相関関数を次式のように近似した。

$$R_{uu}(\xi_x, \xi_y) = \sigma_{uu}^2 [1 - 2(b_{xx} \xi_x)^2] \exp[-(b_{xx} \xi_x)^2 - (b_{xy} \xi_y)^2] \quad \dots\dots (4)$$

ここに $\sigma_{uu} = 1.24 \text{ cm}$ $b_{xx} = 0.884 \times 10^{-3} (\text{m}^{-1})$ $b_{xy} = 0.332 \times 10^{-3} (\text{m}^{-1})$. 空間パワースペクトル密度関数は、式(4)のフーリエ変換より、

$$S_{uu}(K_x, K_y) = \frac{\sigma_{uu}^2}{8\pi b_{xx} \cdot b_{xy}} K_x^2 \exp\left[-\left(\frac{K_x}{2b_{xx}}\right)^2 - \left(\frac{K_y}{2b_{xy}}\right)^2\right] \quad \dots\dots (5)$$

$|K_x| < M, |K_y| < M$

4. シミュレーションの方法: 時刻 t における地震時地盤変位 $u(x, y)$ は次式により創成することができる。

$$u(x, y) = \sqrt{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{2 S_{uu}(K_{xm}, K_{yn}) \Delta K_x \Delta K_y} [\cos(K_{xm} x + K_{yn} y + \phi_{1nm}) + \cos(K_{xm} x - K_{yn} y + \phi'_{1nm})] \quad \dots\dots (6)$$

ここに、 ϕ_{1nm} と ϕ'_{1nm} は $0 \sim 2\pi$ に一様に分布するランダム位相角、 $\Delta K_x = K_{xm}/M$, $\Delta K_y = K_{yn}/N$, $K_{xm} = m \Delta K_x$, $K_{yn} = n \Delta K_y$, K_{xm} と K_{yn} は波数の最大値。図-3は式(5)と(6)により SMART-1 アレー地盤の震源方向変位の分布をシミュレートした例であるが、震源方向 (x 軸) の変形に比べて、 y 軸方向の変形はゆるやかなことがわかる。これは、 x 軸方向に平面波が伝播した結果と解釈できるが、いずれにしても、上記に示した方法によりアレー記録の資料から、図-3のように地盤の変形を視覚化できる。また、これらを地中パイプラインに入打して、パイプの応答の平均値、分散等の統計量を計算できる。

1. 原田, 堤 “アレー観測記録の解析例” 土木学会第41回年次学術講演集Ⅰ, 1986.

2. 原田, 岩崎, 川島, 小山 “ライン地中構造の耐震設計に用いる地盤変動” 土木研究所資料第2143号, 建設省/1984

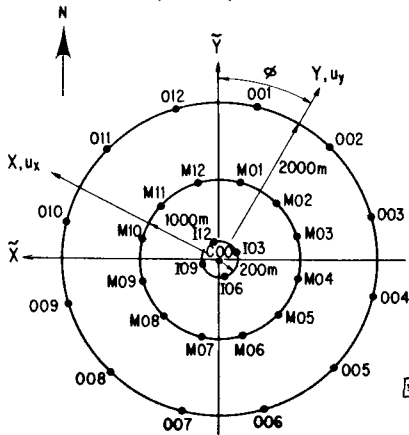


図-1 SMART-1アレーの形状と座標

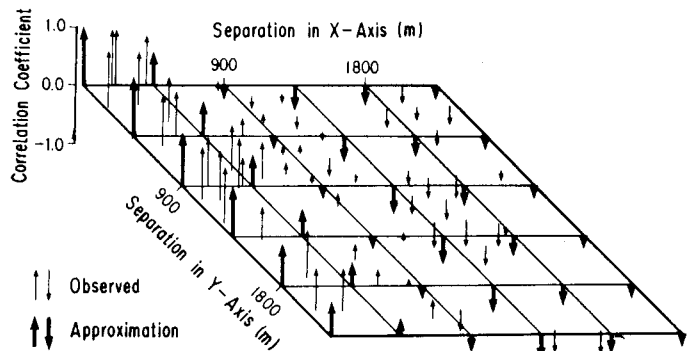


図-2 SMART-1 Event 5による震源方向変位 u_x の空間相関関数およびその近似

図-3 u_x (震源方向変位) のシミュレーション例

$$K_{xu} = 10 \quad b_{xx} = 8.84 \times 10^{-3}$$

$$K_{yu} = 10 \quad b_{xy} = 3.32 \times 10^{-3}$$

$$N = M = 64$$

