

I-456

空間変数を含む地震動のシミュレーション例

宮崎大学大学院 学生員 西川 博敏
宮崎大学工学部 正 員 原田 隆典

1. はじめに 近年、地震動の特性をもっと根本的に調べる必要が認識されはじめ、地震計を地盤の各点に立体的(3次元的)にあるいは平面的(2次元的)に配列して地盤全体の動きを正確に測定する、いわゆるアレー観測が試みられるようになってきた。これらのデータはまだ少ないが、比較的狭い範囲においても、地震動は各点において大きく違っているという事実が明らかになってきている。本研究では、地震動を3次元的に取り扱い、その工学的意味合いを検討するという視点から、地震動の3次元的シミュレーション例について報告する。

2. シミュレーションへのアプローチ 地盤材料の場所的不規則性を考慮した表層地盤の応答解析によると地盤内x、y、z点での地震動変位 $u(x, y, z, t)$ のパワースペクトルは次式のように示される。

$$S_{uu}(kx, ky, z, \omega) = S_{ub}(\omega) \{ [A(\omega) \{ (1-a) \delta(kx-kx^0, ky-ky^0) + a \delta(kx, ky) \} + B(\omega) \{ (1-a) S_{rr}(kx-kx^0, ky-ky^0) + a S_{rr}(kx, ky) \}] \} \quad (1)$$

ここに、

$$A(\omega) = 1 + \omega^2 \sum \beta_n \phi_n(z) [H_n(\omega) + \bar{H}_n(\omega)] + \omega^4 [\sum \beta_n \phi_n(z) H_n(\omega)] [\sum \beta_n \phi_n(z) \bar{H}_n(\omega)] \quad (2)$$

$$B(\omega) = \omega^4 [\sum \beta_n \phi_n(z) \omega_n H_n(\omega)] [\sum \beta_n \phi_n(z) \omega_n \bar{H}_n(\omega)] \quad a = 1 - \exp[-(\omega/\omega_b)^2] \quad (3)$$

上式で β_n と $H_n(\omega)$ はn次モードの刺激関数と伝達関数で、n次の平均固有振動数 ω_n 、平均減衰定数 h_n とすれば、次式のように与えられる。

$$\beta_n = \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \quad H_n(\omega) = \frac{1}{(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + 4h_n \omega \omega_n} \quad H_n^*(\omega) = -\{2\omega_n + i2h_n \omega\} H_n^2(\omega) \quad (4)$$

$$kx^0 = \frac{\omega \cos \theta}{c} \quad ky^0 = \frac{\omega \sin \theta}{c} \quad \phi_n = \cos\left(\frac{(2n-1)\pi}{2H} z\right) \quad n=1, 2, \dots \quad (5)$$

$S_{ub}(\omega)$ は、基盤における地震動のパワースペクトルを意味する。また $S_{rr}(kx, ky)$ は、地表のx、y点における地盤のn次固有振動数のばらつきを表すパワースペクトルで、n次固有振動数 $\omega_n(x, y)$ を次のように表すときの不規則関数 $f(x, y)$ のパワースペクトルを意味する。

$$\omega_n(x, y) = \omega_n [1 + f(x, y)] \quad (6)$$

数値計算例のため、次式のもを仮定する。

$$S_{rr}(kx, ky) = \sigma_{rr} \frac{b_x^2 b_y^2}{16\pi} kx ky \exp\left[-\left(\frac{b_x kx}{2}\right)^2 - \left(\frac{b_y ky}{2}\right)^2\right] \quad (7)$$

以上のようなパワースペクトルを用いると、地盤内x、y、z点における地震動変位 $u(x, y, z, t)$ は次式から作り出すことができる。

$$u(x, y, z, t) = \sqrt{2} \sum \sum \sum \left[\sqrt{2 S_{uu}(kx_1, ky_1, \omega_k)} \frac{\Delta kx \Delta ky \Delta \omega}{\Delta kx \Delta ky \Delta \omega} \cos(kx_1 x + ky_1 y + \omega_k t + \phi_{ijk}^{(1)}) \right. \\ \left. + \sqrt{2 S_{uu}(-kx_1, ky_1, \omega_k)} \frac{\Delta kx \Delta ky \Delta \omega}{\Delta kx \Delta ky \Delta \omega} \cos(-kx_1 x + ky_1 y + \omega_k t + \phi_{ijk}^{(2)}) \right. \\ \left. + \sqrt{2 S_{uu}(kx_1, -ky_1, \omega_k)} \frac{\Delta kx \Delta ky \Delta \omega}{\Delta kx \Delta ky \Delta \omega} \cos(kx_1 x - ky_1 y + \omega_k t + \phi_{ijk}^{(3)}) \right. \\ \left. + \sqrt{2 S_{uu}(-kx_1, -ky_1, \omega_k)} \frac{\Delta kx \Delta ky \Delta \omega}{\Delta kx \Delta ky \Delta \omega} \cos(-kx_1 x - ky_1 y + \omega_k t + \phi_{ijk}^{(4)}) \right] \quad (8)$$

ここに、

$$\Delta kx = \frac{kxu}{Nx-1} \quad \Delta ky = \frac{kxu}{Ny-1} \quad \Delta \omega = \frac{\omega u}{N_\omega - 1} \quad (9)$$

$$kx_i = (i-1) \Delta kx \quad ky_j = (j-1) \Delta ky \quad \omega_k = (k-1) \Delta \omega \quad [i=1 \sim Nx, j=1 \sim Ny, k=1 \sim N_\omega] \quad (10)$$

3. シミュレーションの結果と考察 2つの振動数 $\omega = 3.9 \text{ rad/s}$ で地表面($z=0$)における地震動変位のパワースペクトル(式(1))をプロットすると図1のようになる。パラメータの値として次のものを用いた。

$$bx=by=141.42\text{m}, \sigma_{rr}=0.01, \theta=\pi/4, \omega_n=3(2n-1)\text{rad/s}, h_1=25\%, h_2 \sim h_{18}=6\% \\ c=600\text{m/s}, \omega_b=15\text{rad/s} \quad (11)$$

図1より、比較的低い振動数領域ではコヒーレントな波動成分も見られるが、高い振動数領域になると $kx-ky$ 平面でのパワーの分布が乱れておりインコヒーレントな波動となっていることを読みとることができる。次に、図1のパワースペクトルと式(8)(9)のパラメータとして次の値を用いてシミュレーションを行った。

$$Nx=Ny=N_\omega=16, kxu=kyu=0.157\text{rad/m}, \omega u=135\text{rad/s} \quad (12)$$

図3は、式(7)で $\sigma_{rr}=0$ として地表面での地震動変位をプロットしたものである。 $\sigma_{rr}=0$ とは、表層地盤材料のばらつきが零となり、表層地盤が均質であることを意味する。水平伝播速度 600m/sを持つ平面波が $\pi/4\text{rad}$ の方向に伝播していることがわかる。図4には、図2で示すA,B,C,D点における時刻歴を示す。この図からも同じことが読みとれる。また、図5, 6は、 $\sigma_{rr}=0.01$ としたときの地震動変位と時刻歴を示したものである。 $\sigma_{rr}=0$ と $\sigma_{rr}=0.01$ の図を比較すると、地表面での地震動変位は表層地盤材料のばらつきに大きく影響を受けることがはっきりとわかる。また、図7, 8, 9はそれぞれ $\sigma_{rr}=0, 0.01, 0.05$ のときのA,B,E点の時刻歴を示したものである。図7で示すように表層地盤材料にばらつきがない場合には、B,E点を結んだ線に直角に地震動が入力しているためB,E点の波形は全く同一であり、A点との違いは位相差のみである。しかし、表層地盤にばらつきを与えた図8, 9では、B,E点の波形は違っており、この違いの程度は地盤のばらつきの大きい図9の方が著しい。このようなことより、地震動の空間的ばらつきには、地盤材料のばらつきが大きく影響すると言えよう。

参考文献 西川博敏 地震動のシミュレーション手法に関する基礎的研究 宮崎大学卒業論文 1989

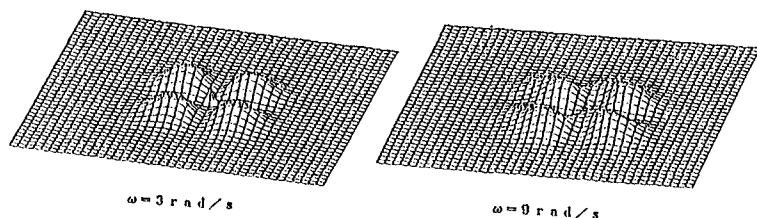


図-1 パワースペクトル

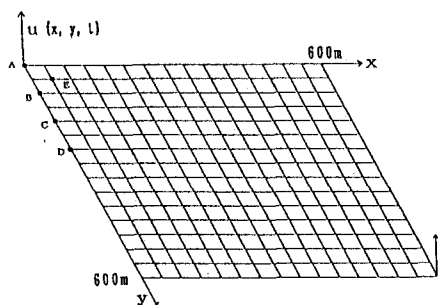


図-2 座標系

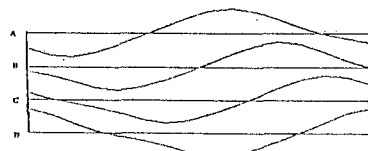


図-4 時刻歴 ($\sigma_{rr}=0$)

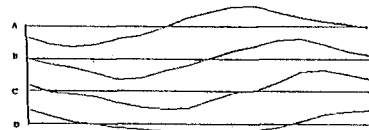


図-6 時刻歴 (0.01)

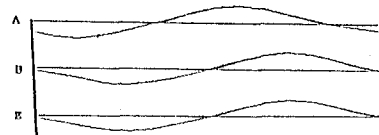


図-7 時刻歴 (0)

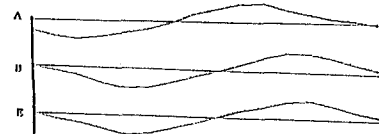


図-8 時刻歴 (0.01)

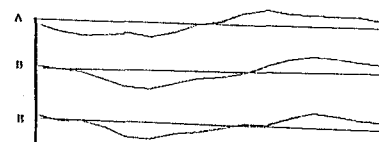
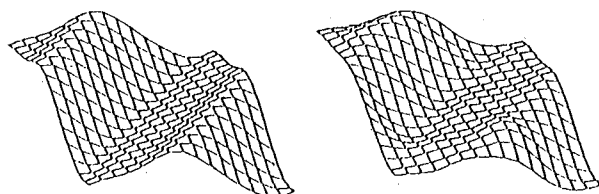


図-9 時刻歴 (0.05)

Time=0.0465 s



Time=0.0931 s

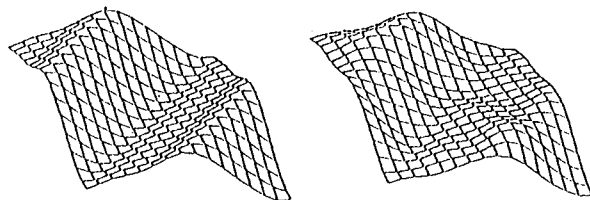


図-3 変位 ($\sigma_{rr}=0$)

図-5 変位 (0.01)