

非線形地盤力学に基く横ずれ断層上の jog の存在を考慮した Riedel せん断帯の生成シミュレーション Simulation of Riedel shear bands formation considering the jog on strike-slip fault based on nonlinear geomechanics

豊田 智大 (名古屋大学・工学研究科) 野田 利弘 (名古屋大学・減災連携研究センター)
山田 正太郎 (名古屋大学・工学研究科) 山田 翔太 (名古屋大学・工学研究科)
浅岡 颯 (地震予知総合研究振興会)
Tomohiro TOYODA, Nagoya University Toshihiro NODA, Nagoya University
Shotaro YAMADA, Nagoya University Shota YAMADA, Nagoya University
Akira ASAOKA, Association for the Development of Earthquake Prediction
FAX: 052-789-3836, E-mail: toyoda.tomohiro@i.mbox.nagoya-u.ac.jp

A slip on strike-slip fault causes flower structures and Riedel shear bands within the overlying cover. In our former research, the Riedel shear bands formation process was simulated considering the material imperfection in ground by utilizing the three-dimensional elasto-plastic finite deformation analysis code **GEOASIA**. On the other hand, it's known that the existence of jog (geometrical barrier) has an important role on the formation process. This paper simulates a strike-slip faulting process considering jog as a geometrical imperfection in ground on the strike-slip fault. As a result, the formation processes unique to subsidiary fault such as fractal shear bands, P-shear, low and high angle shears appeared.

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、Fig. 1のように断層の走向方向に対して斜めに連なる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分岐断層の一形態として知られており、Riedelせん断帯と呼ばれている。また、地表面にRiedelせん断帯が出現するとき、表層地盤内部にはflower構造とよばれる花卉状のすべり面が主断層を起点として三次元的に形成されることが知られている。野田ら²⁾は材料不整の導入によりRiedel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.³⁾によれば、このflower構造は幾何不整、すなわちFig. 2に示すような横ずれ断層が不連続に配置するjog（幾何学バリア）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、Fig. 2奥側のように、jog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Fig. 3(a)のような負のflower構造が形成されて局所的な沈下を生じる。このような伸張性のjogはpull-apartと呼ばれる。これに対し、Fig. 2手前側のようにjog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Fig. 3(b)のような正のflower構造が形成されて局所的な隆起を生じる。このような圧縮性jogはpush-upと呼ばれる。本稿では、これらのpull-apartやpush-upといった不連続な断層変位を境界条件として考慮した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jogの存在に起因した付随断層構造の形成プロセスを数値解析的に再現することを目指す。

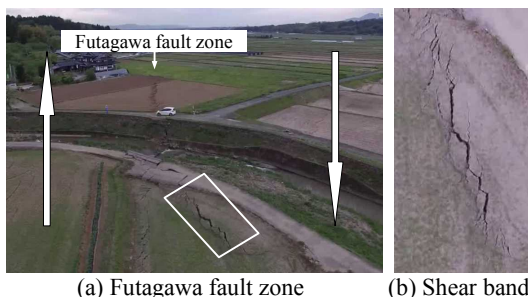
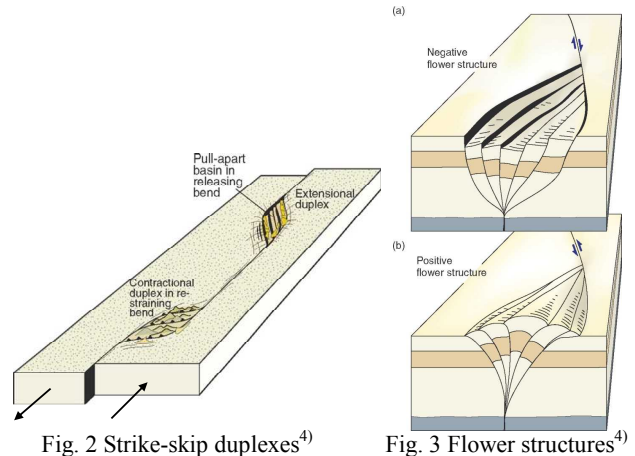


Fig. 1 Riedel shear bands generated by the fault displacement¹⁾



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を搭載した静的/動的水～土骨格連成弾塑性有限変形解析コード**GEOASIA**⁵⁾を用いる。Fig. 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)を用いた。模型底面においては、鉛直変位を拘束した上で、Fig. 5に示すような屈曲した断層領域を設置し、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では引き離されてpull-apartが、領域Bでは圧縮されてpush-up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。SYS Cam-clay modelの材料定数は、既往の解析事例²⁾と同一のものを設定する。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Fig. 6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た後、ピーク強度発現後に著しい軟化を示す超過圧密土としてふるまう。

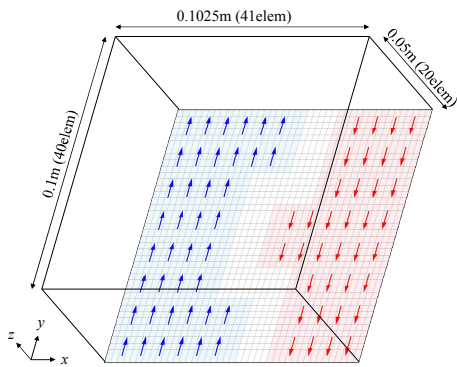


Fig. 4 Finite element mesh

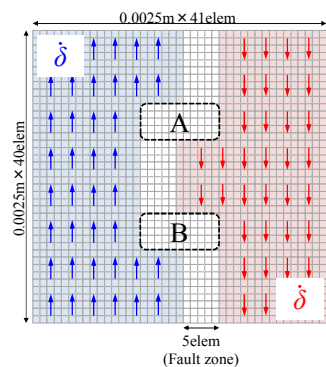


Fig. 5 Boundary Condition at the bottom

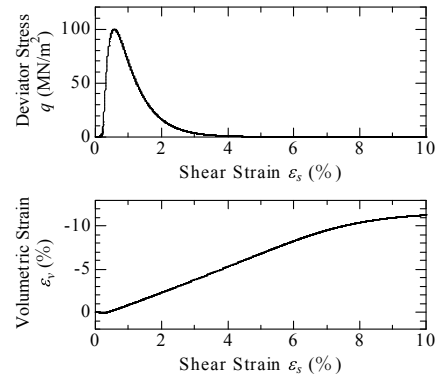


Fig. 6 Drained triaxial behavior

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 Fig. 7 に示す。また、この模型寸法を y 軸（走行）方向に 2 倍、3 倍に拡大することで jog の間隔を変更した模型の解析結果を同図(b), (c) に併せて示す。

まず、等倍模型について、Fig. 7(a) のように push-up 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 fractal な形態をとっている。この結果は、上田⁶⁾の模擬岩盤を対象とした模型実験の結果にも極めてよく符合する。

次に 2 倍模型について、Fig. 7(b) の地表面の変状をみると、Riedel せん断帯を互いに接続するように P-shear⁷⁾ と呼ばれる Riedel せん断帯とは異なる向きを持つせん断帯が形成されていることが確認できる。上田⁶⁾によれば、P-shear は乾燥砂地盤には出現せず、模擬岩盤においてのみ出現するせん断帯であることから、解析により P-shear を再現できたのは、脆性的な挙動を示す超過圧密土を用いた解析により模擬岩盤の挙動を正確に捉えることができたためであると考えられる。

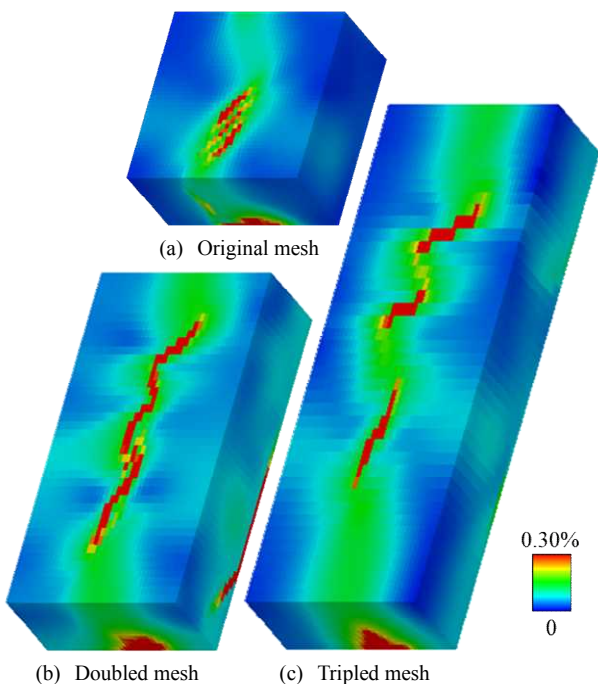


Fig. 7 Shear strain distributions

また、3 倍模型の解析においては、Fig. 7(c) をみると、push-up 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働的に形成され、pull-apart 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働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

横ずれ断層における jog（幾何学的初期不整）を境界条件として考慮した弾塑性有限変形解析により、fractal な Riedel 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を再現できた。今後は、jog そのものの形成過程を含めた一連の現象を一貫して解くことで、統一的な現象の理解を目指す。

謝辞 本研究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用いて実施した。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 年度熊本地震に関する情報、<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>, 2017.1 閲覧。
- 2) 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, I_463-I_474, 2015.
- 3) Woodcock, N. H. and Fischer, M.: Strike-slip duplexes, *Journal of Structural Geology*, Vol.8, pp.725-735, 1986.
- 4) Fossen, H.: *Structural Geology*, Cambridge University Press, pp.377-400, 2nd edition, 2016.
- 5) 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.
- 6) 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, 2009.
- 7) Naylor, M. A., Mandl, G. and Supesteyn, 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, 1986.