

# 横ずれ断層における幾何学的不整が表層地盤のせん断帯の形成に及ぼす影響 Effects of geometrical imperfections in strike-slip fault on shear bands formation

豊田智大<sup>1</sup>, 野田利弘<sup>2</sup>, 山田正太郎<sup>3</sup>, 山田翔太<sup>3</sup>

- 1 名古屋大学・工学研究科・社会基盤工学専攻・toyoda.tomohiro@i.mbox.nagoya-u.ac.jp
- 2 名古屋大学・減災連携研究センター
- 3 名古屋大学・工学研究科・土木工学専攻

## 概要

地下深部において横ずれ断層が変位すると、その上に堆積した表層地盤の内部にフラワー構造が形成され、地表面にはリーデルせん断帯が出現する。筆者らはこれまでに、地盤解析コード **GEOASIA** を用いた三次元弾塑性有限変形解析の適用により、これらの付随断層構造の形成過程を再現するとともに、地盤内の材料の初期不整がせん断帯の形成に与える影響について検討してきた。本稿では、幾何学的初期不整としてジョグと呼ばれる横ずれ断層の不連続性を考慮した数値解析を実施した。これにより、フラクタルなリーデルせん断や P-shear, 低角・高角なせん断面といった特徴的な付随断層構造の形成過程が再現された。

キーワード：横ずれ断層, リーデルせん断, フラワー構造, ジョグ, 弾塑性有限変形解析

## 1. はじめに

2016年熊本地震では、右横ずれ断層である布田川断層帯の地表面において、図1のような走行方向に対して斜めに連なる雁行状のリーデルせん断帯の出現が確認された。このような変状は横ずれ断層特有の付随断層構造の一形態として知られており、表層地盤内部にはフラワー構造と呼ばれる花弁状のすべり面が主断層を起点として三次元的に発達することが知られている。リーデルせん断帯は、図1のような小規模な破碎帯から、図2のようなサンアンドレアス断層上のトランスバース山脈まで、様々なスケールにおいて出現すること、また、断層変位の累積によるせん断帯の形成と成長に伴い、1つのリーデルせん断帯の中に高次のリーデルせん断帯がフラクタルに形成されてゆくことが知られている<sup>3,4)</sup>。

野田ら<sup>5)</sup>は材料不整の導入によりリーデルせん断帯が数値解析的に再現できることを示しているが、Woodcock et al.<sup>6)</sup>、奥村<sup>7)</sup>によれば、このフラワー構造は幾何不整、すなわち図3に示すように横ずれ断層が不連続に配置するジョグと呼ばれる箇所の存在に起因して発達するとされている。すなわち、図3奥側のように、ジョグが両側から引かれる場合には、引張応力場の下で正断層的に図4(a)のような負のフラワー構造が形成されて局所的な沈下を生じる。これに対し、図3手前側のようにジョグが両側から押される場合には、圧縮応力場の下で逆断層的に図4(b)のような正のフラワー構造が形成されて局所的な隆起を生じる。構造地質学の分野では、前者のような引張によ



(a) 布田川断層帯 (b) せん断帯  
図1 熊本地震で出現した小規模なリーデルせん断帯<sup>1)</sup>



図2 サンアンドレアス山脈に見られるリーデルせん断帯<sup>2)</sup>

る変形場をプリアパート、後者のような圧縮による変形場をプッシュアップと呼ぶ。本稿では、これらのプリアパートおよびプッシュアップを模擬した不連続な断層変位場（幾何不整）を境界条件として考慮した大規模3次元弾塑性有限変形解析を実施することで、横ずれ断層における局所的なジョグの存在に起因した付随断層構造の形成過程を数値解析的に再現することを目指す。

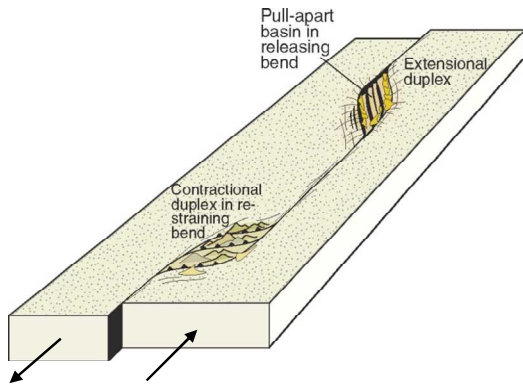


図 3 横ずれ断層のジョグ<sup>8)</sup>

(a)

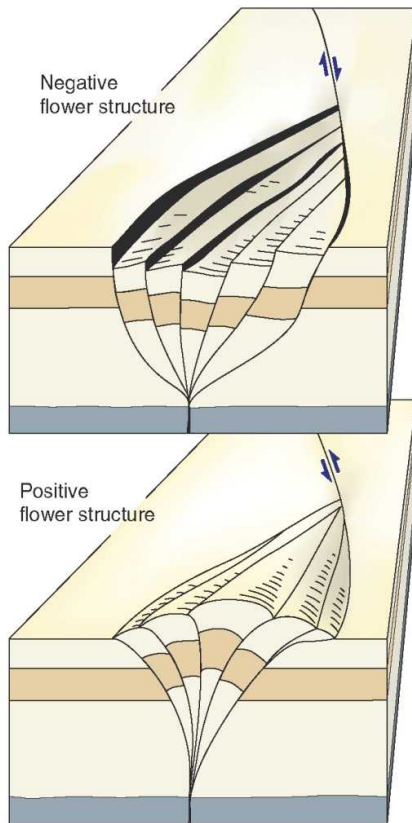


図 4 フラワー構造<sup>9)</sup>

## 2. 解析条件

解析には、骨格構造概念に基づく土の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model<sup>9)</sup>を搭載した静的/動的水～土骨格連成有限変形解析コード *GEOASIA*<sup>10)</sup>を用いる。なお、本解析で用いる手法は二相系連成解析にも対応しているが、本稿では一相系条件での解析について述べる。

### 2.1 有限要素メッシュと境界条件

図 5 のように、y 軸方向を横ずれ断層の走向方向にとる 3 次元直方体メッシュ（要素数：32800）を用いた。模型底面においては、鉛直変位を拘束した上で、図 6 に示すような屈曲した断層領域を設定し、その両側の節点に y 方

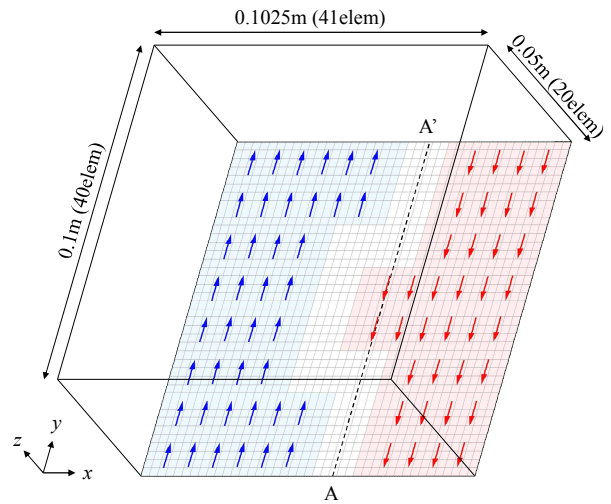


図 5 有限要素メッシュ

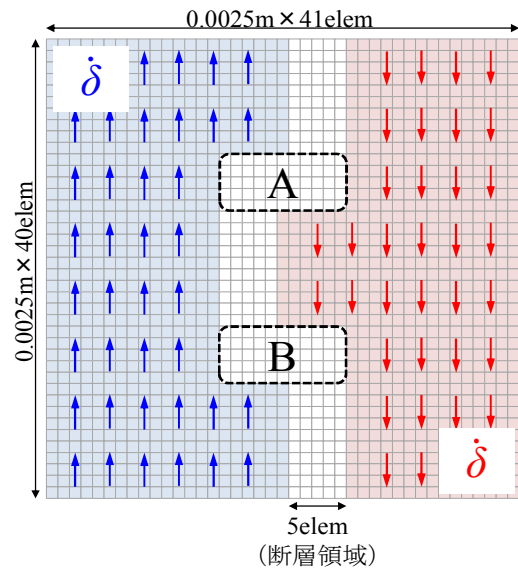


図 6 模型底面の境界条件

向の強制変位（変位速度： $\dot{\delta}=10^{-6}\text{m/s}$ ）を与えることで、領域 A では引き離されてプルアパートの応力場が、領域 B では圧縮されてプッシュアップの応力場がそれぞれ表現されることとなる。側面については、x-z 面では周期境界を設定し、y-z 面では摩擦なし条件を与えた。

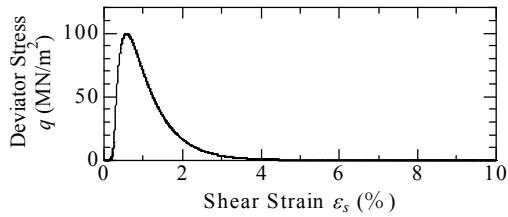
### 2.2 材料定数と初期条件

SYS Cam-clay model の材料定数は、既往の解析事例<sup>5),11)</sup>を参照し、表 1 の通り設定する。初期状態は、地盤全体で構造なし、異方性なし、等方応力状態とし、一様に間隙比 ( $e_0=0.57$ ) を与えた。このような条件の下で、SYS Cam-clay model は三軸排水せん断時に図 7 のような応答を示す。すなわち、材料は比較的小さなひずみ領域で膨張に転じる超過圧密土である。ピーク強度発現後の著しい軟化を示す材料パラメータを設定することで、岩盤材料の脆性的な応答を模擬した。

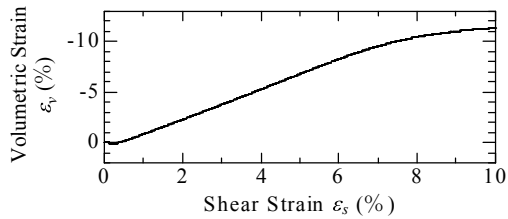
表 1 材料定数

＜弾塑性パラメータ＞	
圧縮指数 $\lambda$	0.0150
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.0002
限界状態定数 M	1.0
NCL の切片 <sup>*</sup> N	1.7
ポアソン比 $\nu$	0.3
＜発展則パラメータ＞	
正規圧密土化指数 $m$	2.0
＜物性値＞	
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.65

<sup>\*</sup> せん断応力  $q=0$ , 平均有効応力  $p'_0=98.1$  kPa における繰返し粘土のNCL上の比体積



(a) せん断応力-せん断ひずみ関係



(b) せん断応力-せん断ひずみ関係

図 7 材料定数

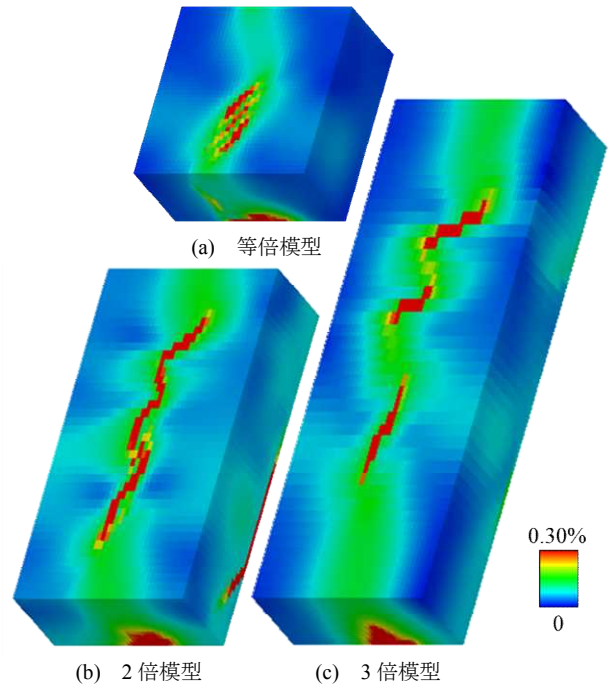


図 8 せん断ひずみ分布

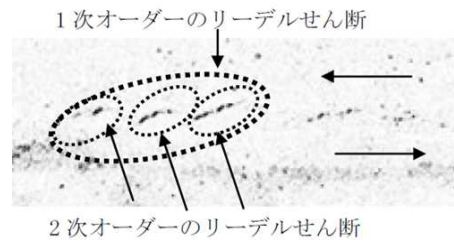


図 9 フラクタルなせん断帯の出現<sup>12)</sup>

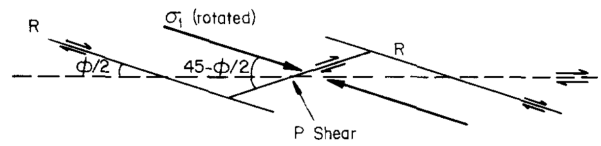


図 10 P-shear<sup>13)</sup>

### 3. 解析結果

前節で示した模型について、解析終了段階におけるせん断ひずみ分布を図 8(a)に示す。また、この模型寸法を要素数は変えずに y 軸方向に 2 倍、3 倍に拡大することでジョグの間隔を変更した模型の解析結果を同図(b), (c)にそれぞれ示す。

#### 3.1 等倍模型での解析結果

等倍模型について、図 7(a)のようにプッシュアップ側の地表面においてせん断帯の出現が確認できる。そして、同図のせん断帯は、緑色で示された大きなせん断帯が赤色で示された小さなせん断帯を内包するフラクタルな形態をとっている。上田<sup>12)</sup>は、豊浦標準砂・石膏・水を混合して作成した模擬岩盤に横ずれ変位を与える模型実験を実施し、模型表面において図 9 のような 1 次オーダーのせん断帯の形成後に 2 次オーダーのせん断帯が形成されることを確認しているが、本稿の解析結果はこの実験事実と極めて類似している。

#### 3.2 等倍模型での解析結果

2 倍模型について、図 8(b)の地表面の変状を見ると、不連続に連なるリーデルせん断を互いに接続するように伸びるせん断帯が形成されることが分かる。Naylor et al.<sup>13)</sup>は模型実験において図 10 のように同様の現象を確認して

おり、これを P-shear と呼んでいる。上田<sup>12)</sup>もまた、先の模型実験において P-shear の出現を確認しているが、P-shear は乾燥砂地盤には出現せず、模擬岩盤においてのみ形成されることを確認している。このことから、本稿の解析により P-shear の出現を再現できたのは、材料を著しい軟化挙動を示す超過圧密土としたことで模擬岩盤の脆性的な応答を正確に捉えることが出来たためであると考えられる。

#### 3.3 等倍模型での解析結果

3 倍模型について、図 8(c)をみると、プアパート側の地表面では走向方向に対して高角のせん断帯が引張応力の下で主動的に形成され、プッシュアップ側の地表面では走向方向に対して低角のせん断帯が圧縮応力の下で受動的に形成されることが確認された。

以上のような脆性材料の変形の局所化は弾塑性解析によってのみ得られるものであるが、とくに、以上で再現し

たフラクタルなせん断帯や P-shear といった 2 次的な変形は、1 次的な変形状態を参照可能な、すなわち変形の履歴を考慮可能な有限変形解析によってのみ再現可能なものである。

#### 4. おわりに

##### 4.1 まとめ

本稿では、横ずれ断層上に堆積した地盤について、断層変位の累積に伴う変状を、解析コード **GEOASIA** を用いた三次元弾塑性有限変形解析によりシミュレートした。横ずれ断層におけるジョグ（幾何不整）を境界条件として考慮することで、フラクタルなリーデルせん断帯や P-shear、低角・高角なリーデルせん断帯といった特徴的な付随断層構造の形成過程が再現可能であることを示した。

##### 4.2 今後の課題

図 8(a)に示した等倍模型の解析における走向方向断面（図 5 に示す A-A'断面）上の変位場を図 11 に示す。同図は、本解析においてプッシュアップ側での地表面の隆起現象は再現できているものの、プルアパート側での沈下は再現できていないことを示している。この原因として、プッシュアップ側での領域の隆起がプルアパート側にも干渉していることが挙げられる。しかしそれ以上に、今回扱っている材料が完全排水状態にある超過圧密土であり、せん断に伴う正のダイレイタンスにより図 8(b)のように著しく塑性膨張することでプルアパートにおける質量欠損が埋め合わされてしまうことによる影響が極めて大きい。プルアパート側での隆起を抑制するためには、体積膨張が起こらない等体積条件（非排水条件）での解析を行うとともに、非排水条件での軟化を表現可能な上負荷面（土の骨格構造）を導入した解析が必要となる。あるいは、軟化が起こっても著しい体積膨張を生じないような岩石特有の挙動を構成式として考慮する必要があると考えている。

また、本稿の解析により、ジョグに起因した付随断層構造の形成過程を説明することは出来たととしても、ジョグそのものの形成過程を明らかにすることは出来ない。現象を理解する上では、地盤内でのジョグの形成過程を含む一連の現象を一貫して解くことを目指さなければならない。

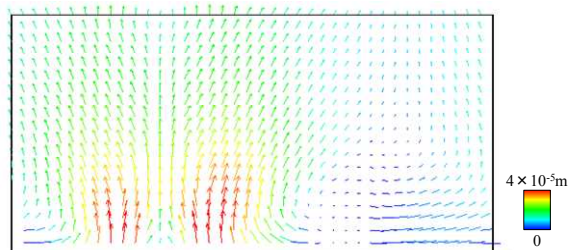


図 11 走向方向断面上の変位ベクトル

※ ベクトルの色は鉛直変位量を表す

#### 謝辞

本研究の一部は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを利用して実施した。また、科学研究費補助金（基盤研究(A)：課題番号 25249064）の助成を受けた。

#### 参考文献

- 1) 国土地理院：平成28年熊本地震に関する情報, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>, 2017年1月.
- 2) Searls, D.: San Andreas fault, <https://www.flickr.com/photos/docsearls/sets/72157600928312546/>, June 29, 2017.
- 3) Tchalenko, J. S.: Similarities between shear zones of different magnitudes, *GSA Bulletin*, Vol.81, No.6, pp.1625-1640, 1970.
- 4) 宇田川義夫：自己組織臨界現象と断層破砕帯のフラクタル, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.28-29, 1995.
- 5) 野田利弘, 山田正太郎, 豊田智大, 浅岡顕：横ずれ断層に伴う表層地盤のリーデルせん断帯の形成に及ぼす材料的初期不整の影響, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, No.2 (応用力学論文集 Vol.18), I\_463-I\_474, 2015.
- 6) Woodcock, N. H. and Fischer, M.: Strike-slip duplexes, *Journal of Structural Geology*, Vol.8, pp.725-735, 1986.
- 7) 奥村晃史：大地震が作る地形を読み解く, 地盤工学会誌 (講座 地盤に刻まれた大地震の足跡), 2017.
- 8) Fossen, H.: *Structural Geology*, Cambridge University Press, pp.377-400, 2nd edition, 2016.
- 9) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils Found*, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 10) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils Found*, Vol.48, No.6, pp.771-790, 2008.
- 11) 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕：過圧密地盤の排水支持力解析, 応用力学論文集, Vol.12, pp.247.254, 2009.
- 12) 上田圭一：横ずれ断層の変位に伴う岩盤の3次元変形過程-ヘリカル X 線 CT を用いた断層変位実験による検討-, 電力中央研究所研究報告, N08039.
- 13) Naylor, M. A., Mandl, G. and Sijpesteijn, C. H. K.: Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states, *Journal of Structural Geology*, Vol.8, No.7, pp.737-752.