

スペクトル確率有限要素法の地表地震断層問題への適用

Application of NonLinear Spectral Stochastic Finite Element Method
to Surface Earthquake Fault Problems

中川 英則*・堀 宗朗**

Hidenori NAKAGAWA and Muneo HORI

*正会員 工博 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)

**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)

For the safety of civil structures, it is required to predict the possibility of ground surface deformation caused by a surface earthquake fault. In order to provide quantitative estimate of hazards due to surface earthquake fault, the authors have been developing a numerical simulator based on the NonLinear Spectral Stochastic Finite Element Method. In this paper, we report the current state of the simulator. We calculated the ground surface deformation caused by Nojima fault and Chulungpu fault and examined numerical results qualitatively and quantitatively in the meaning of character and probability by comparing with the real data based on trench investigation. The numerical result is consistent with the real data based on trench investigation in the meaning of configuration of shear bands and amount of the base slip at which the shear bands appear on the surface.

Key Words : surface earthquake fault, NonLinear Spectral Stochastic Finite Element Method, Nojima fault, Chelungpu fault

1. はじめに

我が国での活断層対策は、ダムや原子力発電所などの重要構造物の立地に際し、トレンチ調査を始めとする周到で大掛かりな調査が行われ活断層の位置を外すような配慮が執られている。一方、新幹線、高速道路などの線状構造物は、必然的に活断層を横断して延伸されるが、断層変位による直接的な被害を想定した設計や規制は未だされていないのが現状である。このような背景から、何かしらの活断層対策が必要不可欠とされている。中田¹⁾によれば、少なくとも学校、病院などの公共施設や危険物貯蔵施設、主要ライフラインの設置・建設については何らかの規制措置が早急に取られるべきであるとされる。さらに、地震発生場所や地震規模に関する活断層研究を地道にこれからも進め、具体的な「発生場所と規模」の情報に基づく予測を行うことが地震防災にとって重要であり、より効果的であると述べている。

では、具体的な予測はどのようにすればできるのだろうか。それにはまず、地表地震断層の特徴を知った上で、予測のための問題設定を打ち立てることが必要不可欠となろう。山崎²⁾は、地表地震断層の出現形態が多様化する原因として、断層線沿いの ①未固結被覆層の厚さの地域差、②地震断層の変位量の地域差、③断層面の傾斜の地域差、などが挙げられるとした上で、その中でも特に、断層を覆う沖積層などの未固結被覆層と地震断層変位量によって決定されるのではないかと述べている。

そして、出現形態と変位量および未固結堆積物の厚さの関係を利用して、将来出現し得る断層地形の予測や、将来の断層運動時の地表変位量を推定することは可能であると報告している。同様に、未固結被覆層を通しての地震断層挙動の予測という視点に立った、モデル実験や数値計算に基づく研究^{3,4,5,6,7,8)}が今までにも多く行われてきた。

しかし、実際の地震断層挙動が未固結被覆層を通して地表面に及ぼす影響は様々であり場所ごとに大きくばらつくため、地表地震断層の出現予測は未だなかなか難しいと言わざるを得ない。この大きなばらつきの原因として、一つには未固結被覆層の厚さの違いも含めた地盤構造の不均一性が考えられる。もう一つには、地表地震断層の多様な出現形態が作られるための主要なメカニズムとして、過去の報告⁹⁾にあるように分岐現象が何回か継続して起こることが考えられる。そこでは、モデル実験を通して破壊過程に繰り返し分岐が起こることが観察されており、対応する数理問題には多数の分岐解が存在することが示されている。したがって、これらを考慮すると、決定論的な力学モデルではなく確率モデルが代替案となる。この確率モデルは、同定できない構造の不確からしさを確率的なばらつきとして表現するものであるが、同時に分岐をうまくシミュレートできることが要求される。Maciej・堀¹⁰⁾は、材料のヤング率が地点毎にばらつきを持つような確率モデルに対し、非線形スペクトル確率有限要素法(以下、NL-SSFEM と呼ぶ)を開発し、モデルの確率的な挙動

を上手く捕らえることに成功している。

そこで著者らは、地表地震断層が地表面に及ぼす影響の大きなばらつきや分岐現象を取り扱うため、この NL-SSFEM を地表地震断層問題に適用し、改良を行ってきた¹¹⁾。さらに、数値計算の妥当性を検証するため、谷らによって行われた砂箱を用いた断層モデル実験の数値シミュレーションを試みてきた¹²⁾。本論文は、実際の地表地震断層に地盤の確率モデルと NL-SSFEM を適用し、地表地震断層の発生の有無や観察されたずれ変位の量の再現を試みた結果の報告である。第2章では、実際の未固結層の確率モデルを構築する方法について説明する。この確率モデルでは、材料特性に関するパラメータを設定する必要があるが、このパラメータの設定についての説明である。ついで、第3章、第4章において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、妥当性を検討している。尚、以下では NL-SSFEM の説明を割愛している。これに関しては、書籍¹³⁾や論文¹⁴⁾を参照されたい。

2. 確率を考慮した未固結地盤モデルの構築

2.1 検討対象地盤

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。実際、未固結層の地盤構造は非常に複雑となっている。例えば、隣接する箇所ではボーリング調査をする場合に、ボーリングコア内の層の厚さは勿論、層の順序が異なることも多い。また、トレンチ調査でも、壁面には複雑な形状の地層が観測される。十分な調査によって未固結層の構造を明らかにすることは原理的には可能であるが、このような調査は費用の点から現実的ではない。対象とする未固結層に明瞭な地層の区別がない場合には、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モデル化することにならざるを得ない。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。

2.2 地盤の構成則

地盤の破壊を解析する際に、地盤の構成則モデルには弾塑性が使われる。金属と異なり、地盤の弾塑性モデルでは拘束圧依存性を表現することが必要である。このため、Mohr-Coulomb 型や Druker-Prager 型の降伏関数が利用されている。通常は関連流れ則が仮定される

が、高度な予測には非関連流れ則を仮定することもあり、また多数のパラメータを使った降伏関数を考慮することの重要性も指摘されている。

しかし、断層進展に大きな影響を与える未固結層の構造に対して、正確な形状を与えるモデルを構築することが難しいことを考えると、地盤の構成則モデルに複雑なものを使うことは合理的ではない。また、材料特性の計測が難しいことを考えると、材料パラメータの数も最小限にすることが必要であり、できれば、簡単な地盤調査や地盤種類から決定できるようなパラメータであることが望ましい。

以前の報告¹¹⁾にあるように、本研究では塑性変形の表現に Druker-Prager 型の降伏関数と関連流れ則を用いているが、これは上述した合理的でないという理由に加え、微小変形の枠内で非関連流れ則を用いると接線剛性マトリックスが非対称となることに配慮したためでもある。

2.3 地盤の材料特性

地盤の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¹⁵⁾であり、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¹⁶⁾。また、塑性に関する c と ϕ は地盤種類と N 値からある程度推定することができる。

本研究で用いている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。地点毎 (x を固定した場合) におけるヤング率は正規分布に従って分布していることと、違う 2 地点間でのヤング率の相関関数が予め与えられると仮定した。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 $\alpha(x, \omega)$ を用いて、

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

と書ける。この、関数 $\alpha(x, \omega)$ が正規分布に従って分布していることになる。また、地盤内の 2 地点 x, y におけるヤング率の相関関数 $C(x, y)$ は、ばらつきの程度を表す指標である分散 σ と相関距離 ℓ によって次式のように与えられる。

$$C(x, y) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{|x_1 - y_1|}{\ell_1} - \frac{|x_2 - y_2|}{\ell_2} - \frac{|x_3 - y_3|}{\ell_3} - \dots\right) \quad (2)$$

なお、パラメータ σ と ℓ を決定することはもとより、相関関数の関数形の妥当性も確認されたものではない。あくまでも、計測に限界がある未固結層に対する一つの確率モデルを構築するために用いられた関数形とパラメータであることを明記しておく。距離 $r = |x - y|$ が増加するにつれ相関は指数関数的に減少する。また、分散 σ が大きいほど相関の値は大きく、相関距離 ℓ が大きいほど相関の値は大きくなるのが分かる。実際

の地表地震断層に対してシミュレーションを行う場合は、パラメータ σ と l にパラメトリックスタディを行うことになる。

2.4 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。トレンチ調査などに基づく詳細なデータがある場合には、そこで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、地表地震断層が現れた地点において、基盤変位量が計測・推定されていることは少ない。足立ら¹⁷⁾は、FEMを用いた地中構造物への断層変位による影響解析において、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を用いている。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て計算された基盤変位量のうち最大値となるものを採用する。最悪のシナリオとしてシミュレーションに最大の基盤ずれ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状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。

3. 野島断層 (梨本地区) のシミュレーション

3.1 検討対象地区と地盤構造

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。谷ら¹⁸⁾による、この地域のトレンチ調査で観察された表層地盤の変形構造に関する詳細な報告がある。それによると、この梨本地区は小河川沿いにあり、表層は大阪層群となっている。具体的には粘土層と砂礫層 (河床性の堆積物) からなる軟弱地盤となっている。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。なお、トレンチ調査により、断層沿いの他の調査地区よりも梨本地区の大阪層群は厚いことが分かっている。

3.2 解析モデルと境界条件

梨本地区の未固結層は粘土と砂礫が複雑に混在しており、各層の厚さや形状が不明であるため、層の区別無い様な確率モデルをシミュレーションに用いた。解析モデルの形状は、Fig.1 に示すように地盤を無限に長い平行成層とし、基盤が斜め横ずれ方向に剛体的にずれることを想定して断層方向に周期性を仮定した。こ

Table.1 野島断層の数値解析に用いたパラメータ

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

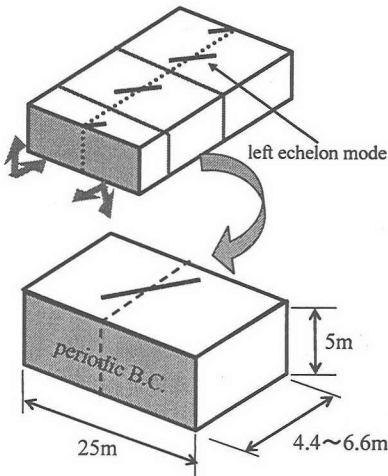


Fig.1 解析モデルの境界条件.

の断層方向の周期長を、トレンチ調査の報告に基づき 6[m] 前後の間で変化させ、断層発生に必要な仕事が可能になるような周期長を選択している。また、後の 3.4 節で詳しく述べるが、雁行状の断層発生に必要なモデルの奥行き (周期長) に関しては、少なくとも 6.0[m] よりも長く取る必要がある。モデル層厚は、前節に示したように 4 ~ 6[m] を未固結層と考え、5[m] と仮定した。走向直角方向に関しては、側圧の影響を除くため十分に長さを取り 25[m] とした。モデル上面は自由境界である。モデル底面には、トレンチ調査の報告に基づき、断層線を境として左側の底面に強制変位 $\Delta u_1 = 0.0[\text{mm}]$, $\Delta u_2 = 2.125[\text{mm}]$, $\Delta u_3 = 0.9375[\text{mm}]$ を右側の底面に、強制変位 $\Delta u_1 = 0.0[\text{mm}]$, $\Delta u_2 = -2.125[\text{mm}]$, $\Delta u_3 = -0.9375[\text{mm}]$ を、それぞれ毎ステップごとの微小変位として加えてゆき、計 200 ステップまで行った。したがって、200 ステップの段階で、底面のずれ量の各座標方向成分の総変位量は、 $\Delta U_1 = 0.0[\text{cm}]$, $\Delta U_2 = 85.0[\text{cm}]$, $\Delta U_3 = 37.5[\text{cm}]$ となる。

3.3 解析モデルの材料物性

第 2 章で述べたように、弾性係数 E は N 値に基づいてある程度推定することができる¹⁵⁾。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 を超えることはないことが知られている¹⁵⁾。梨本地区が粘土層と砂礫層からなることから、 N

値を9と設定した。この結果、ヤング率の推定式¹⁵⁾,

$$E \approx 7 \times N[\text{kgf/cm}^2] \quad (3)$$

に従って $E = 6125[\text{kPa}]$ とした。また、塑性に関係するパラメータは、砂礫と粘土の混合層であることを考慮して $c = 38[\text{kPa}]$, $\phi = 50[\text{deg}]$ とした。

また、本解析では、硬化・軟化則を構成則に取り入れている^{11),12)}が、その際に有限要素法解析のメッシュ依存性を除くため、エネルギー開放率 G なるものを導入している。これにより、エネルギー開放率 G から算出されるメッシュサイズ以上を解析に用いなければ解の安定性が得られないことが知られている。逆に言えば、式で表されるメッシュ以下で計算しても意味がなく、それ以上の寸法のメッシュを用いる必要がある。メッシュの寸法が $1[\text{m}]$ 程度である場合には $G = 0.01 [\text{kN/m}]$ 程度の値をとることが、著者らによる前回の報告¹²⁾で示されている。ここで、用いた材料パラメータを Table.1 に整理する。

3.4 解析結果と考察

3.2 節、3.3 節に示した確率モデルに対して、NL-SSFEM を用いた際の結果を整理する。結果において、次の三項目を特に重視した。

- (1) 基盤に一樣なずれ変位を与えた時に、周期的な雁行状断層が形成されるという分岐現象を再現する。
- (2) 断層の形状パラメータ (間隔, 斜交角度, 長さ, 幅) を実測値と比較し、シミュレーションの妥当性を検証する。
- (3) 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る。この破壊確率を用いて、地表地震断層を発生させる基盤変位の大きさを予測する可能性を検証する。

入力される未固結層の確率モデルや基盤変位に良質のデータを期待することは難しい。そのため、NL-SSFEM の入力パラメータに関する感度を把握することが必要となる。まず始めに、断層の走向方向の長さ、相関距離 ℓ 、ヤング率の平均値 $\bar{E}$ 、分散値 σ を変えた、パラメトリックスタディを行った。

Fig.2, Fig.3 はそれぞれ、基盤上のずれ変位 U の増加に伴う最大せん断ひずみの平均値 (Mean) と標準偏差 (SD) の分布の変化を示したものである。Fig.2, Fig.3 に、未固結層の底面から地表面に向けて $1.2[\text{m}]$ おきの水平面内における平均値と標準偏差の分布を、下から上にかけて示した。Fig.2 より、ずれ変位 U が $17.3[\text{cm}]$ から $34.6[\text{cm}]$ となる間で最大せん断域が局所化し始め、地表面に左雁行のパターンが現れていることが分かる。

横ずれ変位のみとは異なり、ずれ変位に含まれた鉛直方向成分が分岐解である雁行状断層の発生を阻害することも懸念されたが、Fig.4 に示すように、走向方向の長さ (モデルの奥行き) を $4.4[\text{m}] \sim 6.6[\text{m}]$ まで変

化させた結果、走向方向の長さが約 $6.0 \sim [\text{m}]$ である場合は、塑性ひずみは雁行状に分布する結果となった。後述するように、雁行状断層の発生は、材料パラメータの値、ヤング率の相関関数に用いる相関距離 ℓ や分散 σ などによっても影響を受ける。Fig.4 は、ヤング率 E が $6125[\text{kPa}]$ 、相関距離 ℓ が $10[\text{m}]$ 、相関関数の分散値 σ が $30[\%]$ の時の、走向方向の長さのみが異なる場合の結果である。モデル実験と同様、ここでも覆瓦構造をシミュレートすることには失敗している。しかし、分岐現象である雁行状断層の形成は再現されている。

次に、Fig.5 はヤング率の相関関数における相関距離 ℓ が異なる場合の、最大せん断ひずみの平均値と標準偏差の分布の違いをみたものである。相関距離以外のパラメータは、断層の走向方向の長さが $6.6[\text{m}]$ 、ヤング率の平均値 $\bar{E}$ が $6125[\text{kPa}]$ 、相関関数の分散値 σ は $30[\%]$ と、それぞれ固定している。ヤング率の相関関数に、2 地点間の距離を変数とした指数関数の逆数を用いているため、相関距離 ℓ が大きくなるに従い、ヤング率の相関関係は大きくなる。Fig.5 の右の列 (SD) を見ると、相関距離の違いが、最大せん断ひずみの標準偏差 (SD) の分布の違いとしてはっきりと現れていることが分かる。

Fig.6 はヤング率が異なる場合の、最大せん断ひずみの平均値と標準偏差の分布の違いをみたものである。ヤング率以外のパラメータは、断層の走向方向の長さが $6.6[\text{m}]$ 、相関距離 ℓ が $10[\text{m}]$ 、相関関数の分散値 σ が $30[\%]$ と固定されている。当然のことながら、せん断ひずみの分布は未固結層の深さに大きく依存するが、Fig.6 に示すように雁行の発生の為には弾性係数の影響もあることが分かる。

Fig.7 はヤング率の相関関数における分散 σ が異なる場合の、最大せん断ひずみの平均値と標準偏差の分布の違いをみたものである。分散以外のパラメータは、断層の走向方向の長さが $6.6[\text{m}]$ 、相関距離 ℓ が $10[\text{m}]$ 、ヤング率の平均値 $\bar{E}$ が $6125[\text{kPa}]$ と固定されている。Fig.7 の上半分は分散値が $10[\%]$ の場合であり、下半分が分散値が $30[\%]$ の場合である。Fig.7 より、ヤング率のばらつきの程度が上と下の図では約 1.7 倍 ($\sqrt{30[\%]} \setminus \sqrt{10[\%]}$) 違うことに対して、得られた最大せん断ひずみの標準偏差の違いは最大で約 8.0 倍程になっており、ヤング率のばらつき具合に比例せず、かなり大きく影響することが分かる。

次に、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。上述したパラメトリックスタディより、断層の走向方向の長さ $6.6[\text{m}]$ 、相関距離 $10[\text{m}]$ 、ヤング率の平均値 $\bar{E}$ が $6125[\text{kPa}]$ 、分散値 $30[\%]$ の確率モデルに対し、基盤変位が $60[\text{cm}]$ となった時の断層の斜交角度 θ_R 、周期間隔 S_R 、幅 W_R を推定する。地表面に現れた雁行する最大せん断ひずみの平均の分布から、斜交角度と周期長さは $25[\text{deg}]$ と $5.9[\text{m}]$ と判定さ

Table.2 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
θ_R [deg.]	22~35	25
S_R [m]	4~6	5.9
W_R [m]	0.5~1.5	1.4

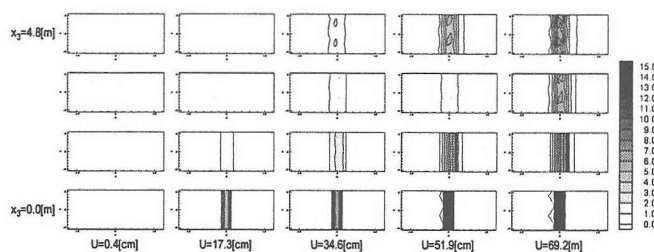


Fig.2 野島断層での地表地震断層の形成 (Mean).

れる。また、せん断帯の幅については1.4[m]と判定された。斜交角度 θ_R 、断層の周期間隔 S_R 、断層の幅 W_R を合わせてTable.2に示した。良好な一致が見られる。

Fig.8に、著者らの前回の報告¹²⁾で述べた砂箱を用いた断層モデル実験のシミュレーションと同様、表面の変形局所化領域において中央と端部の最大せん断ひずみが基準値を超えた場合が、地表地震断層が地表に出現する場合に対応すると仮定し、断層が地表に出現する破壊確率を計算した結果を載せた。破壊条件は、地表面上における最大せん断ひずみの増加率を調べ、大きく変わる時点 (Fig.2, Fig.3における $U=34.6[\text{cm}]$ と $U=51.9[\text{cm}]$ の間)の最大せん断ひずみをもとに、(中央の最大せん断ひずみ) $> 5.5[\%]$ 、(端部の最大せん断ひずみ) $> 4.3[\%]$ とした。Fig.8に破壊確率分布と確率密度分布を示す。確率密度分布は確率分布の断層変位に対する微係数である。基盤変位が50[cm]前後で地表地震断層が出現する可能性があり、60[cm]以上ではほぼ確実に地表地震断層が出現する、という結果が得られた。トレンチ調査で観測された地表面上の断層変位の大きさが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含んでいることが分かる。

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不可能である。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値する。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には、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とが挙げられる。また、未固結層に弾塑性体の確率モデルを用いたことと、分岐解を計算できる解析手法を適用したことが有効であったことが理解できる。しかし、未固結層に確率モデルを用いている以上、未

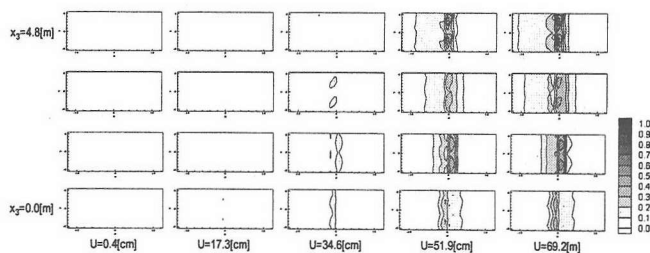


Fig.3 野島断層での地表地震断層の形成 (SD).

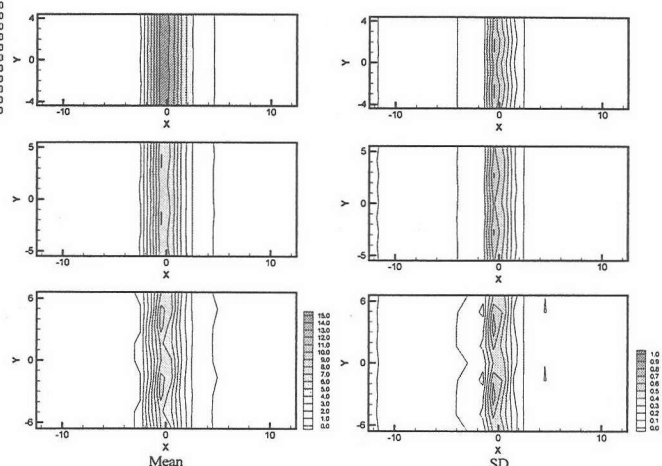


Fig.4 解析モデルの奥行きを変えた場合の最大せん断歪分布の違い.

固結層の断層進展過程のシミュレーションには限界があることも確かであり、そのため、断層形状を再現・予測する精度に過度の期待を持つことはできない。また、準静的状態と微小変形の仮定も予測精度を下げる原因である。構成則が単純であることや離散化の度合いが十分でないこと等、原因はいろいろ考えられるが、覆瓦構造が再現できない点は、不連続なものに対する有限要素法の弱点ともいえるべきものであり、現時点のNL-SSFEMによるシミュレーションの限界を端的に示すものである。

しかし、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からず一歩前進したと思われる。なお、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Fig.8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次のような三段階の評価にまとめることが考えられる。

基盤変位 [cm] < 40	発生の危険なし
40 < 基盤変位 [cm] < 55	発生が懸念
55 < 基盤変位 [cm]	発生の危険高い

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当地点での基盤変位が推定される場合、上記

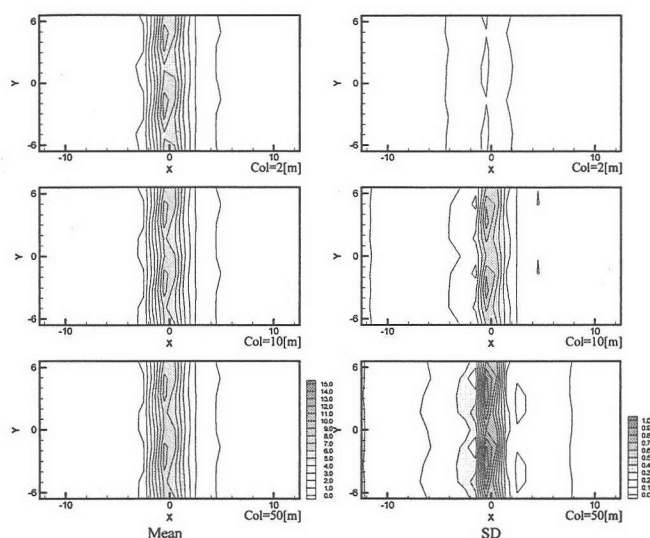


Fig.5 相関距離 ℓ を変えた場合の最大せん断歪分布の違い。

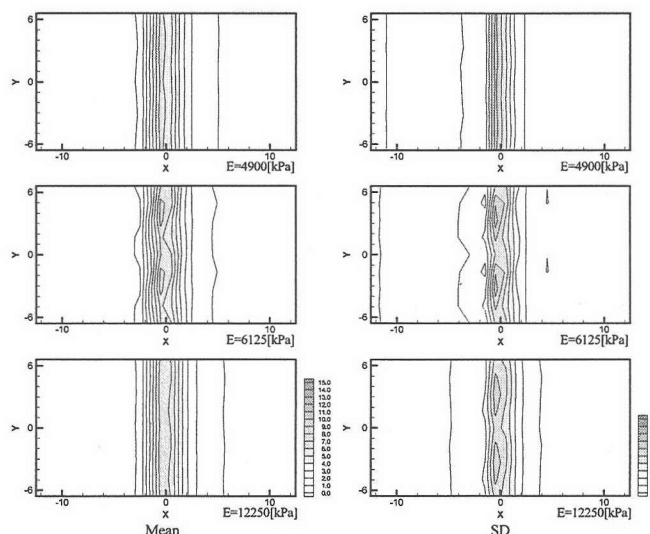


Fig.6 ヤング率の平均 $\bar{E}$ を変えた場合の最大せん断歪分布の違い。

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。

4. 車籠埔断層 (南投県草屯) のシミュレーション

4.1 検討対象地区と地盤構造

縦ずれ成分が卓越した断層の例として、車籠埔断層の南投県草屯近傍における地表地震断層を対象に取り上げた。産総研による¹⁹⁾、複数の河成段丘の累積上下変位量の調査、および、同断層のトレンチ調査をもとにモデル化を行った。トレンチ調査は、草屯市街地南東約1kmに分布する、現河床からの比高約2mの沖積段丘に形成された地震断層崖について行われている。北西-南東方向の地震断層崖を、斜めに横切るように東西方

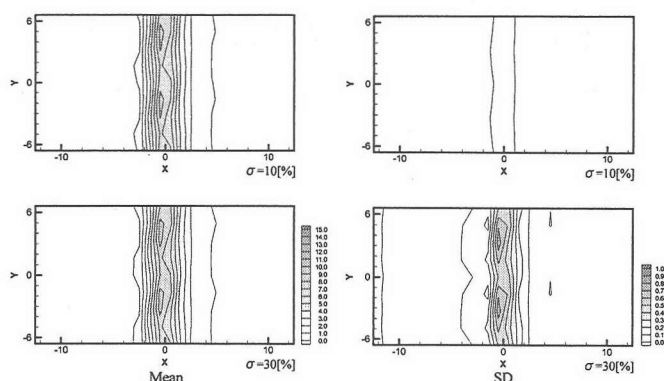


Fig.7 分散 σ を変えた場合の最大せん断歪分布の違い。

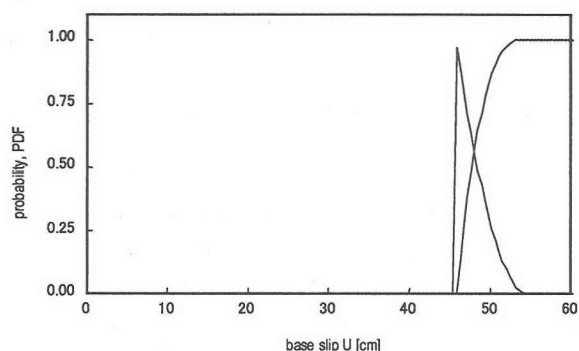


Fig.8 野島断層における地盤の破壊確率分布。

向に掘削し、長さ約20m、幅約7m、深さ約2.5m、壁面の傾斜60度として行われた。トレンチ調査の結果より、壁面には下位より、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。これらの、礫層および細砂～砂質シルト層は、それぞれ、段丘礫層および汎濫堆積物であることが報告されている。

4.2 解析モデルと境界条件

トレンチ壁面には、北東方向に傾斜する形で逆断層が通っている。断層が未固結層に入る角度 (Dip-angle) は、トレンチ壁面の下部 (礫層) で60度となっている。そのため、本解析では、この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度で逆断層が入るものとした。また、逆断層によって持ち上げられた断層上盤側の表土とその下位の細砂～砂質シルト層が、地表面上で下盤側の表土に覆い被さっていることが報告では確認されている。この点は、断層が地表面上に到達する位置の判定に際して考慮されるべきものである。礫層とその上位の細砂～砂質シルト層との境界の上下変位量は約1.3mであり、地表面及び表土基底の上下変位量 (1.3m～1.4m) とほぼ同じであることが確かめられている。これらをもとに、モデル化を行った。2次元の解析モデルは、幅4.8m、層厚1.2mとした。モデル底面には、トレンチ調査の報告に基づき、断層位置を境として左側の底面に強制変位 $\Delta u_1 = 0.10[\text{mm}]$, $\Delta u_3 = 0.17[\text{mm}]$ を、毎ステップごとの微小変位として加えてゆき、計250ス

Table.3 車籠埔断層の数値解析に用いたパラメータ.

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

テップまで行った。したがって、250 ステップの段階で、底面のずれ量の各座標方向成分値は、 $\Delta U_1 = 2.50[\text{cm}]$, $\Delta U_3 = 4.33[\text{cm}]$ となる。

4.3 解析モデルの材料物性

未固結層が、細砂～砂質シルト層から構成されていることから、ヤング率 E を谷や谷山らの文献^{6,7)} を参考に決めた。また、シルトによる粘性の影響を加味して、塑性に関係するパラメーターを $c = 35[\text{kPa}]$, $\phi = 40[\text{deg}]$ とした。 ϕ の値は、未固結層の大部分が細砂から成ることを考慮したものである。また、産総研によるトレンチ壁面の図¹⁹⁾ から、未固結層は細砂から成る比較的均質に近い地盤であることが分かった。そこで、未固結層内の各地点でのヤング率のばらつきを大きく(細砂にシルトの影響が入るため)取り、ヤング率の分散 σ を 30[%] に設定した。また、各 2 地点でのヤング率のばらつきを小さく(層は細砂から成る比較的均質地盤)取り、ヤング率の相関距離 l を 1[m] に設定した。用いた材料パラメータを Table.3 に整理する。

4.4 解析結果と考察

前の 4.2 節、4.3 節に示した確率モデルに対して、NL-SSFEM を用いた際の結果を整理する。結果において、次の二項目を特に重視した。

- (1) 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 $D[\text{m}]$ 、地表面での断層の到達位置 $W[\text{m}]$ 、を実測値と比較し、シミュレーションの妥当性を検証する。
- (2) 破壊確率を用いて、地表地震断層を発生させる基盤変位の大きさを予測する可能性を検証する。

Fig.9, Fig.10 はそれぞれ、基盤上のずれ変位 U の増加に伴う最大せん断ひずみの平均値と標準偏差の分布の変化を示したものである。Fig.9 より、ずれ変位 U が 2.5[cm] ぐらいから地表近傍で最大せん断域が局所化し始め、地表面における最大せん断ひずみ局所化域の到達位置は断層の位置から 1.0[m] 前後離れた位置であることが分かる。また Fig.10 より、最大せん断ひずみ局所化域で SD が大きくなっている。最大せん断ひずみ

局所化域が比較的広範囲に拡散しているが、これは解析モデルのメッシュがかなり粗いためであり、この点に関しては今後検討する必要がある。

次に、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 $D[\text{m}]$ 、地表面での断層の到達位置 $W[\text{m}]$ 、である。Fig.11 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^{3,4,6,7,8)} 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 $W[\text{m}]$ 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と同様な結果^{3,4,6,8)} 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。

Fig.11 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。トレンチ調査の報告では、実際に地表面に現れた断層は、その露出部分が自立することができずにそのまま地表面上にくずれて覆い被さっていたと述べられている。このことから、未固結層の底部でのずれ量 1.2[m] 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。

野島断層と同様、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には、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とが挙げられる。また、未固結層に弾塑性体の確率モデルを用いたことと、分岐解を計算できる解析手法を適用したことが有効であったことも理解できる。しかし、3 章と同様、未固結層に確率モデルを用いている以上、未固結層の断層進展過程のシミュレーションには限界があることは確かであり、断層形状を再現・予測に関しては、パラメトリックスタディを行うなどのさらなる検討が必要であることを記しておく。

Table.4 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.

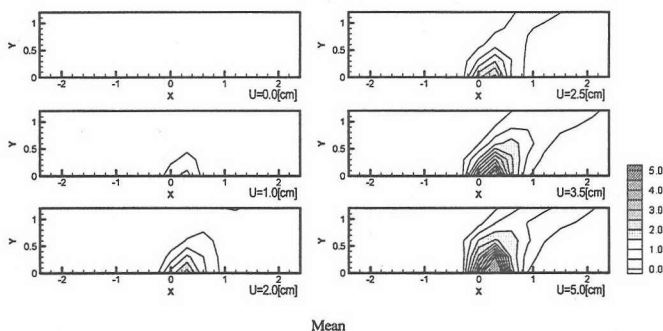


Fig.9 車籠埔断層での地表地震断層の形成 (Mean).

5. まとめ

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不可能である。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。この理由としては、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必要となる、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。

参考文献

- 1) 中田高: カルフォルニア州の活断層法「アルキスト-プリオリ特別調査地帯法 (Alquist-Priolo Special Studies Zone Act)」と地震対策, 地学雑誌 No. 437/I-17, pp. 1-18, 1991.
- 2) 山崎晴雄: 地震断層の出現形態とその形成条件, 地質調査所月報, Vol. 32, No. 10, pp. 574-575, 1981.
- 3) J.D. Bray, R.B. Seed, L.S. Cluff, H.B. Seed: Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil, *Journal of Geotechnical Eng.*, Vol.120, No.3, pp. 543-561, 1994.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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

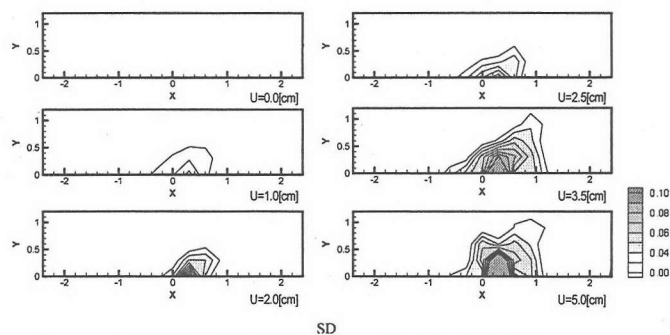


Fig.10 車籠埔断層での地表地震断層の形成 (SD).

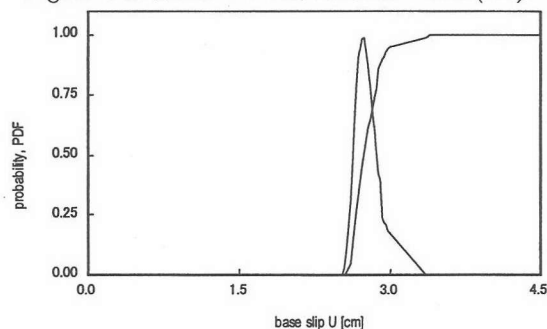


Fig.11 車籠埔断層における地盤の破壊確率分布.

に関するシンポジウム発表論文集, VIII-2, pp. 215-222, 1994.

- 7) 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, I-43, pp. 313-325, 1998.
- 8) 鬼塚信弘, 伯野元彦, 鈴木崇伸, 岩下和義, 堀宗朗: 基盤の縦ずれ断層運動に伴う表層地盤の破壊伝播に関する模型実験, 土木学会論文集 Vol. 701, III-58, pp. 29-38, 2002.
- 9) M. Hori, M. Anders, H. Gotou: Model experiment and numerical simulations of surface earthquake fault induced by lateral strike slip, *Journal of Structural Eng./ Earthquake Eng.*, JSCE, Vol. 19, No. 2, [Special Issue], pp. 227s-236s, 2002.
- 10) M.S. Anders, M. Hori: Stochastic Finite Element Method for Elasto-Plastic Body, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 46, pp. 1897-1916, 1999.
- 11) 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.
- 12) 中川英則, 堀宗朗: スペクトル確率有限要素法を用いた横ずれ断層運動に伴う地表地盤の変状とその確率分布に関する研究, 土木学会 応用力学論文集 Vol. 5, pp. 573-580, 2002.
- 13) R.G. Ghanem, P.D. Spanos: *Stochastic finite elements: a spectral approach*, Springer, Berlin, 1991.
- 14) 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, I-57, pp. 321-331, 2001.
- 15) N 値の話編集委員会: N 値の話, 理工図書, 1999.
- 16) 三木五三郎 他: 演習 土質工学, オーム社, 1994.
- 17) 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
- 18) 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.
- 19) 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

(2003 年 4 月 18 日 受付)