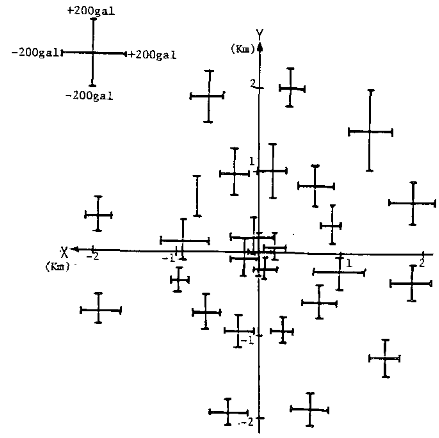
地震計アレー観測記録による地盤変形スペクトルの解析

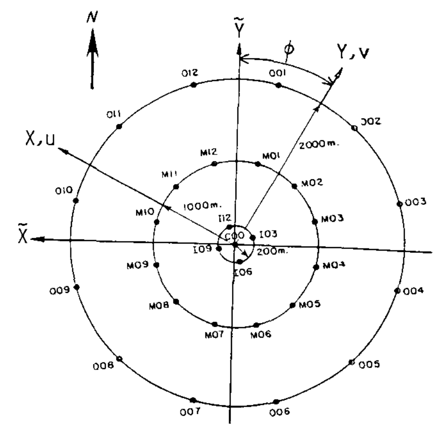
間組(株)　正員　織田　隆夫
宮崎大学工学部　正員　原田　隆典

1. まえがき　図－1はSMART－1による最大加速度の空間分布の一例である。この領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。本文では，地中構造物の耐震解析を目的として，このような地震動の空間的変動について，確率過程理論の援用により，“地盤変形スペクトル”としてまとめたので，その概要を報告する。

2. SMART1データの確率的解析　SMART1では同時観測のできる地震計が図－2に示すように配置されている。本報告の解析は，1981年1月29日，M＝6.9の地震（Event5）の加速度記録の強震部分17秒間を対象に，まず，この加速度記録を変位波に変換した。次に，地震動の伝播方向等の推定を目的に，各地点の記録に対して座標軸を回転させて，uとvの相互相関（$E[u(t)v(t)]$）が零になるように座標回転角φを求めた（図－2参照）。全地点での平均的な値として，φ＝77°を解析に採用した。φ＝77°に対する座標軸に関して，記録されたEW成分とNS成分を変換したものをそれぞれ $u_i(t)$，$v_i(t)$，（i地点）とし，これらが定常均質過程とすると，地震時の地盤の空間相関関数は，(1)式により決定できる。(1)式において，ξ_1，ξ_2は2地点間のそれぞれx方向，y方向の距離，T_uは継続時間である。なお，ここでの空間相関は，各波形の2乗平均でその波形を規準化して得られた波形に対して，(1)式を用いて計算した。こうして求めた空間相関を(2)式のように近似してみた。(2)式において，$\mathbb{a}$ は地盤の変動を規定するパラメータで（メートル）$^{-1}$の次元を持ち，σ_u，σ_vはそれぞれx方向，y方向での地盤変位の標準偏差である。$\mathbb{a}$ の値を求めるために，(1)式より計算したEvent5の空間相関（↑↓）と $a_{u1}=8.8388\times10^{-4}$，$a_{u2}=3.3179\times10^{-4}$として(2)式より求めた値（↑↓）を同時に図－3のように描いてみた。両者のよい一致が認められる。R_vに関しても同様にして，$a_{v1}=6.4282\times10^{-4}$，$a_{v2}=a_{u2}$と決めた。次に，地震時の地盤ひずみについて考える。一般に，2



図－1　最大加速度の空間分布
（SMART-1，Event 5）



図－2 SMART1 地震計アレー

$$R_X(\boldsymbol{\xi})=\frac{1}{T_u}\int_0^{T_u}X(\boldsymbol{x},t)X(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\xi},t)\,dt \quad \cdots\cdots(1)$$

$$R_X(\boldsymbol{\xi})=\sigma_X^2\cdot \mathrm{EXP}\left[-\boldsymbol{\xi}^T\mathbb{a}\,\boldsymbol{\xi}\right]\cdot\left[1-2(a_{x1}\xi_1)^2\right]\cdots(2)$$

(1),(2)式において　$X=u, v$，$\boldsymbol{\xi}=\{\xi_1, \xi_2\}^T$，$\mathbb{a}=\begin{bmatrix} a_{x1}^2 & 0 \\ 0 & a_{x2}^2 \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{x}=\{x, y\}^T$，

$$\mathbb{B}=\lim_{\boldsymbol{\xi}\to 0}\mathbb{C}\cdot\mathbb{D}\quad\cdots\cdots(3)$$

ここで，$\mathbb{B}=\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{bmatrix}$，$\mathbb{D}=\begin{bmatrix} u(x+\xi_1,y)-u(x,y), & u(x,y+\xi_2)-u(x,y) \\ v(x+\xi_1,y)-v(x,y), & v(x,y+\xi_2)-v(x,y) \end{bmatrix}$，$\mathbb{C}=\begin{bmatrix} \frac{1}{\xi_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\xi_2} \end{bmatrix}$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{max}=\{\varepsilon_{xmax}, \varepsilon_{ymax}, \gamma_{xymax}\}^T\cdots(4)$$

ここで，$\varepsilon_{xmax}=\varepsilon_{xxmax}$，$\varepsilon_{ymax}=\varepsilon_{yymax}$，$\gamma_{xymax}=\sqrt{(\varepsilon_{xymax})^2+(\varepsilon_{yxmax})^2}$

次元歪は，(3)式のように各要素ごとに表現できよう。したがって，ひずみを求めるには，(3)式中の$\mathbb{D}$で与えられる4種類の相対変位を求めなければならない。この4種類の相対変位の最大値 d_{lmax} は，確率的に計算すると次式により求められる。

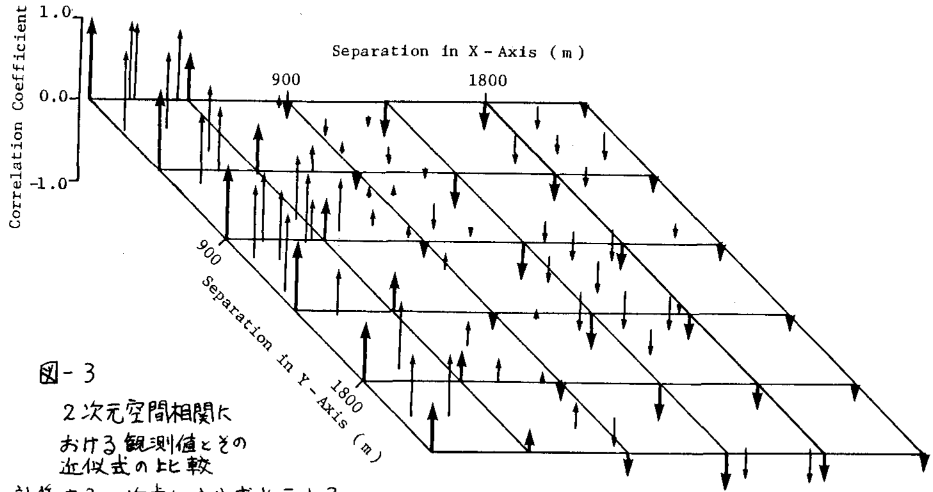


図-3 2次元空間相関における観測値とその近似式の比較

$$\frac{d_{lmax}}{\sigma_D} = \begin{cases}\sqrt{2.6\ln\left(5.0\frac{a_0}{\mathbb{A}}\right)} & (a_0 \geq 0.43\mathbb{A})\\ \sqrt{2} & (\text{その他})\end{cases} \quad (5)$$

ここで

$$\frac{\mathbb{d}_{lmax}}{\sigma_D} = \begin{bmatrix} \frac{d_{xxmax}}{\sigma_{Dxx}}, & \frac{d_{xymax}}{\sigma_{Dxy}} \\ \frac{d_{yxmax}}{\sigma_{Dyx}}, & \frac{d_{yymax}}{\sigma_{Dyy}}\end{bmatrix} \quad \mathbb{A} = \begin{bmatrix} A_{Dxx}, A_{Dxy}\\ A_{Dyx}, A_{Dyy}\end{bmatrix}$$

(5)式において，a_0，$\mathbb{A}$はそれぞれ2次元ポアソン過程における対象領域面積，零を横切る平均面積であり，σ_Dは相対変位の標準偏差で，ξの関数として求められる。したがって，相対変位の最大値 d_{lmax} は，2地点間距離ξの関数として最終的に求めることができる。これより，(3)式により，ひずみ要素$\mathbb{B}$をξの関数として計算できる。図-4の実線は，Event 5 のデータからこのようにして求めた相対変位の最大値d_{lmax}，地盤ひずみ要素の最大値$\mathbb{B}_{max}$と2地点間距離ξの関係を示す。また，データから直接計算したものを{●，▲，○，△}で示している。なお，ひずみ要素は，(3)式の関係より，両対数軸の45°方向の軸として描かれている。このように，地震計アレーによる地震動記録の解析から，図-4で示すような"地盤変形スペクトル"を描くことにより，2地点間の最大相対変位や最大地盤ひずみ，平均波長などが次のように求められる。

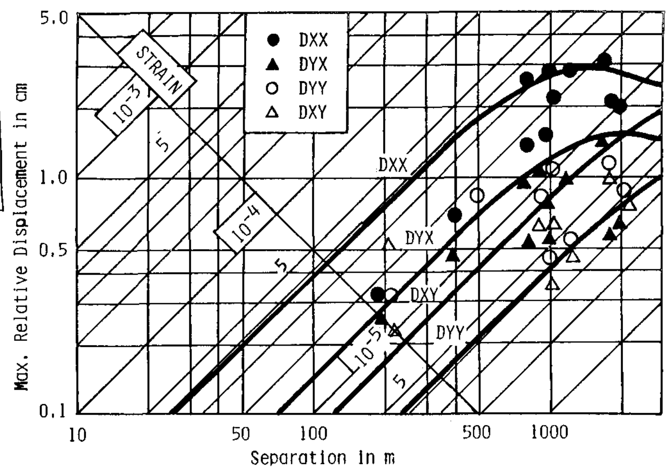


図-4 SMART 1 Event 5 による地盤変形スペクトル

3. 例題

図-4の"地盤変形スペクトル"を用いて，C-00地点とM-07地点（図-2参照）の間の最大相対変位と平均最大ひずみを求めてみる。まず，両地点の距離ξを求めると，$\xi_1=885\,m$，$\xi_2=471\,m$となる。ξに対応する4種類の最大相対変位を図-4の実線から読み取ると，$d_{xxmax}=2.5$ cm，$d_{yxmax}=1.1$ cm，$d_{xymax}=0.4$ cm，$d_{yymax}=0.2$ cm となる。最後に，(3)，(4)式を用いて，平均最大地盤歪を計算すると，

$\varepsilon_{xmax}=2.8\times10^{-5}$，$\varepsilon_{ymax}=4.3\times10^{-6}$，$\gamma_{xymax}=1.5\times10^{-5}$が得られる。

(参考文献) 1)織田隆夫 宮崎大学工学部修士論文，"Probabilistic Analysis of Seismic Array Data"，1984.

2) Harada T. "Probabilistic Modeling of Spatial Variation of Strong Earthquake Ground Displacements" Proc of the 8th WCEE, 1984.