

# Riedel せん断帯の形成過程における寸法効果に関する数値シミュレーション

横ずれ断層 Riedel せん断 flower 構造

名古屋大学 学生会員 ○豊田 智大

国際会員 野田 利弘 山田 正太郎

非会員 山田 翔太

地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡 顕

## 1. はじめに

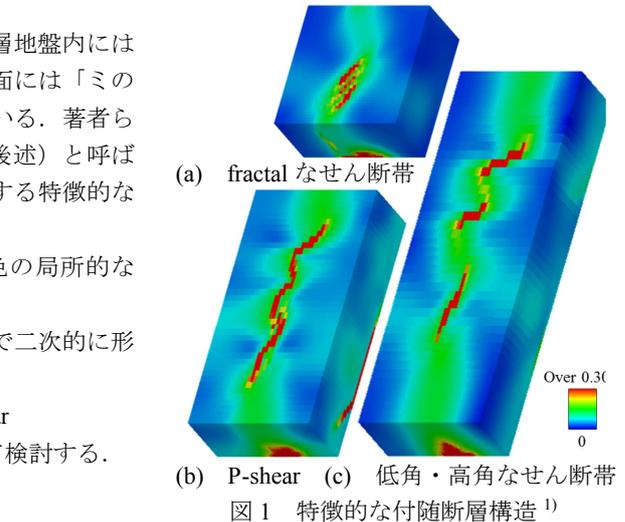
横ずれ断層が地下深部において変位すると、その直上の表層地盤内には flower 構造<sup>1)</sup>と呼ばれる複合的なすべり面が形成され、地表面には「ミの字型」に配列する Riedel せん断帯が出現することが知られている。著者らは、Riedel せん断帯の数値シミュレーションにおいて jog (後述)と呼ばれる幾何学的バリアを考慮した数値解析により、以下に列記する特徴的な付随断層構造が解かれることを示してきた<sup>2)</sup>。

- ・ 図 1(a)のような、緑色の大域的な Riedel せん断が赤色の局所的な Riedel せん断を包含する fractal なすべり構造
- ・ 図 1(b)のような、右斜めに連なる Riedel せん断帯の間で二次的に形成される左斜めのせん断帯 P-shear
- ・ 図 1(c)のような、低角・高角なせん断帯 R-shear・R'-shear

本稿では、Riedel せん断の数値解析における寸法効果について検討する。

## 2. jog とは

横ずれ断層の断層線が直線であることは稀であり、大抵は図 2 のように屈曲や step といった不連続性を含んでいる。jog とは、このような「断層線のすべり線からの逸脱箇所」のことを指し、この jog の存在が flower 構造の形成過程において重要な役割を果たす。図 3 の左横ずれ断層を例にとると、図の手前と奥の 2 箇所断層線の step が存在する。横ずれ変位の累積に伴い、手前側の jog は圧縮されて隆起するのに対し、奥側の jog は引張により陥没が起こる。構造地質学分野では、手前側のような圧縮 jog は push-up、奥側のような引張 jog は pull-apart と呼ばれている。



(a) fractal なせん断帯

(b) P-shear

(c) 低角・高角なせん断帯

図 1 特徴的な付随断層構造<sup>1)</sup>



断層線：— すべり線：- - -

図 2 断層線の不連続性 (イメージ)

## 3. 解析条件

解析には、土の骨格構造概念に基づく土の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model<sup>4)</sup>を搭載した動的/静的水～土骨格連成有限変形解析コード GEOASIA<sup>5)</sup>を用いる。本稿では、一相系解析の結果について紹介する。

**3.1 境界条件** 図 4 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) を用いる。模型底面においては、鉛直変位を拘束した上で、屈曲を含む断層領域を設置し、その両側の節点に y 方向の強制変位 (変位速度： $\dot{\delta}=10^{-6}$ m/s) を与えることで、領域 A では pull-apart の変形場が、領域 B では push-up の変形場がそれぞれ表現されることとなる。その他、x-z 面は周期境界、y-z 面は摩擦なし境界とした。

**3.2 初期条件** 材料定数は既往の解析事例<sup>2)</sup>に倣い設定する。初期状態は、最も簡単なものとして過圧密のみを考え、一様な間隙比 ( $e_0=0.570$ ) を与えた。このとき、構成式は図 5 のように応答する。すなわち材料は、顕著な軟化と塑性膨張を示す超過圧密土としてふるまう。

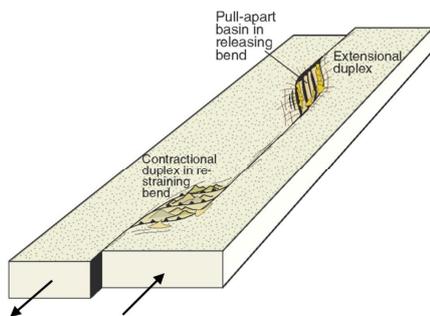


図 3 step を有する左横ずれ断層<sup>3)</sup>

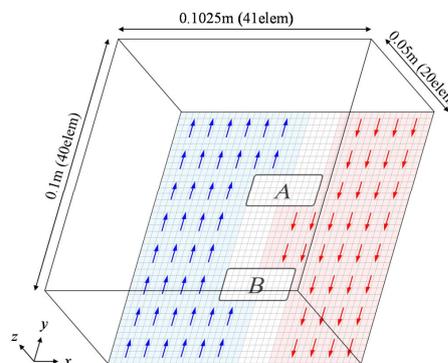
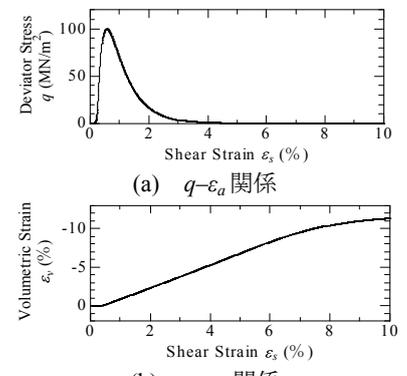


図 4 jog を考慮した有限要素メッシュ



(a)  $q-\epsilon_s$  関係

(b)  $\epsilon_v-\epsilon_s$  関係

図 5 排水三軸せん断時の応答

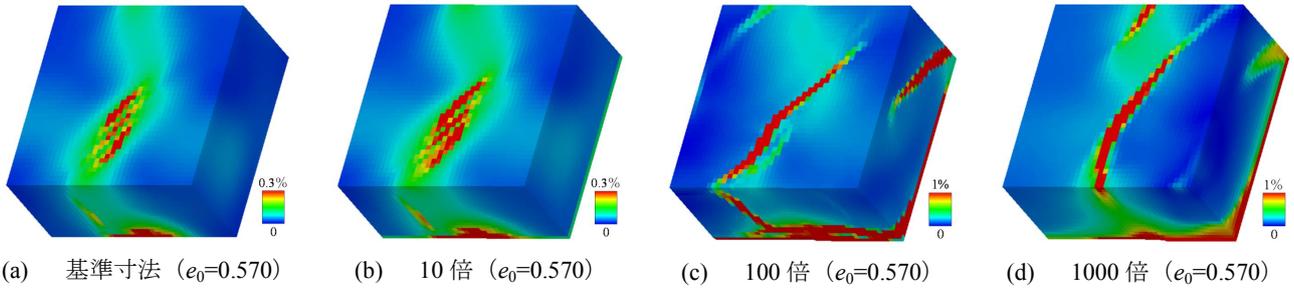


図6 せん断ひずみ分布 (間隙比一定)

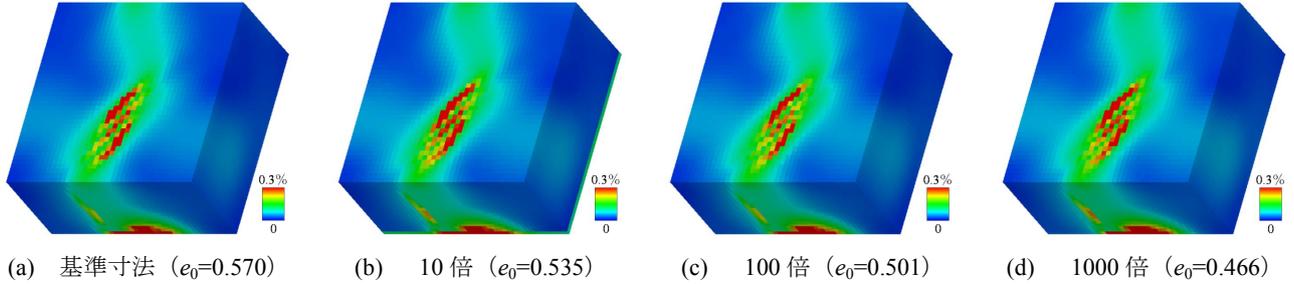


図7 せん断ひずみ分布 (底面過圧密比一定)

#### 4. 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 6(a)に示す。また、この模型を基準として模型寸法と変位速度を 10 倍、100 倍、1000 倍と相対的に拡大した表 1 の模型について、解析結果を図 6(b)~(d)に示す。同図より、寸法の大きい模型では、地表面に単一の Riedel せん断しか生じないことがわかる。これは、寸法の大きい模型では土被り圧の増加により材料が正規圧密状態に近づくため軟化の程度が小さくなり、地表近傍での分岐を伴う spray 現象が生じにくくなったことに起因すると考えられる。事実、底面過圧密比が基準模型と等しくなるように模型間隙比を調整した図 7 の解析では、いずれのスケールにおいても同様のせん断帯が出現する。この結果は、Riedel せん断が「さまざまなスケールで生じる」という fractal 性を裏付けるものである。なお、図 6 の計算を直線の断層領域を設定して解析すると、寸法 10 倍以上の模型では、材料不整の有無にかかわらずせん断帯は出現しない<sup>6)</sup>。このことから、寸法の大きい模型でせん断帯の出現を解くには、jog の存在を考慮して解くことが重要であったといえる。

また、代表的に図 7(c)の模型について、計算終了段階における地表面での隆起量分布を図 8 に示す。同図より、push-up での隆起は解かれているが、pull-apart においても push-up ほど顕著ではないが隆起が生じていることが分かる。これは、pull-apart における幾何的な質量欠損をせん断による材料の塑性膨張が上回ったためであると考えられる。

#### 5. まとめ

横ずれ断層における jog の存在を考慮することで、寸法の大きい模型での Riedel せん断帯の形成過程を解くことができる。また、底面過圧密比を統一すれば、本稿で試したあらゆるスケールにおいて同様のせん断帯の形成が相対的に解かれる。今後は、pull-apart での沈下を解くことに加え、数値解析上のメッシュ依存性についても詳細に検討してゆく。

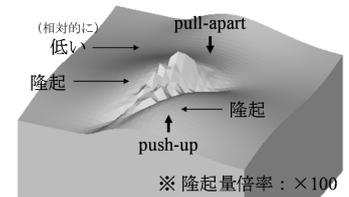
**謝辞** 本研究の数値解析は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータシステムを利用して実施した。また、科学研究費補助金(基盤研究(A):課題番号 17H01289)の補助を受けた。

#### 参考文献

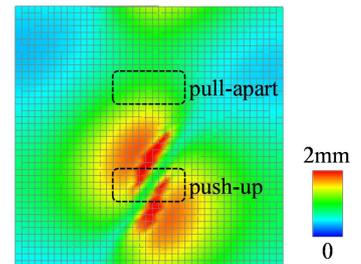
- 1) Riedel, W. (1929): Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen.Zentral-blatt für Mineralogie, Geologie und Paleontologie B, 354-368.
- 2) 豊田, 野田, 山田, 山田 (2016): 横ずれ断層における jog の存在を考慮した..., 土木学会第 72 回年次学術講演会, III-208, 415-416.
- 3) Fossen, H. (2016): Structural Geology, Cambridge University Press, 377-400, 2nd edition.
- 4) Asaoka, A., et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, **42**(5), 47-57.
- 5) Noda, T., et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion..., *S&F*, **48**(6), 771-790.
- 6) 野田, 山田, 豊田, 浅岡 (2015): 横ずれ断層に伴う表層地盤のリーデルせん断帯の形成..., 土木学会論文集 A2, **71**(2), I\_463-I\_474.

表 1 模型高さと载荷速度

| 模型     | 模型高さ $H$ | 载荷速度 $\dot{\delta}$ |
|--------|----------|---------------------|
| 等倍(基準) | 5cm      | $10^{-6}$ m/s       |
| 10 倍   | 50cm     | $10^{-5}$ m/s       |
| 100 倍  | 5m       | $10^{-4}$ m/s       |
| 1000 倍 | 50m      | $10^{-3}$ m/s       |



(a) 地表面の変状



(b) 隆起量分布

図 8 地表面での変形状態