

# スペクトル確率有限要素法を用いた 地表地震断層の危険度評価

中川 英則<sup>1</sup>・堀 宗朗<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員, 博 (工), 茨城工業高等専門学校 自然科学科 講師 (〒 312-8508 茨城県ひたちなか市中根 866)

E-mail:hide@ge.ibaraki-ct.ac.jp

<sup>2</sup>正会員, Ph.D., 東京大学地震研究所 教授 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail:hori@eri.u-tokyo.ac.jp

断層が地表面に達し大きな変状を引起す場合, 断層の地表面への出現の可能性, 出現場所やその形状を予測することは工学的に重要な課題となっている. この予測に際し, 1) 構造・物性が不確かな堆積層のモデル化, 2) 断層の進展に伴う分岐現象の取り扱い, が重要な位置を占める. 本論文では, 堆積層の不確からしさを考慮した確率モデルを与えることを前提に, 堆積層を通して地表面上に現れる応答のばらつきを, スペクトル分解に基づく確率有限要素法を用いて検討する.

**Key Words :** *surface earthquake fault, Non-Linear Spectral Stochastic Finite Element Method, sandbox test, Nojima fault, Chelungpu fault*

## 1. はじめに

表層に出現する地表地震断層の挙動を理解するには, 地質学地震学の理学的知見と地盤工学地震工学の工学的知見が必要であり, 現象の解明や被害の予測には未解決な部分が多いとされる. 地表地震断層のシミュレーションが共通の基盤となると期待されているが, 地質・地盤構造や入力される断層変位のモデル化が困難なことのほか, 数値解析手法が整備されていないことが現状である. このような中, 本研究では地表地震断層問題の数値解析手法として, 非線形スペクトル確率有限要素法 (NL-SSFEM) の開発, 地盤問題への適用, 砂箱モデル実験の再現, を通じてその妥当性と有用性を検討してきた. 本報告は, その開発の現段階までの経過の概略を述べるとともに, その妥当性を検討したものである.

## 2. 非線形確率有限要素法 (NL-SSFEM) の概要

### (1) Karhunen-Loeve 展開, Polynomial Chaos 展開の概要

本研究で用いる非線形確率有限要素法 (NL-SSFEM)<sup>1)</sup> は, 確率過程を 2 種類のスペクトル分解 (Karhunen-Loeve 展開, Polynomial Chaos 展開)<sup>2)</sup> を用いて離散的に表現することで有限要素法に適用できるようにした, R.G. Ghanem and P.D. Spanos による方法<sup>2)</sup> に基づくものである. この手法の本質は, 2 次過程と呼ばれる確率過程が, 離散スペクトル分解によって完全に記述できる点にある. 概略を述べるため, 本研究で用いる確率モデルを具体例にとる. 本研究での未固結層の確率モデルは, 地盤の硬

さの指標であるヤング率を確率変数として設定している. 今, ヤング率  $E$  は,  $E(\mathbf{x}, \omega)$  と, 連続体  $B$  内の点  $\mathbf{x}$  と確率事象  $\omega$  を用いて記述される. ここで, 点  $\mathbf{x}$  を固定したとき, ヤング率は正規分布に従って分布しており, また, 違う 2 地点間でのヤング率の共分散関係が予め与えられると仮定しておく. 式で表すと, 地点毎のヤング率は平均値  $\bar{E}$  とそこからのずれ量を表す関数  $\alpha(\mathbf{x}, \omega)$  を用いて,

$$E(\mathbf{x}, \omega) = \bar{E}(1 + \alpha(\mathbf{x}, \omega)) \quad (1)$$

と書ける. また, 地盤内の 2 地点  $\mathbf{x}, \mathbf{y}$  におけるヤング率 (実質的には  $\alpha(\mathbf{x}, \omega)$  の) 共分散関数  $C(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  は, ばらつきの程度を表す指標である分散  $\sigma$  と相関距離  $\ell$  によって次式のように与えられるものとする.

$$C(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{|\mathbf{x}_1 - \mathbf{y}_1|}{\ell_1} - \frac{|\mathbf{x}_2 - \mathbf{y}_2|}{\ell_2} - \frac{|\mathbf{x}_3 - \mathbf{y}_3|}{\ell_3} \dots\right) \quad (2)$$

ここで, 共分散関数  $C(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  は, 連続体  $B$  が有限で, その中で連続であるとしているため,

$$\int \int_B |C(\mathbf{x}, \mathbf{y})| dx dy < \infty \quad (3)$$

が成り立っている (2 乗可積分). 関数解析学<sup>3)</sup> によれば, このとき  $C(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  は,

$$\int_B C(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \phi_n(\mathbf{y}) d\mathbf{y} = \lambda_n^2 \phi_n(\mathbf{x}) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

を満たす, 規格直交性をもつ固有関数  $\phi_n(\mathbf{x})$  によって,

$$C(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n \phi_n(\mathbf{x}) \phi_n(\mathbf{y}) \quad (5)$$

と無限級数で表現できる<sup>3)</sup>。さらに、固有関数  $\phi_n(\mathbf{x})$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) と、この固有関数  $\phi_n(\mathbf{x})$  によって

$$\xi_n(\omega) = \frac{1}{\lambda_n} \int_B \alpha(\mathbf{x}, \omega) \phi_n(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

と定義される、規格直交性をもつ確率変数  $\xi_n(\omega)$  (平均 0 のガウス分布となっている) を用いることで、確率過程  $\alpha(\mathbf{x}, \omega)$  は、

$$\alpha(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n \phi_n(\mathbf{x}) \xi_n(\omega) \quad (7)$$

と平均 2 乗収束の意味で展開 (Karhunen-Loeve 展開) できる<sup>2)</sup> というものである。なお  $E$  がガウス分布であっても応答である変位  $u_i(\mathbf{x}, \omega)$  が常にガウス分布になるとは限らない。このためガウス分布の基底  $\{\xi_n\}$  のみを使っても  $u_i$  を十分離散化することはできない。確率空間  $\Omega$  においてガウス分布の  $\{\xi_n\}$  によって構成される空間よりも広い関数空間が必要となるため、 $\{\xi_n\}$  を用いた Polynomial-Chaos 展開を適用する。Polynomial-Chaos 展開は、有限個の基底  $\{\xi_n\}$  のみを使って、確率空間  $\Omega$  の多項式環  $\Psi_m$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) を作るというものである。これによって、確率空間  $\Omega$  に属する任意の確率過程は、

$$u_i(\mathbf{x}) = \sum_{m=0}^{\infty} u_m(\mathbf{x}) \Psi_m(\omega) \quad (8)$$

と完全に記述される (Polynomial-Chaos 展開)<sup>2)</sup>。

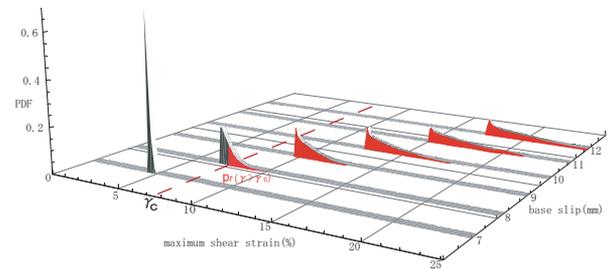
## (2) 非線形確率有限要素法の概要

確率有限要素法は、連続体の支配方程式に現れる確率過程の項を、Karhunen-Loeve 展開と Polynomial-Chaos 展開によって離散的に表し、そこに  $\Psi_m$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) の完全正規直交性を利用したガラーキン法を適用することで得られる<sup>2)</sup>。

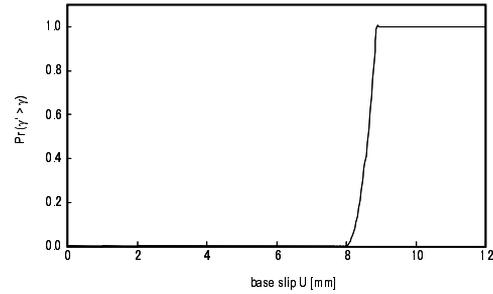
今、微小変形の範囲で、材料非線形性をもつ問題を考える。この際、材料非線形性に伴って現れる降伏関数  $f$  自体が確率的に変動する応力  $\sigma(\omega)$  および塑性係数  $\lambda(\omega)$  の関数であることから、簡単のため次のような平均値まわりでの摂動展開を降伏関数  $f$  に施すことで線形近似する。

$$f(\sigma, \lambda) = f|_{\langle \sigma \rangle} + (\partial_{\sigma} f|_{\langle \sigma \rangle}) : (\sigma - \langle \sigma \rangle) + (\partial_{\lambda} f|_{\langle \sigma \rangle}) \cdot (\lambda - \langle \lambda \rangle) + \dots \quad (9)$$

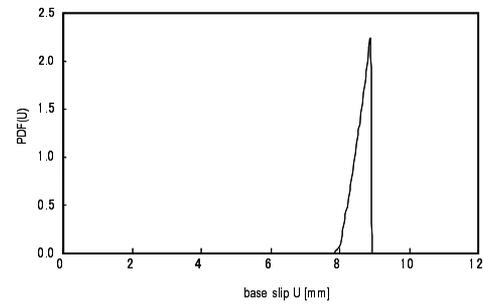
ここで、式 (4) に現れる平均  $\langle \sigma \rangle, \langle \lambda \rangle$  を求めるに当たり、確率場の正確な特性値を事前に求めることは困難である、という新たな問題が浮上する。そのため、上下限体理論<sup>1),4)</sup> に基づいて、以下のようにヤング係数  $E$  の平均を挟む上下限解を求める。この解を元手に、Newton-Raphson 的な繰り返し計算に持ち込むことによって、最終的に非線形な確率場の問題に適用できるようにしたというのが、非線形確率有限要素法 (NL-SSFEM) の大まかな概略である。詳細は、他の文献<sup>1),5)</sup> を参照して頂きたい。



a)  $\gamma$  の累積確率  $Pr(\gamma | \gamma > \gamma_c)$



b)  $U$  の関数としての破壊確率分布  $P_f = Pr(\gamma | \gamma > \gamma_c)$



c) 破壊確率密度関数  $P_f/U$

図-1 ずれ変位  $U$  に対する破壊確率  $P_f$  の求め方。

## 3. ずれ変位 $U$ に対する破壊確率 $P_f$ の求め方

数値解析からは、図-1の a) に示すような各断層水平変位量ごとの確率密度関数が得られる。図-1では、最大せん断歪場の確率密度関数が得られている。確率密度関数は、文献<sup>2),6)</sup> にもあるように、解析的に評価することも可能であるが、式 (8) において、独立な Gauss 確率変数  $\xi_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) を生成してシミュレートすることより評価することが可能である。ここで、模型実験から得られた確率特性結果 (統計的処理によって得られた平均や分散など) と比較するためには以下のような工夫が必要となる。その手順を図-1の a)~c) に示す。1) 各断層水平変位量に対して、地表面上に現れたせん断モードの中心での最大せん断歪の確率密度分布を求める (図-1の a).), 2) 図-1の a) に示す適当に定めた閾値 ( $\gamma_c = 7.8\%$ ) を超えるような最大せん断歪の確率を求め、断層水平変位量を横軸にその確率を縦

表-1 二次元問題に用いた材料パラメータ

mean Young modulus [kN/m <sup>2</sup> ]	20000
density [g/cm <sup>3</sup> ]	1.6
Poisson ratio	0.30
friction angle [deg]	40
cohesion [kN/m <sup>2</sup> ]	38
initial compressive strength [kN/m <sup>2</sup> ]	150.0
initial tensile strength [kN/m <sup>2</sup> ]	33.0
standard deviation of Young modulus [%]	15
correlation length of Young modulus [m]	0.5

表-2 三次元問題に用いた材料パラメータ

mean Young modulus [kN/m <sup>2</sup> ]	1225
density [g/cm <sup>3</sup> ]	1.6
Poisson ratio	0.25
friction angle [deg]	51
cohesion [kN/m <sup>2</sup> ]	38
initial compressive strength [kN/m <sup>2</sup> ]	214.6
initial tensile strength [kN/m <sup>2</sup> ]	26.9
standard deviation of Young modulus [%]	30
correlation length of Young modulus [m]	0.5

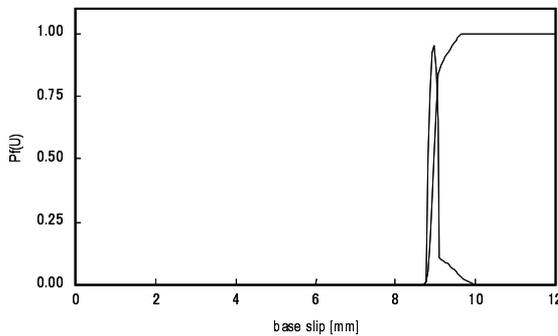


図-2 土槽の強制変位  $U$  と破壊確率  $P_f$

軸に累積確率分布  $Pr(\gamma > \gamma_c)$  を求める (図-1 の b).). この関数は  $U$  とともに変化するため  $P(\gamma, U)$  とする. 3) 図-1 の b) から, せん断モードが地表面上に現れるのに必要な断層水平変位量の確率密度分布  $P_f(U) = Pr(\gamma_c, U)$  (累積確率分布を微分したもの) を求める (図-1 の c).).

#### 4. 断層モデル実験<sup>7),8),9)</sup>の数値シミュレーション

シミュレーションの妥当性を検証するために, 断層モデル実験の結果との比較を行った. 実際の断層と砂箱を用いた断層モデル実験では破壊過程のメカニズムは共通である. したがって, 寸法や構成則のパラメータは異なるものの, モデル実験の結果を再現することは確率モデルと非線形スペクトル確率有限要素法を用いたシミュレーションの妥当性を示す第一歩となる. 実験条件が明確なモデル実験の再現を試みる.

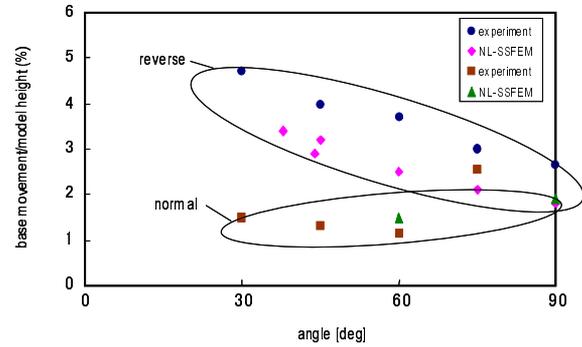


図-3 傾斜角  $\alpha$  と断層のずれ量  $D$

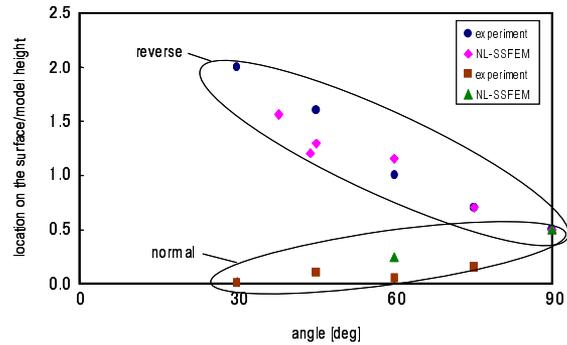


図-4 傾斜角  $\alpha$  と地表面到達位置  $W$

#### (1) 縦ずれ断層モデル実験の概要

縦ずれ断層モデル実験は, 未固結層を土槽, 入力される断層変位を土槽底部の一部に加える強制変位としたモデル実験である. 逆・正断層に対しては二次元の平面ひずみ状態を設定した土槽を使って行われる. 土槽の底盤は2つのブロックに分かれており, 片方のブロックをジャッキで準静的に持ち上げる. 土槽は乾燥した豊浦標準砂 (比重  $G_s = 2.635$ , 平均粒径  $D_{50} = 0.17\text{mm}$ ) を用い, 空中落下法により層厚 40cm の密詰 (間隙比  $e = 0.7$ ) となっている. 0.5~2.0mm 毎に土槽底面の鉛直変位を与える.

#### (2) 数値シミュレーションの概要 (縦ずれ)

実験に使われた豊浦標準砂の物性は, 比重, 平均粒径, 間隙比までしか分かっていないが, 後に谷<sup>10)</sup>によって, 非線形有限要素法およびジョイント要素を組み込んだ有限要素解析を用いた実験の数値解析が報告されている. ここでは, 解析に用いる物性値として, 1g レベル下で実験を考慮し, 低拘束圧下での平面ひずみ状態での密詰め豊浦砂に対応した概略値を用いている. 本数値シミュレーションでは, 谷によって行われた数値解析<sup>10)</sup>をもとに, 物性を表-1 に示すように決めた.

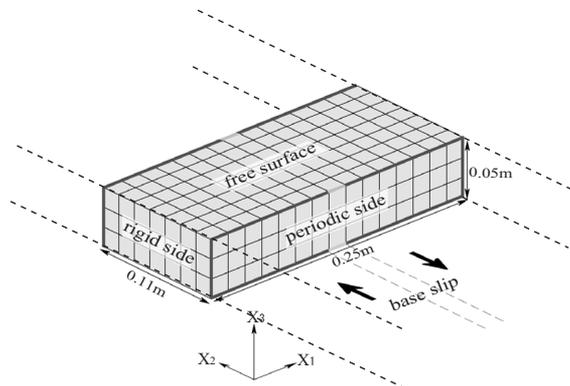


図-5 三次元問題の要素分割

### (3) 数値シミュレーション結果と実験の比較 (縦ずれ)

図-2に破壊確率  $P_f$  をプロットする．図-2には  $P_f$  の微係数  $P_f/U$  もプロットしている．これは破壊の確率密度関数である．強制変位が  $U = 8.8[\text{mm}]$  を超えた点から  $P_f$  は0でなくなり， $U = 9.5[\text{mm}]$  でほぼ1となる．また  $P_f/U$  の分布もこの間に集中している．強制変位  $U = 8.8[\text{mm}]$  の状態は，土槽表面にせん断帯が達した状態と対応している．また，限界強制変位は約  $1[\text{mm}]$  程度のばらつきを持つことが示唆される．

土槽表面へのせん断帯の出現やそのばらつきがシミュレーションによって再現されたため，次に土槽表面でのせん断帯の形状を実験結果と比較した．所定の強制変位を与えた時の表面のずれ変位の量  $D$  と到達位置  $W$  を形状のパラメータとする．この二つのパラメータは土槽底部の強制変位の傾斜角  $\alpha$  と土槽の厚さ  $H$  に依存するが，実験では  $D$  や  $W$  は  $H$  に比例する結果が得られている．そこで正断層と逆断層の両方に対し， $\alpha$  を変えた時の相対ずれ変位量  $D/H$  と相対到達位置  $W/H$  を図-3と図-4に示す．実験結果も合わせてプロットしている．正断層では  $D/H$  と  $L/W$  の  $\alpha$  の依存度は小さく，逆断層では  $\alpha$  が増加するに連れて  $D/H$  と  $L/W$  が減少する，という二つの傾向が再現されている．また実験とシミュレーションの  $D/H$  と  $L/W$  の違いは10%以下であり，定量的にもシミュレーションが良好に実験結果を再現した結果となっている．

### (4) 横ずれ断層モデル実験の概要

次に，砂箱を用いた横ずれ断層の三次元モデル実験を取り上げる．この既存のモデル実験の詳細をつかむに当たっては，小山による論文<sup>8),9)</sup>を参照した．砂箱底部に様な横ずれ変位を与えて，箱表面での雁行状リーデルせん断の発生からリーデルせん断を貫く一つのせん断帯の発生までの過程が観察されている．砂箱は長手方向に中央で二分割され片方が水平移動する．可動側の底盤は， $0.01[\text{mm}]$  目盛りのダイヤルゲージで制御されている．実験には，気乾燥状態の豊浦標準砂 (平均粒径  $D_{50} = 0.17\text{mm}$ ，含水比

表-3 リーデルせん断の斜交角  $\theta_R$  [deg].

	3cm	5cm	7cm
experiment	26	31	27
SSFEM	23	29	31

表-4 リーデルせん断の間隔  $S_R$  (cm).

	3cm	5cm	7cm
experiment	10.5	11.0	11.0
SSFEM	10.8	11.6	11.0

表-5 リーデルせん断の末端の長さ  $R_R$  (cm).

	3cm	5cm	7cm
experiment	2.5	7.0	8.0
SSFEM	2.0	2.5	5.0

表-6 せん断帯が表面に達するのに必要な砂箱底部のずれ変位  $U_c$ /層厚  $H$ .

	3cm	5cm	7cm
experiment	0.17	0.14	0.11
SSFEM	0.18	0.17	0.16

$w = 0.105 \sim 0.150\%$ ) を用いる．砂箱は密詰め (間隙比  $e = 0.648$ ，比重  $G_S = 1.59$ ) で厚さ約  $1[\text{cm}]$  敷き詰めるとに敷き均し，パイプレーターで締め固めを行っている．

### (5) 数値シミュレーションの概要 (横ずれ)

砂箱を用いた横ずれ断層実験に合わせて，図-5に示すように層厚  $D_{X_3}$  を3,5,7cmと変えた場合について数値解析を行った．砂箱を用いた実験によれば，層厚が12cm以下では，横ずれの進展に伴い地表に現れてくるリーデルせん断の間隔は層厚によらずにほぼ一定を保ち，その間隔は11~12cm前後と報告されている<sup>8),9)</sup>．このため，図-5に示すように解析モデルの奥行きを11cmとし，モデルの前後面に周期境界条件を設定した．材料パラメータを表-2に示す．層厚が3~7[cm]と非常に浅く，そのため静止土圧が側方拘束圧として砂箱作成の初期段階で働いていたと考えられる．これは超低拘束圧下での砂の変形問題である．このため，弾性係数として，低拘束圧下の材料試験 (岐阜砂) で報告<sup>11)</sup>されている乾燥砂の静的状態下での値 ( $E = 12.5[\text{kgf}/\text{cm}^2]$ ) を代用した．内部摩擦角は，砂箱を用いた横ずれ断層実験で報告されている値である．初期の一軸最大圧縮強度および一軸最大引張り強度はパラメトリックスタディで決定した．これは， $D_{X_3} = 3[\text{cm}]$  のモデルに対して，リーデルせん断が表面に現れる時点の底面の変位量が，モデル実験の値と一致することで決まっている．

### (6) 数値シミュレーション結果と実験の比較 (横ずれ)

次にシミュレーションの妥当性を定量的に検証するため，表面に現れたせん断帯の幾何形状を実験のものと比較する．幾何形状のパラメータとして，斜交角  $\theta_R$ ，間隔  $S_R$ ，末端の長さ  $R_R$  の三つを取り上げる．表-3に三ケースの層厚での  $\theta_R$  の値の比較を示す．実験の値とともに  $S_R$  と  $R_R$  およびせん断帯が表面に達するのに必要な砂箱底部のずれ変位  $U_c$ /層厚  $H$ ，を表-4~と表-6に示す．各々の

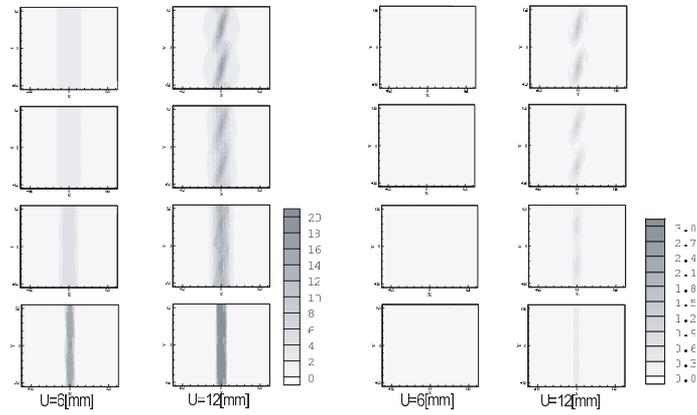


図-6 砂箱内の最大せん断ひずみ  $\langle \gamma \rangle$  の平均 (左) と SD(右) の分布:  $D_{X_3} = 5[\text{cm}]$ , 砂箱底部のずれ変位が  $U=6[\text{mm}]$  と  $12[\text{mm}]$  の時点の比較

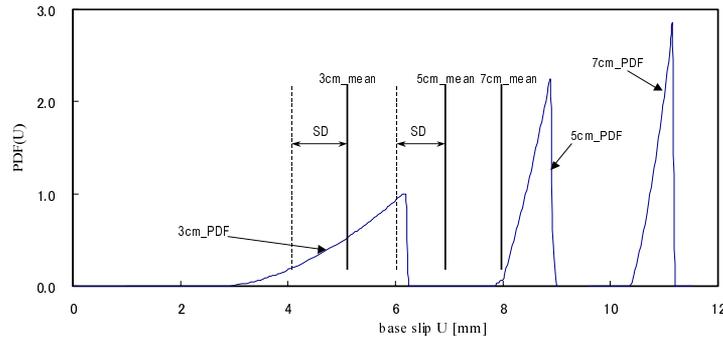


図-7 破壊の確率密度関数  $P_f/U$

パラメータについてシミュレーションと実験の値の違いは最大 10%程度であり, 良好に一致していることがわかる. 図-6 に, 層厚  $D_{X_3} = 5[\text{cm}]$  モデルの, 砂箱底部のずれ変位が  $U=6[\text{mm}]$  と  $12[\text{mm}]$  の時点における, 砂箱の各深さ位置での最大せん断ひずみ  $\langle \gamma \rangle$  の平均 (左図) と SD(右図) の分布を示す. 底面では, ずれ面に沿って一様な最大せん断ひずみ分布が得られているが, ずれ変位が大きくなるに伴って, 砂箱表面には雁行状が形成されている様子がシミュレートされている. 図-7 に  $P_f$  と  $P_f/U$  を合わせてプロットした. 図-7 には,  $D_{X_3} = 3, 5, 7[\text{cm}]$  のケース全てを載せている. 図-7 には合わせて, モデル実験の結果, 統計的計算で得られた  $U_c$  の平均と分散も示している. ここで, モデル実験ではせん断帯が表面に現れた時の砂箱底部の変位  $U_c$  のみが計測されていることに注意する. 平均は概ね一致するものの ( $D_{X_3} = 7[\text{cm}]$  のケースは 1 データのみしか取られていないので除外視した), シミュレーションでは分散を過小評価する傾向にある. また, 図-7 から明らかなように,  $D_{X_3}$  が増すごとに  $P_f$  の分布が集中するようになり, その結果  $U_c$  の標準偏差が小さくなっている. これは未固結層の層厚が大きくなるにつれて, 断層が地表面に現れることに必要な固結層の断層変位のばらつきが小さくなることを意味しているが, シミュレーションによるこの結果の妥当性を検証することは現時点ではできない.

## 5. 未固結地盤モデルの構築法

本章では, 実際の地表地震断層に確率モデルと NL-SSFEM を適用し, 地表地震断層の発生の有無や発生確率, 観察されたずれ変位の量の再現などを試みる. まず, 実際の未固結層に対して確率を考慮したモデルの構築方法について説明する. ついで野島断層と台湾の車籠埔断層を取り上げ, その再現を試みるとともに, 妥当性を述べる.

### (1) 確率を考慮した未固結地盤モデルの構築

本研究が対象とする未固結層は, 地震学的には第四紀に形成された完新統を指す. 地盤工学で扱う表層地盤であり, 地震工学では工学的基盤の上の堆積層である. したがって, 層の厚さは数メートルから数十メートル程度 (最大でも百メートル程度) である. 未固結層の形状においては, 我が国のように比較的急峻な地形では未固結層は成層構造をなすことは稀と考えられる. したがって, 対象とする未固結層に明瞭な地層がない場合には, 複雑な地層構造を未固結層の確率モデルに取り込むことは難しく, 未固結層を一つの層として確率的にモデル化せざるを得ない. 一方, 明瞭に区分される地層がある場合には, 層間の境界の位置にばらつきを与えることで, より高度な確率モデルを構築することができる. 地盤の構成則に関しては, 正確な形状を構築することが難しいことを考えると, 複雑なもの

表-7 野島断層の数値解析に用いたパラメータ

mean Young modulus [kN/m <sup>2</sup> ]	6125
density [g/cm <sup>3</sup> ]	2.1
Poisson ratio	0.25
friction angle [deg]	51
cohesion [kN/m <sup>2</sup> ]	38
initial compressive strength [kN/m <sup>2</sup> ]	215
initial tensile strength [kN/m <sup>2</sup> ]	27
standard deviation of Young modulus [%]	10, 30
correlation length of Young modulus [m]	2, 10, 50

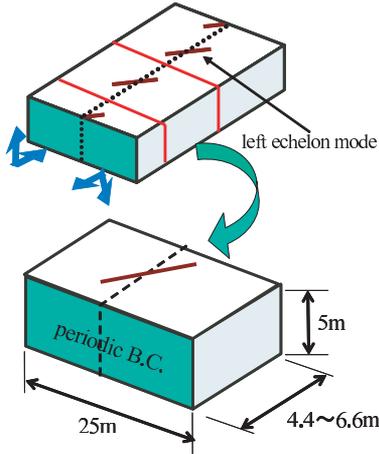


図-8 解析モデルの境界条件

を使うことは合理的ではない。これはまた、材料特性の計測が難しいためでもある。よって、本解析では  $c, \phi$  の2つのパラメータに基づく簡単な構成式として Druker-Prager 型の降伏関数を用いている。その際、 $c$  と  $\phi$  などの塑性に関するパラメータ、地盤の硬さを示すヤング率は、弾性波速度や  $N$  値からある程度の推定が可能<sup>12)</sup> であり、またポアソン比に関しては地盤の種類によってある程度推定できる<sup>13)</sup> ことから、これらを利用することにした。

## (2) 未固結層に与えられる変位の推定

対象とする未固結層に与えられる地盤変位を推定する必要がある。トレンチ調査などの詳細なデータがある場合には、計測された変位量を用いることができる。しかし多くの場合、基盤変位量が計測・推定されていることは少ない。足立ら<sup>14)</sup> は、基盤変位の推定に、地表面での変位量とマグニチュードの関係を統計的に求めた既往の関係式に約 10% 程度のばらつきを考慮したものを採用している。本研究においても詳細なデータが無い場合には、統計的に求めた既往の関係式を用いることにする。ただこの場合、幾つかの推定された基盤変位量のうちの最大値を採用する。最悪のシナリオである最大基盤変位を入力してみても、もしこの基盤変位量であっても、変位量が未固結層内で吸収され地表に大した地盤変位が現れないのであれば、これは完全ではないにせよかなり安全側にあると考えられるためである。さて、以上の確率モデルの構築方法に従って、実際の地表地震断層を例に、そのシミュレーションを以下で行う。

表-8 野島断層の実測データと数値計算との比較

	Nojima	SSFEM
configuration	left echelon mode	left echelon mode
$\theta_R$ [deg.]	22~35	25
$S_R$ [m]	4~6	5.9
$W_R$ [m]	0.5~1.5	1.4

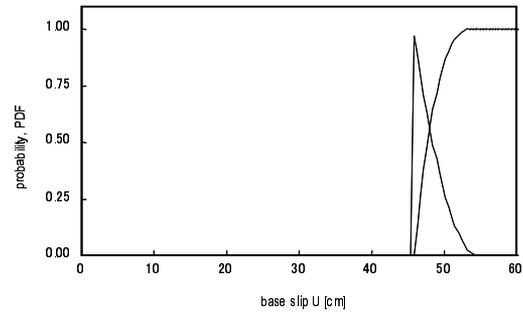


図-9 野島断層における地盤の破壊確率分布

## 6. 地表地震断層のシミュレーション

(1) 野島断層(梨本地区)の概要<sup>15)</sup> と地盤の確率モデルシミュレーションでは、横ずれ成分が卓越した断層の例として、野島の梨本地区を対象に取り上げた。小河川沿いにあるこの地区は、表層が粘土層と砂礫層からなる軟弱地盤である。花崗岩層は 4~6[m] 下に現れるため、未固結層の厚さはその程度であることが推定される。断層変位量は、右横ずれ成分 0.7~1.0[m]、鉛直成分は南東側隆起となるセンスを正として -0.35~-0.40[m] であることが報告されている<sup>15)</sup>。

確率モデルの形状は層厚 5[m] の水平層とした。左雁行断層を表現するため、確率モデルの走向方向には周期性を仮定した。走向方向の長さを文献<sup>15)</sup> に基づき 6[m] 前後の間で変化させ、断層発生に必要な仕事を最小にすることで周期性、すなわち、左雁行断層の長さを決定した。境界条件の影響を除くため走向直角方向の長さを 25[m] とした。弾性係数は  $N$  値に基づいて決定した。大阪層群は一般に上部で  $N$  値は 20 以下であり、粘土層では 10 前後、砂礫層では 30 を超えることは少ないとされる。梨本地区が粘土層と砂礫層からなることから  $N$  値を 8.9 と設定した。これより、ヤング率の推定式<sup>12)</sup>  $E=7 \times N$  [kgf/cm<sup>2</sup>]  $\simeq 6125$  [kPa] と設定した。解析モデルの物性を表-7 に示す。

## (2) 野島断層(梨本地区)の解析結果と考察

断層の形状パラメータ(形状、長さ、斜交角度、幅)を実測値と比較したものを表-8 に示す。未固結層の詳細を取り込んだ高度なモデルを構築することができない以上、実際の断層進展を正確にシミュレートすることは難しい。これを前提とすると、シミュレーションによって推定された断層形状のパラメータが実測値と良好に一致していることは注目に値する。簡単な確率モデルの解析にも関わらず予測が成功した理由は、形状や材料パラメータ、そして基盤の断層変位に関して比較的良質のデータが設定されたこ

表-9 車籠埔断層の数値解析に用いたパラメータ

mean Young modulus [kN/m <sup>2</sup> ]	20000
density [g/cm <sup>3</sup> ]	1.6
Poisson ratio	0.25
friction angle [deg]	40
cohesion [kN/m <sup>2</sup> ]	35
initial compressive strength [kN/m <sup>2</sup> ]	150
initial tensile strength [kN/m <sup>2</sup> ]	32
standard deviation of Young modulus [%]	30
correlation length of Young modulus [m]	1.0

表-10 車籠埔断層 南投県草屯地区での実測データと

数値計算との定性的比較.

	Chelungpu	SSFEM
D [m]	( 1.3 )	0.040~0.045
W [m]	1.4	1.2

※ (・) shows the maximum dislocation of real fault.

とが挙げられる。破壊確率は、断層が地表に出現する確率であり、基盤変位の関数として与えた。図-9より、基盤変位量が53[cm]以上で確実に地表面に到達することが分かり、実際の変位量(78~108[cm])では、確実に地表面上に断層が出現する結果となった。断層形成のメカニズムを取り込んだシミュレーションによって、野島断層に関しては、地盤構造や基盤変位から発生する断層形状をある程度の精度で予測できることが確認された。このため、シミュレーションから得られる破壊確率に対しても同程度信頼することができると考える。地表地震断層の発生に関して、「発生」か「非発生」の二つの選択しかない現状を考えると、基盤変位の大きさに応じた破壊確率が評価できることは、少なくとも一歩は前進したと思われる。しかし、モデル設定や解析手法を考慮すると計算された破壊確率の精度には限界があることは注意を要する。したがって、例えば図-9の破壊確率を用いて、シミュレーションの結果を地表地震断層発生の発生に関する下記のような三段階の評価にまとめることが考えられる。したがって、震源断層の最大ずれ変位と過去の事例を用いて該地点での基盤変位が推定される場合、上記のシミュレーション結果から、断層発生の危険度が三段階で評価できることになる。

基盤変位 [m] < 0.40	発生危険なし
0.40 < 基盤変位 [m] < 0.55	発生が懸念
0.55 < 基盤変位 [m]	発生危険高い

### (3) 車籠埔断層(南投県草屯)の概要<sup>16)</sup>と地盤の確率モデル

次に、縦ずれ成分が卓越した断層の例として台湾集集地震の際に地表に出現した、南投県草屯の近傍における車籠埔断層を例として取り上げた。草屯市街地南東約1kmにおいて詳細なトレンチ調査が、河床からの比高約2mの沖積段丘に形成された地震断層について行われている<sup>16)</sup>。トレンチより、礫層、細砂~砂質シルト層、表土が露出したと報告されている。断層が未固結層に入る角度は、未固結層の下部(礫層)で60度となっている。基盤における断

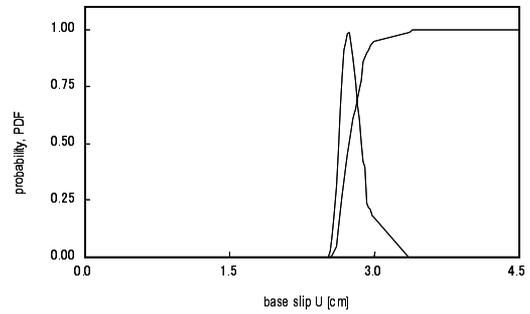


図-10 車籠埔断層における地盤の破壊確率分布

層のずれ変位量は約1.3mである。本解析では、比較的剛な礫層をその上位の細砂~砂質シルト層(未固結層)の基盤と仮定して、Dip角60[deg]で逆断層が斜め横ずれ的に入るものとした。解析モデルは、幅4.8m、層厚1.2mとした。未固結層の地盤物性を表-9に示す。

### (4) 車籠埔断層(南投県草屯)の解析結果と考察

シミュレーションで得られた断層形状を実測値と比較する。比較項目は、どれぐらいの基盤ずれ変位量であれば地表面に断層が到達するかD[m]、地表面での断層の到達位置W[m]、である。表-10において、車籠埔断層の基盤ずれ変位量Dを(・)で示しているが、これはトレンチ調査によって分かった未固結層の底部でのずれ量である。数値解析では、基盤ずれ変位量が4.0[cm]~4.5[cm]になった時に地表面に断層が到達する結果となった。これは、未固結層の厚さの3.3~3.8[%]であり、既存の断層モデル実験や数値解析による研究<sup>17),18),19)</sup>でも同様の結果が得られている。また、地表面での断層の到達位置W[m]に関しては、ほぼ未固結層の厚さと同じぐらいになっており、こちらも断層の入射角(Dip-angle)が60[deg]の場合の、既存の断層モデル実験や数値解析による研究<sup>17),18),19)</sup>と同様な結果となった。実際のトレンチ調査では、地表面上に露出した断層のずれ部分がそのまま地表面上にくずれて覆い被さっていたことから、これを考慮して実際の到達位置を1.4[m]と判断した。図-10に、破壊確率とその密度分布を示す。破壊条件は、(局所化域中央での最大せん断ひずみ) > 2.5[%]とした。基盤のずれ変位が3.5~4.0[cm]程度で地表地震断層が出現する可能性があり、4.5[cm]以上ではほぼ確実に地表地震断層が出現する、という結果である。トレンチ調査で観測された未固結層の底部でのずれ量が1.2[m]であることから、シミュレートされた破壊確率の範囲が観測値を完全に含んでいることが分かる。実際に地表面に現れた断層は、地表面に露出した部分が鉛直自立することができないほど高く、そのまま地表面上にくずれて覆い被さっていたことがトレンチ調査で報告<sup>16)</sup>されていることから、未固結層の底部でのずれ量120[cm]は、地表地震断層が出現するには層厚に比して十分過ぎるずれ量であったことが分かる。

## 7. 結論

未固結層の詳細を取り込んだ高度なモデルを構築することができないことを前提とすると、シミュレーションによって推定された断層形状のパラメータが実測値と良好に一致していることは注目に値する。ここで、比較的簡単な確率モデルの解析にも関わらず予測が成功した理由としては、トレンチ調査に基づく、形状や材料パラメータ、そして基盤の断層変位に関して比較的良質のデータが設定されたことが挙げられる。しかしながら、解析を行ってゆく上で、地表地震断層が現れた場所での形状や材料パラメータに関する情報(特にN値などの地盤情報)は現在かなり限られている。断層形状を再現・予測に関して、未固結層の断層進展過程のシミュレーションによる精度を高める上でも、これから先、地表地震断層が現れた場所でのさらなる地盤情報の蓄積が益々重要であるといえる。

## 8. 謝辞

本研究は、科学技術振興事業団および日本学術振興会の科学研究費補助金の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) M.Anders and M.Hori: Stochastic finite element method for elastoplastic body, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, 46, 1897-1916, (1999).
- 2) R.G. Ghanem and P.D.Spanos, *Stochastic finite elements: a spectral approach*, Springer, Berlin (1991).

- 3) F.Riesz, B.Sz.Nagy (編川正吉, 清原岑夫 共訳): 関数解析学, 共立出版, 1974.
- 4) M.Hori and S.Munashinge: Generalized HashinShtrikman variational principle for boundary-value problem of linear and nonlinear heterogeneous body, *Mechanics of Materials*, 31, 471-486, (1999).
- 5) 中川英則, 堀宗朗, M. Anders: 地表地震断層シミュレーションのための弾塑性確率有限要素法とその計算例, 土木学会 応用力学論文集 Vol. 4, pp. 453-458, 2001.
- 6) 本田利器: スペクトル確率有限要素法によるランダム場の波動伝播解析, 土木学会論文集 Vol. 689, 1-57, pp. 321-331, 2001.
- 7) 谷和夫, 金谷守, 大波正行, 福田昌幸: 基盤の断層変位に伴う砂層の変形, 土木学会第46回年次学術講演会, III-479, pp. 980-981, 1991.
- 8) 小山良浩, 谷和夫: 横ずれ断層実験で観察された砂地盤上に発達するせん断層の変形構造, 第28回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, III-97, pp. 496-497.
- 9) 小山良浩: 横ずれ・斜めずれ断層実験で観察された砂地盤上に発達するせん断層の構造分析, 横浜国立大学 卒業論文, 2001.
- 10) 谷和夫: ジョイント要素を用いたFEMによる逆断層の模型実験のシミュレーション, 地盤の破壊と歪みの局所化に関するシンポジウム発表論文集, VIII-2, pp. 215-222, 1994.
- 11) 石田毅, 渡辺啓行, 伊藤洋, 北原義浩, 松本正毅: 低拘束圧下の模型実験材料(岐阜砂等)の静的・動的特性, 電力中央研究所研究報告, 1981.
- 12) N値の話編集委員会: N値の話, 理工図書, 1999.
- 13) 三木五三郎, 中瀬明男, 福住隆二, 持永龍一郎: 演習 土質工学, オーム社, 1994.
- 14) 足立幸郎, 吉村敏志, 中田恒和: 断層運動による地盤変位が地中構造物に及ぼす影響, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集
- 15) 谷和夫, 上田圭一, 阿部信太郎, 仲田洋文, 林泰幸: 野島地震断層で観察された未固結な表層地盤の変形構造, 土木学会論文集 Vol. 568, III-39, pp. 21-39, 1997.
- 16) 杉山雄一, 李元希, 関口春子, 穴倉正展, 太田陽子: 車籠埔断層の活動性及び集集地震時変位量と台湾西部のアクティブテクトニクスに関する研究, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター, 活断層・古地震研究報告 第1号 (2001年), pp. 301-313, 2001.
- 17) 谷和夫, 金谷守, 大波正行, 福田昌幸: 基盤の断層変位に伴う砂層の変形, 土木学会第47回年次学術講演会, III-236, pp. 512-513, 1992.
- 18) 鬼塚信弘, 伯野元彦, 堀宗朗, 岩下和義, 鈴木崇伸: 逆断層運動に伴う表層地盤の変形シミュレーション, 土木学会 応用力学論文集 Vol. 3, pp. 577-584, 2000.
- 19) 谷山尚, 渡辺啓行: 逆断層運動に伴う砂質表層地盤の変形に関する研究, 土木学会論文集 Vol. 591, 1-43, pp. 313-325, 1998.

(2003.6.6 受付)

## APPLICATION OF SPECTRAL STOCHASTIC FINITE ELEMENT METHOD TO SURFACE EARTHQUAKE FAULT PROBLEMS

Hidegori NAKAGAWA, Muneo HORI

In order to provide quantitative estimate of hazards due to surface earthquake fault, the authors have been developing a numerical simulator based on the Non-Linear Spectral Stochastic Finite Element Method. In the first part of this paper, we report the current state of the simulator, as it succeeded to reproduce observations of model experiments using sand box. In the second part, we calculate the ground surface deformation caused by Nojima fault and Chulungpu fault and examine numerical results qualitatively and quantitatively in the meaning of character and probability by comparing with the real data based on trench investigation.