

## (26) 強震時地動の空間スペクトルとその応用

宮崎大学大学院 学〇織田隆夫, 嶋田剛, 宮崎大学工学部 正 原田隆典

**1. まえがき** 地震動は時間と空間によって変動する。従来, 地震動の加速度時刻歴に関しては, 応答スペクトルなどの形でまとめられており, 上部構造物の耐震設計に寄与している。他方, 地下タンク・沈埋トンネル・地中埋設管などの地中構造物の耐震性は, むしろ地震動の空間的変動に強く影響されるため, 地震動の空間的変動に関する特性を工学的に整理する必要がある。図-1はSMART1による最大加速度の空間分布の一例である(X軸がES成分, Y軸がNS成分)。この地域の地盤はある程度一様であるにもかかわらず, 最大加速度は空間的に大きくばらつくことが認められる。ここでは, このような地震動の空間的変動を確率過程理論を援用して, 整理・解析する方法を報告する。具体的には, 地中埋設管震害資料から地震時地盤変位の空間分布を推定した結果および同時観測記録の確率的解析の概要である。

**2. 地震動の確率的表現方法<sup>1)</sup>** 空間座標を $x$ , 時間軸を $t$ で表わすと, 地盤変位は $U_g(x, t)$ と表現できる。この表現の多次元多変数への拡張は容易であるが, ここでは簡単のため2次元1変数の場合を示す。 $U_g(x, t)$ が平均値零と片側パワースペクトル $G(R, \omega)$ を持つ定常均質ガウス過程と仮定すると,  $U_g(x, t)$ は次式で与えられる。

$$U_g(x, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{2G(R_m, \omega_n) \Delta R \Delta \omega} \cos(R_m x - \omega_n t + \phi_{mn}) \quad (1)$$

ここで,  $G(R, \omega)$ は $0 \leq R_m \leq R_u, 0 \leq \omega_n \leq \omega_u$ に対して成立する。また,  $\Delta R = R_u/M, \Delta \omega = \omega_u/N, R_m = m\Delta R, \omega_n = n\Delta \omega$ であり,  $\phi_{mn}$ は $0 \sim 2\pi$ の間で一様な分布を持つランダム位相角である。 $R$ (波数)と $\omega$ (円振動数)より,  $x$ 軸方向に伝播する波の速度 $C$ は次式で与えられる。

$$C = \frac{\omega}{R} = \frac{L}{T} \quad (2)$$

ここで,  $L$ は波長,  $T$ は周期である。(2)式を用いると,  $G(R, \omega)$ は空間スペクトル $G_S(R)$ および時間スペクトル $G_T(\omega)$ に変換することができ, 平均伝播速度は近似的に次式で与えられる。

$$\bar{L} = 2\pi \left[ \frac{\int_0^R G_S(R) dR}{\int_0^R R G_S(R) dR} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \bar{T} = 2\pi \left[ \frac{\int_0^\omega G_T(\omega) d\omega}{\int_0^\omega \omega G_T(\omega) d\omega} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

多くの研究から,  $G_T(\omega)$ は地盤の卓越周期 $T_g$ でなだらかなピークを持つことが示されているので,  $\bar{T} = T_g$ とすることができる。

**3. 地中埋設管震害資料による地震時地盤変位の空間分布特性の推定<sup>1)</sup>** 時間 $t$ を固定した時の地盤変位を $U_g(x)$ とする。 $U_g(x)$ が平均値零と分散 $\sigma^2$ を持つ均質ガウス確率過程と仮定し, その空間相関関数 $R_{U_g}(\xi)$ およびこれをフーリエ変換することにより導かれる空間パワースペクトル $S_{U_g}(R)$ を次式で与える。

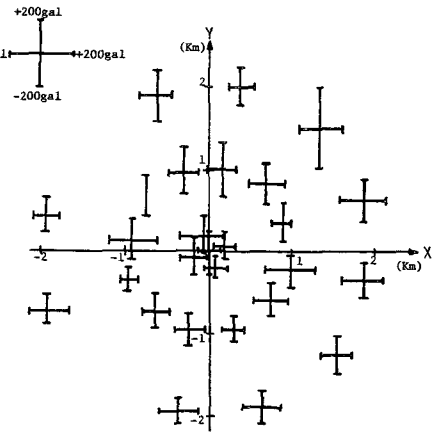


Fig.1 Spatial Distribution of Maximum Ground Acceleration, Event 5

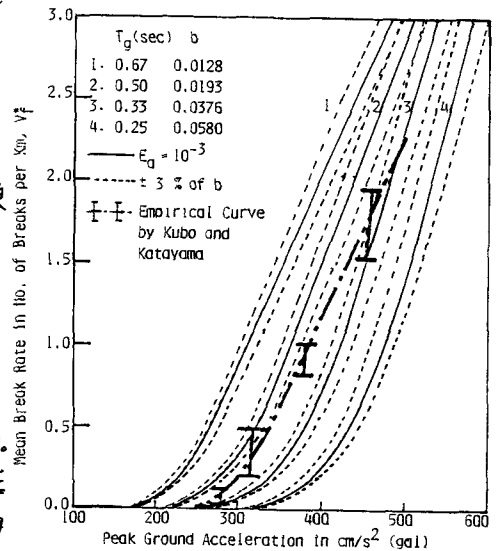


Fig.2 Correlation Between Mean Break Rate and Peak Ground Acceleration

$$R_{ug}(\xi) = D^2 \exp[-(b\xi)^2] [1 - 2(b\xi)^2] \quad (4)$$

$$S_{ug}(k) = \left[ \frac{D^2 k^2}{(b^2 2\pi)} \right] \exp\left[-\frac{k^2}{(2b)^2}\right] \quad (5)$$

地盤変動を規定するパラメータ  $b$  と  $D$  は、(5)式を用いて埋設管1km当りの破壊箇所数を理論的に計算して求め、これを久保・片山博士らによる地中埋設管震害資料と比較して決めた。図-2はその比較結果の一例である。 $b$  と  $D$  が決まると、(5)式の空間スペクトルが求まり、(2)式を用いて時間を固定した時の地震時地盤変位の空間的変動を計算することができる。また、平均伝播速度  $\bar{c}$  も計算することができる。図-3は、このようにして求めた  $\bar{c}$  (図中の斜線部分) と土岐博士によってまとめられた地表面での伝播速度の実測値(図中の●)を示したものである。この図より両者の対応のよいことがわかるが、平均伝播速度の推定値として次式が提案できよう。

$$\log \bar{c} = 0.56 \log T_g + 2.454 \quad (6)$$

(6)式を使うと、地盤の卓越周期  $T_g$  から平均伝播速度の概略値を推定することが可能である。

**4. 地盤急変部のひずみ特性<sup>2)</sup>** 前節の確率モデルを図-4に示すように明らかに極端に地盤が変化している急変部に適用して、急変部のひずみ特性を解析してみた。地盤急変部BCにおいて、地盤の卓越周期  $T_g(\text{sec})$  は  $T_{g0}$  から  $T_{g1}$  に、また、地盤変位の最大値  $u_{g \max}$  も  $u_{g \max 0}$  から  $u_{g \max 1}$  にそれぞれ直線的に変化するものと仮定した。地盤の組み合わせとして、図-5中に示す(a)~(e)の5ケースを考えた。この場合、急変部のパワースペクトルは場所  $x$  に依存して変化することになり、非均質確率過程となる。(4)式より、時間を固定した時の地盤変位のサンプル波形が計算でき、さらにこれを場所  $x$  で微分すると地盤ひずみのサンプル波形が計算できる。これらより、地盤急変部における最大ひずみ  $\epsilon_{\max}$  と平坦部での最大ひずみ  $\epsilon_{\text{ave}}$  の比  $n = \epsilon_{\max} / \epsilon_{\text{ave}}$  を計算し、地盤急変部の長さ  $L(\text{m})$  と  $n$  を種々の地盤の組み合わせに対してプロットして図-5が得られた。この図は各5回の計算の平均値であるが、 $L \geq 30(\text{m})$  の急変部では大きなひずみは発生しないこと、 $n$  の減少は地盤条件に大きく支配されること、(e)のケースで  $n$  の値が最も大きくなることなどがわかる。

**5. 同時観測記録の確率的解析方法と試算例<sup>1)</sup>** 前節までは、地中埋設管震害資料から地震時地盤変位の空間分布特性を推定した結果を述べてきた。本節では、同時観測記録から空間

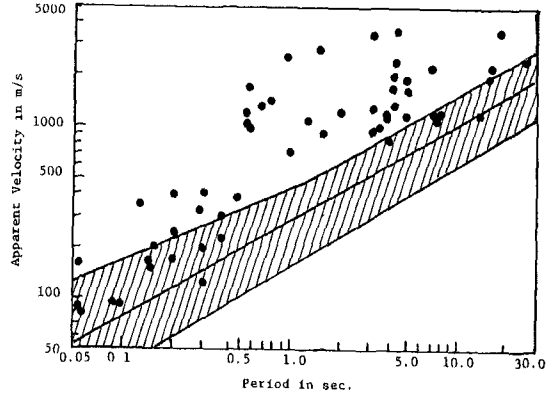


Fig.3 Analytically Estimated and Observed Apparent Velocities

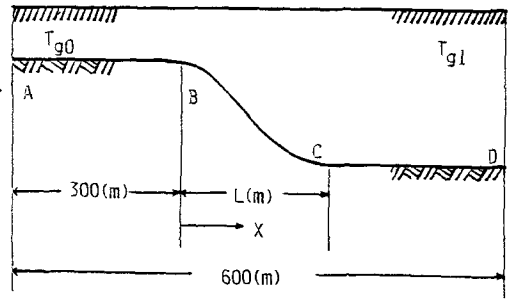


Fig.4 Mathematical Model of Irregular Ground and its Notations

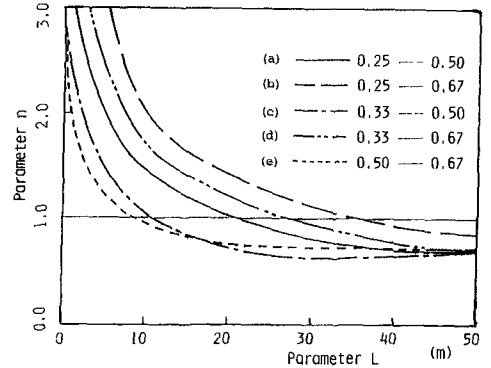


Fig.5 Relationships among L, n and Ground Condition

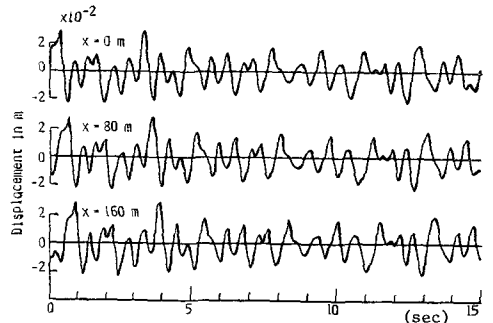


Fig.6 Simulated Strong Earthquake Ground Displacement Time Histories at Different Three Points

分布特性を推定する確率的解析方法を示す。地表面上の異なる \$n\$ 点で変位波形 \$u\_g(x+\xi\_i, t), i=1, 2, \dots, n\$ が得られ、これを定常均質過程と仮定すると、空間相関関数 \$R(\xi\_{ij})\$ は次式により決定できる。

$$R(\xi_{ij}) = \frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} u_g(x+\xi_i, t) u_g(x+\xi_j, t) dt \quad (7)$$

ここで、\$\xi\_{ij}\$ は \$i\$ 地点と \$j\$ 地点の距離、\$T\_u\$ は継続時間である。(7)式を検証するために試算を行なった。まず、同時観測変位記録として図-6に示すものを与える。これは \$T\_u=15(s)\$ として(1)式から計算したもので、(5)式の空間スペクトル、(2)式の関係、\$\bar{c}=299(m/s), D=0.011(m), N=1024, \omega\_u=429 rad/s\$ を用いた。こうして求めた6地点での同時変位記録から、(7)式を用いて空間相関値を求め、これを \$R(0)\$ で基準化した値を図-7にプロットした。これは、ターゲットの空間相関関数(実線)と一致しており、(7)式と同時に観測記録から空間相関関数が決定できることを示している。図-8は本試算で用いた地震動を同時観測網がとらえた各点の波形を観測点中央の波形を基準にして(7)式により解析を行なって、各点での相関値をプロットしたものである。図-8のパターンでは、同じ相関値が \$y\$ 軸と平行なラインに並び、この値は \$x\$ 軸とともに変わっており、\$x\$ 軸方向に波が伝わるのが推定できる。

### 6. SMART1データの解析

SMART1は、図-9に示すように同時観測地震計が配置されており、今回の解析の対象としたのは、1981年1月29日4時5分36秒、\$M=6.9\$ の地震(Event 5)の加速度波形 \$NS\$ 成分(最大 \$244.1 gal\$)である<sup>3)</sup>。この波形を図-10に示すが、波の伝播の様子が認められる。本解析では、図-10の波形の強震部分 \$45.77 \sim 50.77(s)\$ の5秒間において、各波形の2乗平均値で波形を基準化し、この基準化された加速度波形と(7)式から空間相関値を計算した。なお、基準地点として、\$C00, I06, M06, O06\$ の4ケースを採用した。図-11は、\$I06\$ を基準点とした時の各地点の相関値を図-8のようにパタ

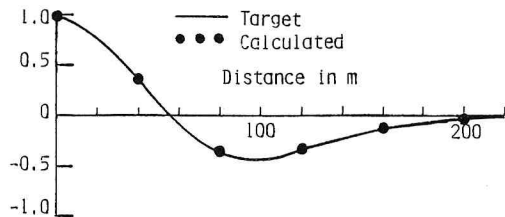


Fig.7 Comparison of Calculated and Target Space Correlation Function

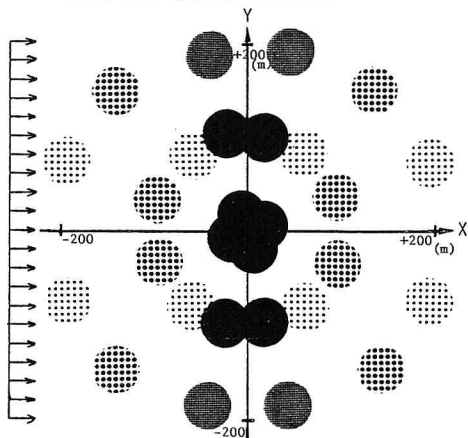


Fig.8 Pattern of Spatial Correlations from Simulated Waves

Table 1 Legend of Fig.8, 11

	R
●	0.6 - 1.0
●	0.1 - 0.6
⋯	-0.1 - 0.1
⋯	-0.1 >

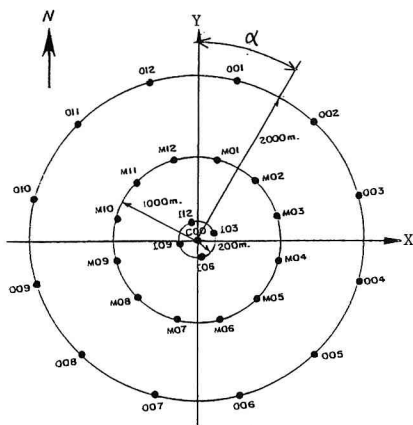


Fig.9 SMART1 Strong Motion Array

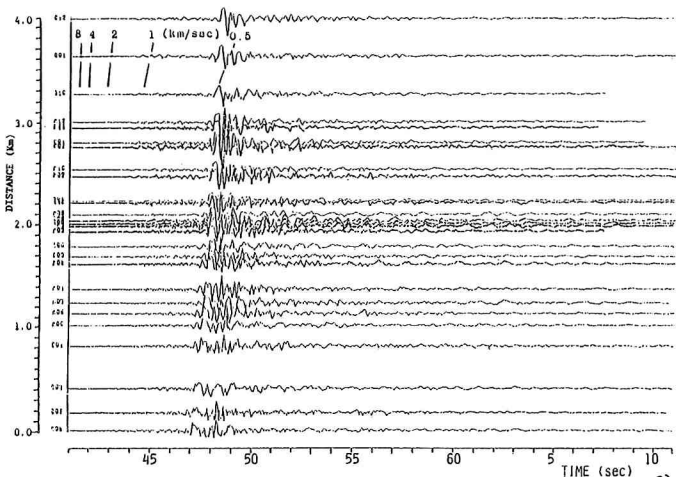


Fig.10 Acceleration Waveforms of The NS Component of Event 5<sup>3)</sup>

ーン化したものであるが、このSMART1データにおいても、やや不明確ではあるが、同じ相関値がライン上に並んでいるのが観察される。これは、図-8で示したように、波がこのラインと直角な方向に伝播していることを示唆するものであり、巨視的ではあるが、波の伝播軸の角度 $\alpha$  (図-9参照)は $\alpha=150\sim 170^\circ$ 程度に読み取ることができる。他のC00, M06, O06を基準点にした場合もほぼ同様なパターンが得られている。したがって、(7)式によって空間相関を計算し、図-8や図-11のようなパターンを描くことによって、波の巨視的な伝播方向が推定できることになる。(しかし、方向の正確な値は、主軸変動率の解析や高精度波数スペクトル解析<sup>3)</sup>によらなければならない。主軸変動率の解析では、波の方向は $\alpha=156.4\sim 176.7^\circ$ と計算されているので、この軸上での各点の距離差と空間相関値をプロットすると、図-12のような結果が得られた。 $\alpha$ が $156.4\sim 176.7^\circ$ と変動している

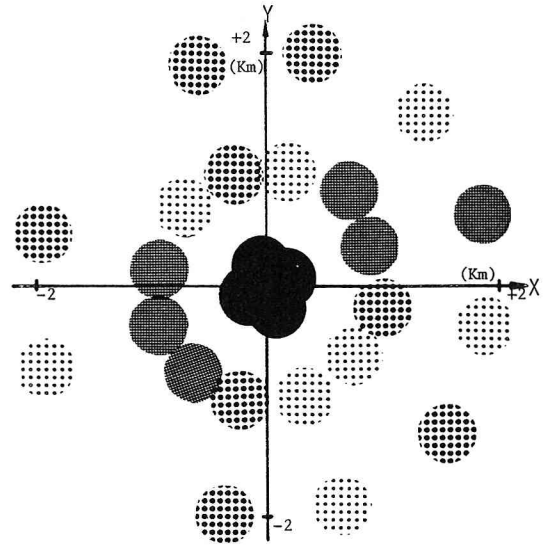


Fig.11 Pattern of Spatial Correlations against 106 from SMART1 Data

しているの、この軸上での各地点間の距離は大きく変化してしまい、図-12のように横軸に幅がでてしまう結果となっている。これを(4)式で近似すると図中の実線で示すようになり、 $b$ の値は $b=1.178 \times 10^3$  (1/m)と求まる。したがって、(3)式と(5)式を用いると $c=(2.177/T_0) \times 10^3$  (m/s)となり、NS成分の卓越周期 $T_0=0.85, 0.35$ を代入すると $c=2.56, 6.22$  (Km/s)となり、これは、文献<sup>3)</sup>の解析結果ともよく一致している。

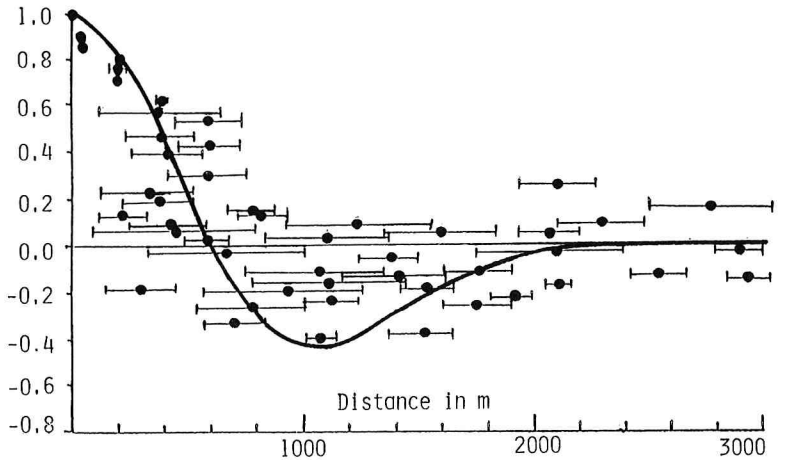


Fig.12 Normalized Spatial Correlation from SMART1 Data, Event 5 NS

### 7. まとめ (7)式の計算は簡

単であり、しかも、確率過程理論とも結合できるので、ここで示した解析方法を使って、地震動の空間的変動の整理ができるものと思われる。今後、このような解析の応用やSMART1データのさらに深い解析を行ないたい。

謝辞: SMART1データのコピーを御好意により提供いただいたカリフォルニア大学バークレー校E.A. Bolt教授およびデータ処理を手伝っていただいた宮崎大学計算センター松田貴子技官に感謝の意を表する次第である。

参考文献 1)原田隆典「Spatial Correlation and Spectrum of Strong Earthquake Ground Displacement」第6回日本地震工学シンポジウム講演集, 1982, 2)織田隆夫, 嶋田剛, 原田隆典「地盤急変部における強震時地盤変位の確率的平面分布特性」第38回年次講演会概要集I, 1983, 3) Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.10, No.4 / July-August 1982, PP. 561-591