

# せん断を受ける地盤の局所変形の 3 次元発達

3-dimensional propagation of localized deformation in foundation under shear

西原 照雅\*

Terumasa NISHIHARA

\*構造強度学研究室 (指導教官: 岩熊哲夫 教授)

When a strike-slip occurs, the base rock itself slides uniformly, but on the ground surface so-called echelon faults, which are periodical oblique faults, emerge. In order to examine such characteristics of propagation of faults in foundation, 3D-FEM analysis is carried out. Damage in foundation is expressed by void damage theory. Various models are analyzed in order to investigate change of the echelon pattern influenced by intervals of such faults and the thickness and damage of the foundation

**Key Words :** 3D-FEM, echelon mode, void damage theory, strike-slip fault

## 1. 序論

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震では淡路島北部に分布する野島断層上に斜め右横ずれ断層変位に伴う特徴的な地表地震断層が出現し、詳細な調査が行われた。断層面の走向に沿う方向の変位成分が存在する横ずれや斜めずれ断層が基盤内に存在する場合、これを被覆する堆積層の表面には走向に沿って発達する周期的な変形構造である雁行断層が形成される。横ずれ断層は 3 次元問題として取り扱わなくてはならないが、近年の実験装置や計算機の性能向上に伴って模型実験<sup>1)</sup>や数値シミュレーション<sup>2)</sup>が行われるようになってきた。

本研究では弾塑性確率有限要素法を用いて雁行断層を数値シミュレーションした文献<sup>2)</sup>の結果を補足する観点から、塑性延性を簡便に扱えるポイド損傷理論を用いて雁行断層を再現することを目的とする。ポイド損傷理論は材料内部に蓄積した損傷を空隙率(ポイド体積分率)に置き換えた連続体理論であり、地盤材料内の空隙などの弱点部を考慮できる。この理論は多孔質延性材料を対象としたものであるが、最近では内部に空隙を含む脆性材料であるコンクリートに対して適用した例も存在し、またフィールド調査から雁行断層は第四紀層のような延性的性質が比較的強い地盤に発生することも確認<sup>3)</sup>されており、ポイド損傷理論を適用できると考えた。

## 2. ポイド損傷理論

多孔質延性材料に対して適用されるポイド損傷理論は、材料内部のポイドが負荷による塑性変形に伴って増大し、これによって材料内部に損傷が蓄積されて最終的な破壊にいたるという着想に基づく理論であり、

Gurson<sup>4)</sup>は  $\Phi(\sigma_{ij}, \sigma_M, f) = 0$  の形式の降伏関数を提案した。ここで、 $\sigma_{ij}$  は平均巨視的 Cauchy 応力テンソル、 $\sigma_M$  は材料全体からポイドを除いた母材そのものの微視的応力状態を示す相当引張り流れ応力(あるいは後続降伏応力、初期降伏以前は  $\sigma_M = \sigma_Y$ )、 $\sigma_Y$  は初期降伏応力である。Gurson はこの降伏関数の具体的形式を求めるために数多くの剛塑性上界解析を行い、その結果を Tvergaard が改良した降伏関数が

$$\Phi = \frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_M^2} + 2q_1 f \cosh\left(\frac{q_2 \sigma_{kk}}{2 \sigma_M}\right) - (1 + q_3 f^2) = 0 \quad (1)$$

である。ここで、 $\bar{\sigma}$  は巨視的相当応力、 $s_{ij}$  は巨視的 Cauchy 応力の偏差成分、 $G_{ij}$  は現配置での計量テンソル、 $\sigma_{kk}$  は垂直応力の和である。

材料中のポイド体積分率は、初期状態から存在するポイドの成長と負荷による材料の変形に伴って新たに発生するポイドの和で表される。さらに、材料内のポイドがある程度の量に達すると、隣り合うポイドの境界が破壊してポイド同士が結合するという現象に発展する。これら全てを考慮して、ポイド体積分率は次のような増分形式として仮定した。

$$\dot{f} = (\dot{f})_{\text{growth}} + (\dot{f})_{\text{nucleation}} + (\dot{f})_{\text{failure}} \quad (2)$$

## 3. 解析モデルおよび解析手法

本研究では周期的に分布する雁行断層の一部を対象とし、周期的に雁行断層が並ぶ方向へは周期境界条件を持つ有限の領域を有限要素モデルとする。基本的な解析モデルを図-1 に示す。この解析モデルは文献<sup>2)</sup>を対象とした領域と同一である。以降このモデルを基本モデルと呼ぶ。境界条件は、底面は横ずれ成分のみが作用するように  $z$  方向を拘束し、図-1 に示した矢印のように中心である  $x = 70$  m より左側の全節点には  $y$  方向負の

向きに、中心より右側の全節点には  $y$  方向正の向きに一樣な強制変位を与える。側面は一番下の節点の  $x$  方向を拘束する。両側面は周辺の地盤から弾性的に拘束されるはずであるが  $x$  方向の変位をこの両側面すべてで拘束するのは過大な抵抗を与えると考え、あえて自由表面とした。上面は自由境界、前面と後面は周期境界である。雁行パターンの周期特性を調べるために、この有限要素領域の大きさを様々に変化させるがその場合は1要素の大きさは基本モデルの大きさと同じにして、要素数が違うものとする。有限要素領域の大きさを変化させたモデルの名称と、そのサイズを表-1に示す。なお、材料パラメータは文献<sup>2)</sup>で用いられている平均的な地盤材料の値を用いる。

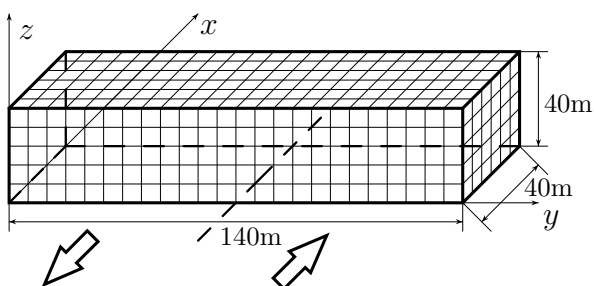


図-1 解析モデル

表-1 各モデルの名称とサイズ

モデル名	幅 (m)	奥行き (m)	高さ (m)
基本モデル	140.0	40.0	40.0
x1 モデル	70.0	40.0	40.0
x2 モデル	105.0		
y1 モデル	70.0	26.6	40.0
y2 モデル		33.3	
y3 モデル		46.6	
y4 モデル		53.3	
y5 モデル		60.0	
y6 モデル		66.6	
y7 モデル		73.3	
y8 モデル		80.0	
z1 モデル	140.0	40.0	32.0
z2 モデル			48.0

## 4. 数値解析結果

### (1) 基本モデルについて

荷重変位曲線が図-2である。この荷重は底面の中央より右側にある全節点の反力の和である。図-2では明確な分岐点は見られないが、勾配が大きく変化している底面変位が  $2.0 \times 10^{-3}$  m 前後の、下から2層目のせん断ひずみ  $\epsilon_{xy}$  の分布図-3、図-4を見ると、図-3では単純せん断状態であったのが図-4では乱れが生じひずみ状態が非一様になり、数値誤差などによって変形パター

ンに変化が生じている。雁行断層の発生は分岐現象であるとの報告もあるが、本解析では分岐に焦点を当てた解析を行っていないのでこれ以上の議論はしない。

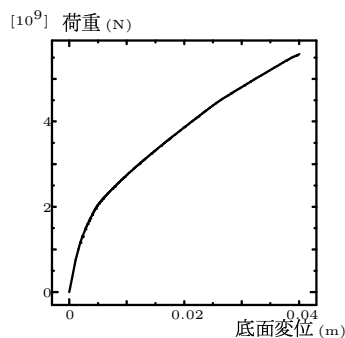


図-2 荷重変位曲線

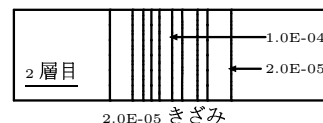


図-3 底面変位  $1.0 \times 10^{-3}$  m の  $\epsilon_{xy}$  分布

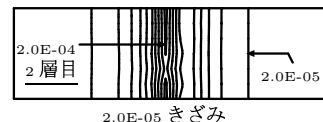


図-4 底面変位  $3.0 \times 10^{-3}$  m の  $\epsilon_{xy}$  分布

次に底面変位が  $3.0 \times 10^{-2}$  m 時の相当塑性ひずみ分布を図-5に、ポイド体積分率の分布を図-6に示す。

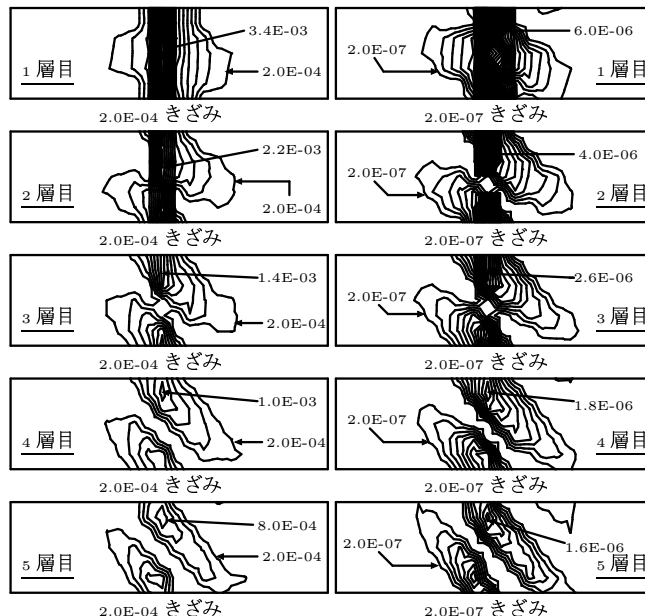


図-5 相当塑性ひずみの分布 図-6 ポイド体積分率の分布

図では下から1層目、2層目と数えている。図-5を見ると、強制変位を与えた1層目では相当塑性ひずみが  $y$  軸方向に分布し、中央部に集中している。そして上層へ向かうと相当塑性ひずみ分布が傾いていき、左上から右下へ向かって進展している。実験などにおいて、基盤付近の深部では基盤から進展する局所化した変形は狭い領域に生じるが、堆積層内のある地点でそのパターンが傾くと同時に枝分かれし、この地点から変形局所化の領域が上層に向かって拡大して地表面に向かって数本の破壊面が伝達することが報告されているが、この計算でも上層へ向かうにつれて相当塑性ひずみ分布が斜め方向に広がっていくことからこの特徴を良く表している。次にポイド体積分率の分布を示した図-6を見ると、相当塑性ひずみと同様の分布をしていることが分かる。これ

はボイド体積分率の増加が塑性ひずみに支配されているためであり当然ではある。また、ボイド体積分率の最大値は  $2.6 \times 10^{-6}$  程度であったが、これはボイド成長を支配する応力の静水圧成分が与えた強制変位下では大きくならず、ボイドの増加がほとんどボイドの発生のみ支配されているためである。ボイド体積分率の分布は相当塑性ひずみと非常に似た傾向を示す上に、その絶対値そのものは小さいので以降詳細な検討は加えない。

## (2) 硬い地盤と延性の大きい地盤の場合

硬い (stiff) な地盤には雁行断層が発生しないことがフィールド調査から示されているが、これを再現するためにヤング率を前節の10倍とした解析を行った。この場合の底面変位が  $3.0 \times 10^{-2}$  時の5層目の相当塑性ひずみの分布を図-7左に示す。明らかに雁行パターンが発生しておらず、フィールド調査の結果を数値的にも示すことができた。

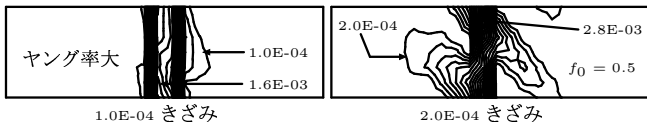


図-7 相当塑性ひずみの分布、底面変位  $3.0 \times 10^{-2}$

次に延性の大きな初期ボイド体積分率を0.5とした場合を図-7右に示す。雁行パターンも現れているが、底面変位が低い段階で断層線がそのまま地表面に伝わるモードが支配的になっている。したがって、雁行断層の発生は地盤の硬さと延性、基盤変位の大きさに依存している事がわかった。

## (3) すべりの規模と変形パターン

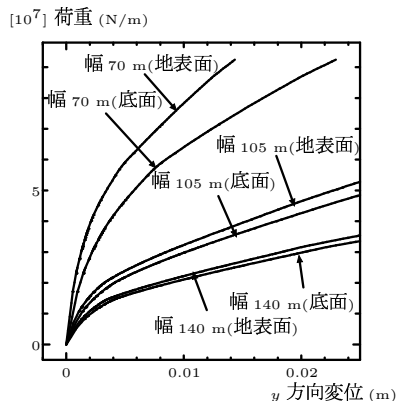


図-8 幅を変えたモデルの荷重変位曲線

活断層が上層の運動に及ぼす規模の影響を上層の可動範囲の大きさでモデル化して検討する。図-8に幅が70 m, 105 m, 140 mのモデルの荷重変位曲線を示す。ここで荷重は底面の中央より右側にある全節点の反力の和をモデルの幅で除したものである。当然、幅の狭いモデル

は変形しにくいいため地表面での変位は底面変位と比較して小さくなっている。図-9と図-10に幅が70 mと105 mのモデルの底面変位  $3.0 \times 10^{-2}$  時の1層目と5層目の相当塑性ひずみ分布を示したが、幅が70 mのモデルでは側面の境界条件の影響を受け、また、地表面の変位が大きくなり中央部に変位が集中しないことから相当塑性ひずみ分布が丸みを帯びているが、幅が140 mのモデルでは中央部に変形が集中し相当塑性ひずみ分布の形状は細長くなっている。以上よりできるだけ幅を広く取ることが必要と考えられるが、5層目の相当塑性ひずみのパターンはあまり影響されない。

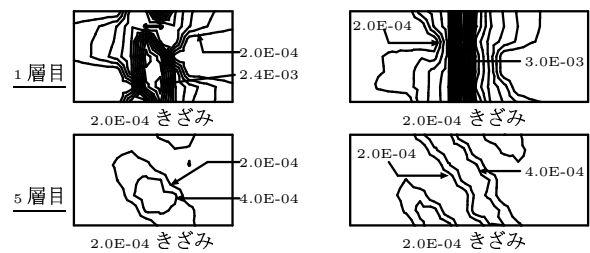


図-9 相当塑性ひずみ分布 (幅 70 m) 図-10 相当塑性ひずみ分布 (幅 105 m)

## (4) 堆積層の厚さと変形パターン

図-11に厚さ32 m, 40 m, 48 mのモデルの荷重変位曲線を示す。ここで、荷重は底面の中央より右側にある全節点の反力の和である。これも当然の結果ではあるが、厚さが48 mのモデルは変形しにくい。図-12と図-13に底面変位が  $3.0 \times 10^{-2}$  における厚さが32 mと48 mのモデルの地表面に相当する層の相当塑性ひずみ分布を示す。荷重変位曲線で明らかのように変位が小さい厚さ32 mのモデルで相当塑性ひずみの最大値が小さくなっている。

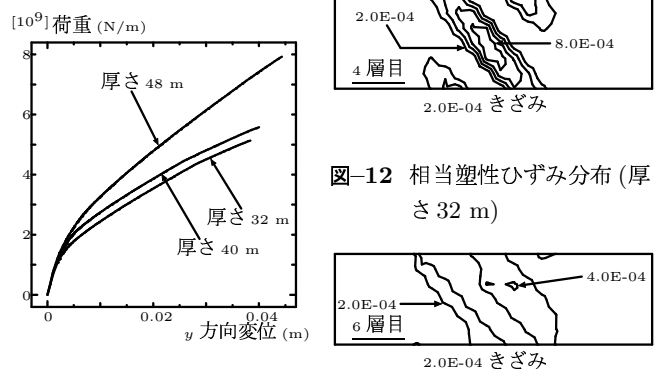


図-11 厚さを変えた場合の荷重変位曲線 図-12 相当塑性ひずみ分布 (厚さ 32 m)

また、厚さ48 mのモデルでは厚さ32 mのモデルと比較して相当塑性ひずみがx方向に広がっている。堆積層内のある地点で破壊が枝分かれしたときにその地点からの堆積層の厚さが厚いほうが地表面に現れる破壊の広



図-14 奥行き 26.667 m



図-15 奥行き 33.333 m

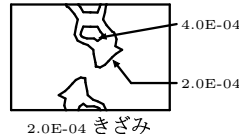


図-16 奥行き 46.667 m

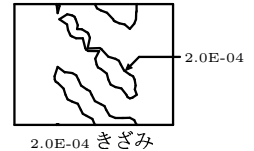


図-17 奥行き 53.333 m

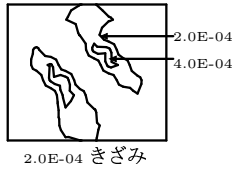


図-18 奥行き 60.0 m

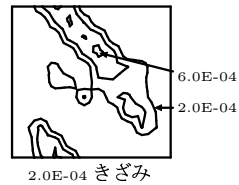


図-19 奥行き 66.667 m

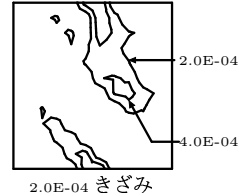


図-20 奥行き 73.333 m

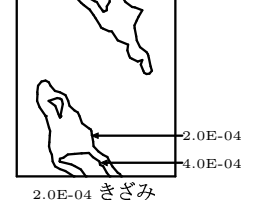


図-21 奥行き 80.0 m

りが大きくなると予測されるが、この傾向を示したものと考えられる。

### (5) 雁行断層の周期について

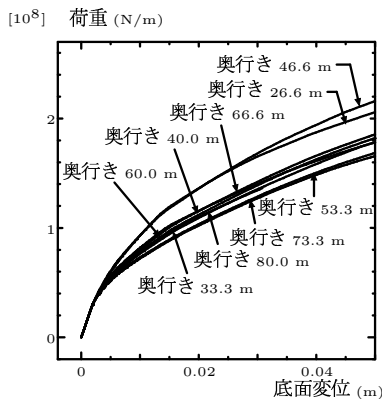


図-22 奥行きを変えた場合の荷重変位曲線

図-14～図-21に奥行きが26.6 m～80.0 mのモデルの底面変位が $3.0 \times 10^{-2}$  mにおける5層目の相当塑性ひずみの分布を、図-22に荷重変位曲線を示す。ここで、荷重は底面の中央より右側にある全節点の反力の和をモデルの奥行きで除したものである。各モデルの相当塑性ひずみを見ると最大値はほぼ一致しているが、奥行きが小さい場合は1つの相当塑性ひずみ分布が現れ、奥行きを大きくすると2つの相当塑性ひずみ分布や、折れ曲がった相当塑性ひずみ分布となり、その最大値が複数の箇所に見える傾向を示している。全体に複雑な形状となっているが、野島断層の航空写真で確認された雁行断層の形状も複雑多岐にわたっており、ここで得られた分布に近いものも見られる。荷重レベルが低い雁行パターンほど現れやすいと考えられるが、荷重変位曲線図-22で判断すると周期が約30 mのy4モデルのパターン、もしくは途中で折れ曲がった形状でその周期が70 mのy7モデルのパターンが最も現れやすいと考えら

れる。また、図-22を見ると同じような荷重レベルでいくつもの雁行パターンが現れていることがわかる。これは地盤の不均一性、つまり一部の弱点となる部分や剛となる部分の存在などの小さなきっかけでも雁行パターンの変化が起こりやすいことを示しており、多種多様な雁行パターンが現れる原因の一つであると考えられる。

### 5. まとめ

本研究ではボイド損傷理論を用いて雁行断層を数値シミュレーションしたが、既存の実験や数値解析と同様の傾向が得られ、ボイド損傷理論の地震断層への適用性を示した。また、解析領域を変えたモデルをいくつか解析することにより変形が広がる領域や堆積層の厚さによる雁行パターンの変化、雁行パターンの周期に関して定量的な結果を得た。

### 参考文献

- 1) 谷 和夫, 上田 圭一: 砂地盤内に形成されるせん断層の3次元構造のX線CTによる観察—横ずれ断層模型実験を例として—, 地盤破壊の三次元的評価に関するシンポジウム, 地盤工学会, pp161-168, 1995.
- 2) 中川 英則, 堀 宗朗, マチュエイ・アンドレ: 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, 応用力学論文集, Vol. 4, pp453-458, 2001.
- 3) Bray, J. D., Seed, R. B., Cluff, L. S., and Bolton Seed, H.: Earthquake fault rupture propagation through soil, *J. Geotech. Eng.*, Vol. 120, 543-561, 1994.
- 4) Gurson, A. L.: Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth/ part I – yield criteria and flow rules for porous ductile media, *J. Eng. Mater. Tech.*, Vol. 99, 2-15, 1977.

(2002年2月8日提出)