

(40) 不整形地盤上における地震動の時間・空間分布特性

京都大学防災研究所 清野純史
京都大学防災研究所 土岐憲三
京都大学防災研究所 佐藤忠信

1. まえがき

ガス・水道管などの地中管路、さらに規模の大きな地下構造物である共同溝やトンネル、パイプラインのように、地震波の波長に比してその展開距離が長い地下構造物の地震時挙動は、2地点間の地盤の相対変位や地盤ひずみに大きく影響されるため、地震動の時間空間分布特性を把握することが重要な要因となる¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。特に不整形な構造を有する地盤では、地震波の局所的な回折、散乱、屈折、反射などによって応答値が局所的に大きく変動するため、このような不整形構造を取り入れた相対変位応答⁵⁾のモデル化が必要となる。

本研究では、まず SMART1 アレー記録を用いて地震動強度の空間分布特性を調べ、地盤特性がこの空間分布特性に与える影響を推察する。次に、簡単な不整形地盤モデルを考え、この地盤上の地震動のシミュレーションを行う。そして、空間相関関数が地盤の不整形性によってどのような影響を受けるかを明らかにするとともにこの空間相関関数のモデル化を行い、不整形地盤上の2地点間の相対変位の期待値を算出する。

2. 地震動の空間分布と地盤特性

図-1は、台湾の羅東で観測が行われている SMART1 アレーの計器配置と event 5 と呼ばれる地震の震央方向を示したものである。event 5 では37点の観測点の内27点で記録が得られており、この各点における最大加速度と加速度時刻歴の2乗平均（以後平均パワーと呼ぶ）の値を示したものが図-2である。上側の数字が最大加速度、下側の数字が平均パワーを表す。この図からわかるように、得られた値はここで対象としているほぼ4km四方の領域全体に渡っているとは言え、これらの物理量を支配する具体的な数学モデルが存在しない以上（存在するにしてもかなり複雑なシステムの方程式が必要）観測データから領域内の任意の点の物理量を求めることは難しい。しかも、これらのデータはこれらのデータは空間的に定常でないことは容易に想像がつく。すなわち、ある任意の2点間の相関を取った場合、それらは必ずしも2地点間の距離の関数とはならないであろう。本研究では、このような確率場の不規則データをバリオグラム⁶⁾を用いて処理し、最大加速度や平均パワーなどの地震動の空間分布特性を捉えることにした。

まず、 $z(x)$ をその点における物理量の状態を表す確率変数としたときに、平均値および、2地点における状態量の共分散は以下の式で表される。

$$m(x) = E\{z(x)\} \quad (1)$$

$$S(x, y) = E\{[z(x) - m(x)][z(y) - m(y)]\} \quad (2)$$

定常の場合は $S(x, y) = S(x - y)$ となり、2地点間の差 $x - y$ のみの関数となるが、非定常の場合は具体的にどの様な関数になるのかは容易には定まらない。そこで式(1)の平均値と、次式で表される2地点における状態量の差の分散（バリオグラム）を用いて確率場を表現する。

$$\gamma(x, y) = E\{([z(x) - z(y)] - [m(x) - m(y)])^2\} \quad (3)$$

いま、任意の点 $z_0(x, y)$ を以下のように観測点の物理量 $z_i(x, y)$ ($i = 1, \dots, N$) の線形結合で表されると考える。

$$\hat{z}_0 = \lambda_0 + \sum_{i=1}^N \lambda_i z_i \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1, \quad \lambda_0 = 0 \quad (\text{unbiased condition}) \quad (5)$$

Intrinsic 確率場、およびバリオグラム既知の仮定のもとに

$$E\{(z_0 - \hat{z}_0)^2\} \rightarrow \text{minimum} \quad (6)$$

なる λ_i を次式により求める。

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(d_{ij}) + \mu = \lambda(d_{0i}) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (8)$$

ここで得られた λ_i を式 (4) に用いることにより、最適推定値 \hat{z}_0 を求めることができる。

図-3, 4 は観測データより得られた最大加速度、平均パワーに対して上述の手法によって求めたバリオグラムと、これを用いてアレー観測点を含む4km四方の領域の空間分布特性を推定した結果である。図-5 はアレー観測点下の地盤の断面であり、(a) はNS、(b) はEW方向断面を表す。図-3, 4 と図-5 を比べると、地盤が傾斜してゆく北東方向で最大加速度、平均パワーとも大きな値が出ていることがわかる。これより、最大加速度やその平均パワーなどの物理量には地盤形状の影響が現れると考えるても良からう。その意味では空間的な定常性は成り立たないことがわかる。

3. 不整形地盤と空間相関関数

図-6 は大阪ガス株式会社によってアレー観測が行われている埼玉県北葛飾郡吉川町の地盤をモデル化したものであり⁷⁾、この地盤に図-7(a) に示されるSH波が入射角 1° で入射した場合の応答波形を用いて解析

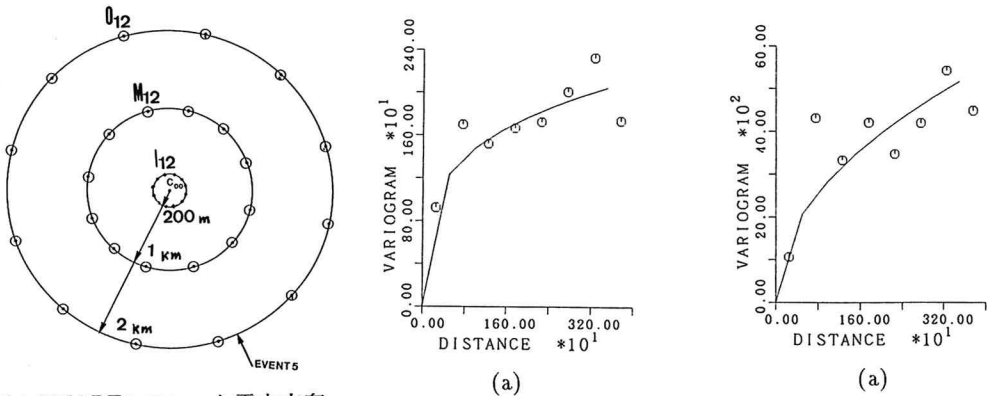


図-1 SMART1 アレーと震央方向

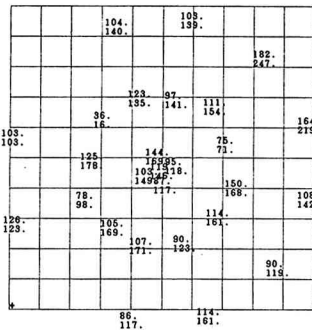


図-2 最大加速度と平均パワー

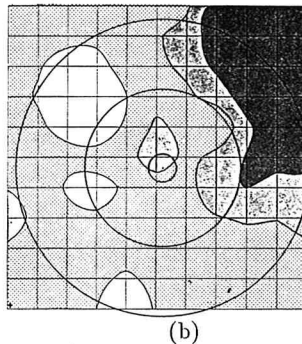


図-3 バリオグラムと最大加速度

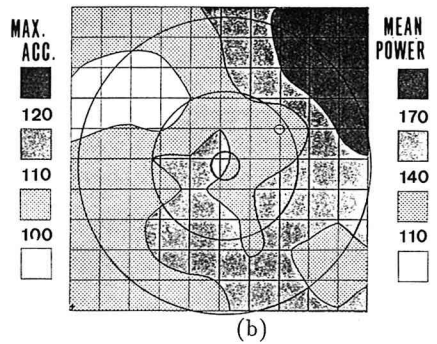


図-4 バリオグラムと平均パワー

を行った。この震動解析に用いた手法は *Discrete Wavenumber* 法であり、入射波は図-7(b) に示されるように 2Hz を中心にベル型の周波数分布を持つ *Ricker's wavelet* である。

モデル地盤上の地表面の応答波形を場所 x と時間 t の関数 $u(x, t)$ として表わす。このとき、時間に関して定常性を仮定すると、時空相互相関関数 $R(x_1, x_2, \tau)$ は次式で表される。

$$R(x_1, x_2, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T u(x_1, t) u(x_2, t + \tau) dt \quad (9)$$

ここで、 x_1 を 0 に固定し、 $x_2 = x, \tau = 0$ とすると式(9)は次式のようになる。

$$R(0, x, 0) = \frac{1}{T} \int_0^T u(0, t) u(x, t) dt \quad (10)$$

図-8 は図-6 のモデル地盤の地表面で得られた $\tau = 0\text{sec}$ における応答波形の空間相関関数と、 $D_1 = 9\text{m}$, $D_2 = 45\text{m}$ の層厚を持つ水平成層の空間相関関数の比較である。実線1が層厚 D_1 、実線2が層厚 D_2 、そして、□印がモデル地盤の空間相関関数を表している。モデル地盤における空間相関関数は、平坦部分 ($A \sim B, D \sim E, G \sim H$) ではそれぞれの層厚に対応する空間相関関数と一致しており、地盤の不整形部分 ($B \sim D, E \sim G$) で相互への遷移が生じている。図中の一点鎖線3は、実線で表される2つの成層地盤の空間相関関数の和である。これより、地盤の不整形部分の中央の C, F 点(*)がこの一点鎖線上の対応する点を通ると仮定し、 $A \sim B, C, D \sim E, F, G \sim H$ の各点を *Spline* 関数で近似してモデル化を行った。これが図中の破線であり、□印のモデル地盤の空間相関関数をよく近似している。

さて、ある点 x における自己相関関数は式(9)より以下のようになる。

$$R(x, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T u(x, t) u(x, t + \tau) dt \quad (11)$$

図-9 は $\tau = 0.2\text{sec}$ におけるモデル地盤の地表面で得られた応答波形の自己相関関数と、各水平成層の自己相関関数の比較である。実線1が層厚 D_1 、実線2が層厚 D_2 、そして、□印がモデル地盤のそれぞれ自己相関関数を表している。ただし、縦軸の値は層厚 D_1 の $x = 0$ での値で正規化している。モデル地盤における自己相関関数は、平坦部分 ($A \sim B, D \sim E, G \sim H$) ではそれぞれの層厚に対応する自己相関関数と一致しており、地盤の不整形部分 ($B \sim D, E \sim G$) で相互への遷移が生じている。図中の一点鎖線3は、実線で表される2つの成層地盤の自己相関関数の和である。前述の空間相関関数のモデル化と同様、地盤の不整形部分の中央の C, F 点(*)がこの一点鎖線上の対応する点を通ると仮定し、 $A \sim B, C, D \sim E, F,$

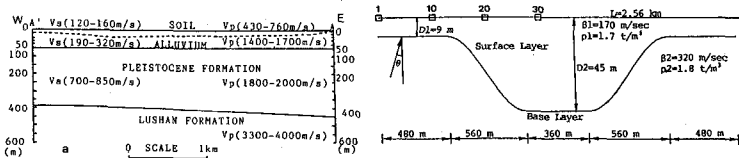


図-5 アレー観測点下の地盤特性

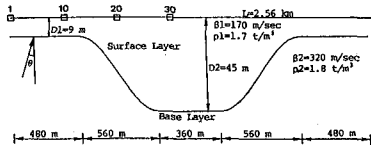


図-7 入力波 (a) Ricker's wavelet (b) 周波数特性

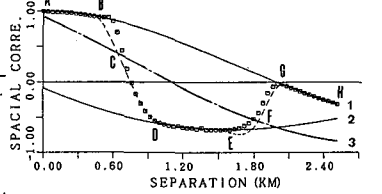


図-8 空間相関関数のモデル化

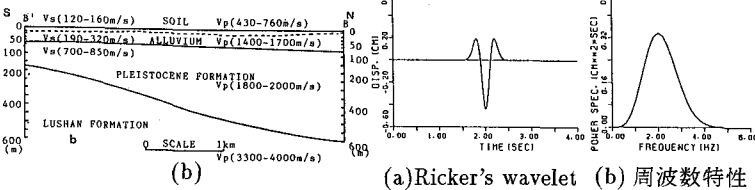


図-9 自己相関関数のモデル化

$G \sim H$ の各点を *Spline* 関数で近似した。これが図中の破線である。図-10 は x 軸に場所、 τ 軸に時間のずれをとったものであり、(a) は応答波形から直接求めたもの、(b) は上述のモデル化にしたがって作成したものである。この自己相関関数を、ある点 x において τ 軸上でフーリエ変換すれば地点 x でのパワースペクトルが得られる。したがって、これを積分すれば平均パワーの空間分布が計算できる。

4. 2 地点間の相対変位

地盤の 2 地点間の相対変位のスペクトル $S_{\Delta u \Delta u}$ は次式で与えられる。

$$S_{\Delta u \Delta u} = S_{xx}(\omega) + S_{yy}(\omega) - 2\text{Re}[S_{xy}(\omega)] \quad (12)$$

ここに、 $S_{xx}(\omega), S_{yy}(\omega)$ はそれぞれ地点 x, y における応答波形のパワースペクトル、 $S_{xy}(\omega)$ は地点 x と y の応答波形のクロススペクトルを表す。式 (12) を用いると地盤の 2 地点間の相対変位の 2 乗平均値は次のようになる。

$$E[\Delta u^2] = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx} d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} S_{yy} d\omega - 2 \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re}[S_{xy}(\omega)] d\omega \quad (13)$$

式(13)の右辺第一項、第二項はそれぞれ地点 x, y における応答波形の平均パワーに相当し、第三項は式(10)で計算される空間相関関数に相当する。3.でモデル化した空間相関関数と平均パワーを用いて 2 地点間の地盤の相対変位の 2 乗平均値を計算したものが図-11 の実線である。□印は応答波形から直接計算したものであり、地盤急変部で多少大きめの値が出ているものの全体的な傾向をよく捉えていることがわかる。

5. まとめ

本手法にしたがえば、不整形地盤形状の概略と各平坦部上の地表面でそれぞれ 1 つの観測記録が得られれば、不整形部分を含めた地盤全体の相対変位の 2 乗平均値が計算できる。今後、より複雑な理論波形で手法の検証を行った後、実地震記録に適用する予定である。

- 参考文献 1) 川上, 佐藤: 土木学会論文集, No.337, pp.37-46, 1983. 2) 星谷, 石井, 栗田: 土木学会論文集, No.386, pp.359-367, 1987. 3) Harada: 8WCEE, pp.605-612, 1984. 4) 亀田, 沢田, 亀井: 京都大学防災研究所, 第 30 号 B-2, pp.89-106, 1987. 5) 原田, 織田, 嶋田: 第 17 回地震工学研究発表会, pp.99-102, 1983. 6) J.P.Delhomme: Advances in Water Resources, Vol.1, No.5, pp.251-266, 1978. 7) Toki, Fukumori, Kikuta, Sako and Yanabu: 8WCEE, pp.223-230, 1984.

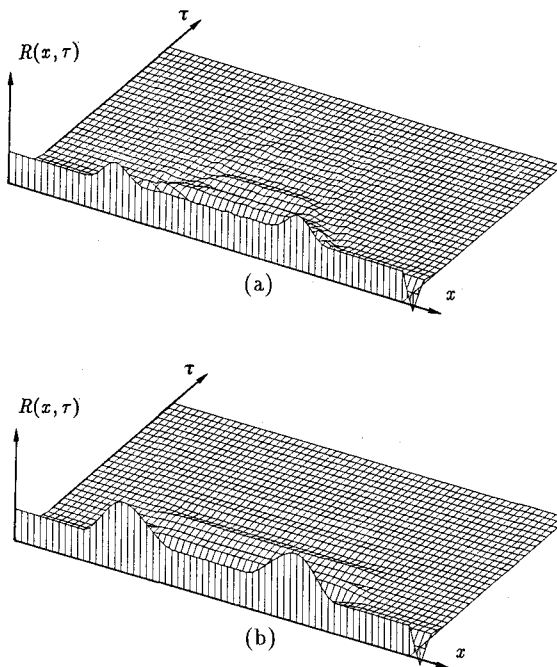


図-10 自己相関関数

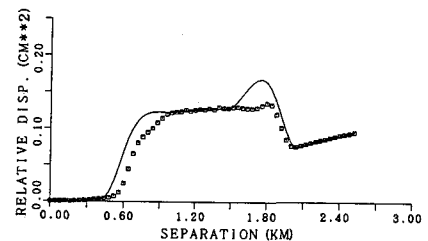


図-11 相対変位の 2 乗平均値