

三次元弾塑性解析による横ずれ断層線の逸脱量が Riedel せん断の発生角度に与える影響に関する検討

Investigation on the effects of geometrical deviation of strike-slip fault on fracturing angles using the 3-dimensional elasto-plastic analysis

豊田智大¹⁾ 野田利弘²⁾ 山田正太郎³⁾ 山田翔太⁴⁾ 浅岡顕⁵⁾
Tomohiro Toyoda, Toshihiro Noda, Shotaro Yamada, Shota Yamada and Akira Asaoka

¹⁾名古屋大学 工学研究科 (〒 464-0825 愛知県名古屋市千種区不老町, E-mail: toyoda.tomohiro@i.mbox.nagoya-u.ac.jp)

²⁾名古屋大学 減災連携研究センター (〒 464-0825 愛知県名古屋市千種区不老町, E-mail: noda@civil.nagoya-u.ac.jp)

³⁾名古屋大学 工学研究科 (〒 464-0825 愛知県名古屋市千種区不老町, E-mail: s-yamada@civil.nagoya-u.ac.jp)

⁴⁾名古屋大学 工学研究科 (〒 464-0825 愛知県名古屋市千種区不老町, E-mail: yamada.shota@f.mbox.nagoya-u.ac.jp)

⁵⁾地震予知総合研究振興会 (〒 101-0064 東京都千代田区神田猿樂町 1-5-18, E-mail: asaoka@civil.nagoya-u.ac.jp)

An existence of jogs on a strike-slip fault causes transtensional/transpressional zones, which are under superposition of pure shear and tension/compression. This study conducts 3-dimensional elasto-plastic analysis changing the magnitude of jog deviations. Followings are the main achievement of our manuscript: (1) The larger jog deviation gives the larger difference of shear angles between transtension-transpression and (2) The different angles can be understood as the different rotations of principal stresses.

Key Words : strike-slip fault, Riedel shear, flower structure, jog, elasto-plasticity, FEM

1. はじめに

横ずれ断層が変位すると、その上に堆積した表層地盤の地表面には「Riedel せん断」と呼ばれる特有の断層変位地形が出現することが知られている。これは、横ずれ断層に沿って斜めに連なる亀裂群のことを指し、右横ずれ断層であれば、図-1 のような「ミの字型」に、左横ずれ断層であれば逆に「メの字型」に配列する。そして、このような地形の形成過程には、横ずれ断層線の凹凸、すなわち jog と呼ばれる「断層線のすべり線からの逸脱」の影響が無視できないとされる。例えば、図-2 に示す左横ずれ断層は、図の奥側と手前側に 2 箇所の屈曲 (bend jog) を含んでいる。奥側の jog は断層変位の累積に伴い引かれて落ち込むことから releasing bend または pull-apart jog と呼ばれるが、横ずれ変位による純せん断に jog の効果としての引張が競合する変形場であることから transtension zone と呼ばれる。一方、手前側の jog は押されて盛り上がることから restraining bend または push-up jog と呼ばれるが、こちらは純せん断に jog の効果としての圧縮が競合する変形場となるため transpression zone と呼ばれる。

著者らはこれまでに、このような jog の存在を境界条件として考慮した 3 次元弾塑性解析により、横ずれ断層変位に起因して生じる特有の変状、たとえば、fractal (入れ子状) に発達する Riedel せん断や、Riedel せん断間を接続する P-shear などの形成過程が数値解析によって演繹的に解かれ得ること、言い換えれば、これらの地形が jog の形態の違いから一貫して再現計算可能となりうることを示してきた [3]。また、Riedel せん断が地表面に形成されるとき、地盤内に発達する花卉状の複合的なすべり面 (flower 構造) の出現が解かれることや

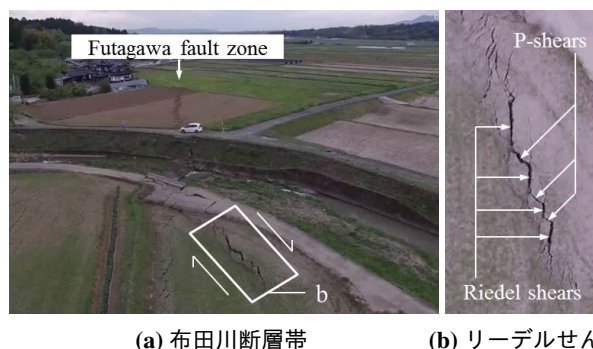


図-1 熊本地震の布田川断層帯上で生じた Riedel せん断帯 [1]

[4]、これらの変状の出現形態における寸法効果についても議論してきた [5]。本稿では、Riedel せん断の発生角度に及ぼす jog の逸脱量の影響について検討した結果を示し、jog の逸脱量が大きくなるほど、push-up 側と pull-apart 側での Riedel せん断の発生角度の差が大きくなること、さらに、このことが主応力方向の回転の程度の違いから解釈可能であることを示す。なお、ここでの jog の逸脱量を変えた計算は、横ずれ断層線の幾何不整の程度の影響に関する検討と見做すこともできる。

2. 解析条件

数値解析には、土の骨格構造概念に基づく土の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model [6] を搭載した地盤の有限変形解析コード GEOASIA [7] を用いる。ただし、本稿では間隙水の存在を考慮しない一相系条件での解析結果のみを示す。以下に示す解析条件については、原則として先行研究 [3] に倣い設定する。

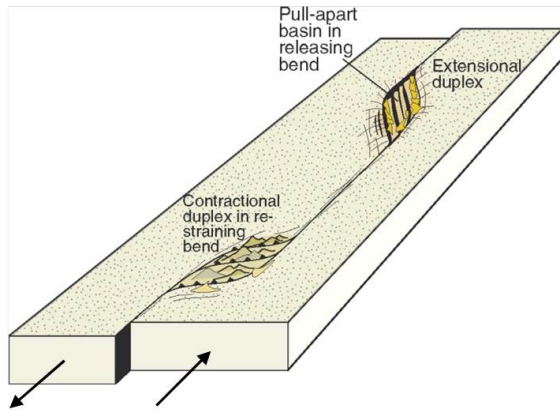


図-2 jog に起因して生じる断層変位地形 [2]

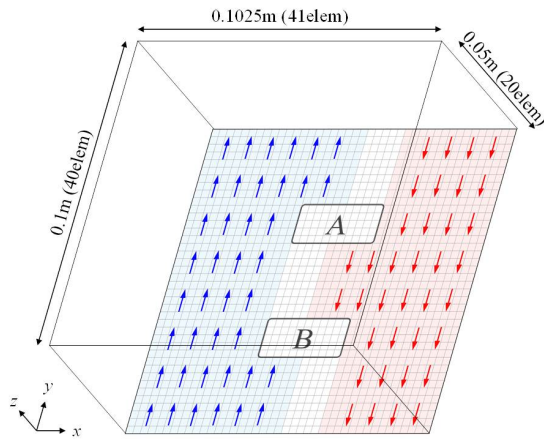


図-3 有限要素メッシュ

(1) 有限要素メッシュと境界条件

有限要素メッシュには、図-3 のような三次元直方体メッシュ (要素数: 32800) を用いる。ここでは、 y 軸を横ずれ断層の走向方向にとり、 z 軸を鉛直上向きにとる。寸法は図中に付記したものをを用いるが、模型高さは上田 [8] による模型実験に準拠し 5cm とする。境界条件について、模型底面においては、鉛直変位を固定した上で、屈曲した (直線でない) 断層領域 (幅: $D=7.5\text{mm}$, 3 要素) を設定し、その両側の節点に y 方向の強制変位 (変位速度: $\delta = 10^{-6}\text{m/s}$) を与える。これにより、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。側面については、 y - z 平面では摩擦なし条件を与え、 x - z 面では周期境界を設定することで、走行方向に周期的に連なる無限領域を想定した。

(2) 材料定数と初期状態

材料定数は、表-1 のとおり設定する。土の骨格構造の初期状態は、最も簡単な状態として過圧密のみ (構造なし、異方性なし) を考え、一様な空隙比 ($e_0=0.57$) を与える。このとき、地盤内における初期時刻での鉛直土かぶり圧、空隙比、過圧密比の分布はそれぞれ図-4 のようになる。とくに、鉛直下向きの自重により、初期過圧密比は土かぶり圧に応じて図-4(c) のように鉛直方向に非一様に分布することとなる。以上の条件の下で、SYS Cam-clay model は三軸完全排水せん

表-1 材料定数

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

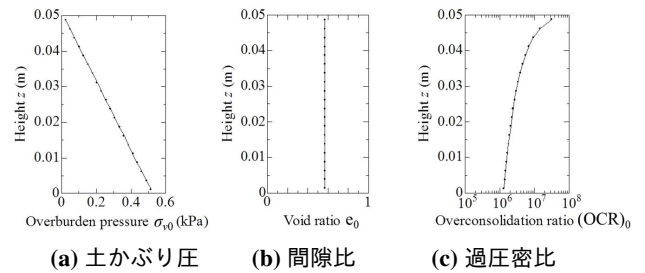


図-4 初期状態

断時に図-5 のような応答を示す。すなわち、材料は正のダイレイタンスにより顕著な塑性膨張を示す超過圧密土である。SYS Cam-clay model は本来土質材料を対象に提案された構成式だが、比体積を十分に小さく (極めて密になるように) 設定することで、ピーク強度発現後に著しい軟化を示す、岩盤材料のような脆性的な応答を模擬することができる。なお、図-5 の応答は模型の中央深さの拘束圧における土の応答であり、横軸のせん断ひずみ ε_s は Euler ひずみ \mathbf{e} を用いて次式で表現している。

$$\varepsilon_s = \sqrt{\frac{2}{3} \mathbf{e}' \cdot \mathbf{e}'}, \quad \mathbf{e}' = \mathbf{e} - \frac{1}{3}(\text{tr} \mathbf{e})\mathbf{I} \quad (1)$$

ここに

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2} \left(\mathbf{I} - (\mathbf{F}\mathbf{F}^T)^{-1} \right) \quad (2)$$

であり、 \mathbf{I} は恒等テンソル、 \mathbf{F} は変形勾配テンソル、上付き T は転置作用素を表す。

3. 解析結果

図-3 に示した模型について、 y 軸方向 (断層の走向方向) の模型寸法を $\alpha = 1, 2, 3$ 倍に拡大し、jog の逸脱量を $d = 5\text{mm}$ (2elem), 10mm (4elem), 15mm (6elem) と変更した (図-6) 計 9 ケースの解析終了段階におけるせん断ひずみ分布を図-7 に示す。同図の黒色で示される部分はひずみが局所化している箇所であり、右横ずれ断層上で右斜めにつらなる Riedel せん断が解かれていることを意味する。ここでは、計算により得られたせん断帯の発生角度について議論する。

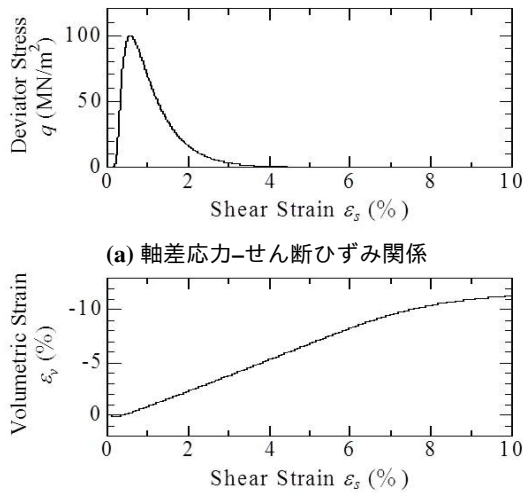


図-5 三軸完全排水せん断時の構成式応答

4. push-up 側と pull-apart 側での比較

まず、同図 (i) に着目すると、push-up 側では走行方向に対して低角な Riedel せん断が出現するのに対し、pull-apart 側では高角な Riedel せん断が出現している。これについてより詳細に考察するため、同図 (i) を拡大した上で、地表面のせん断帯上の地点 A~C において解析により得られた主応力方向を併記したものを図-8 に示す。ただし、圧縮を正として、 σ_1 は最大主応力、 σ_3 は最小主応力を表しており、地表面は平面応力状態にあるため、中間主応力 σ_2 は鉛直方向に作用する。構造地質学分野においては、Riedel せん断には角度の異なる 2 つの出現形態が存在することが知られており、1 つは R-shear、もう 1 つは R'-shear と呼ばれる。谷らの論文群によれば、(A) R-shear が走向となす角 θ_R は、 σ_1 軸が走向となす斜行角度 ψ と有効内部摩擦角 ϕ' を用いて

$$\theta_R = \psi - \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (3)$$

と表され [9]、(B) R'-shear は R-shear と共役な関係にある [10]。そこで、図-8 の各地点での主応力に対して (A)(B) より算定される R-shear と R'-shear の向きをそれぞれ算定し、これを図-8 中に併記すると、R-shear は黄線、R'-shear は緑線となる。ここで、有効内部摩擦角 ϕ' は、一相系解析であることを考慮して限界状態定数 M より次式で算定した。

$$\sin \phi' = \frac{3M}{6+M} = \frac{3}{7} \implies \phi' = 25.4^\circ \quad (4)$$

特定した R-shear と R'-shear の位置を解析結果と比較すると、push-up 側における低角なせん断帯の角度は R-shear に概ね一致し、pull-apart 側における高角なせん断帯の角度は R'-shear に概ね一致していることがわかる。この結果は、jog 近傍での応力場、すなわち transtension と transpression の違いが、互いに共役な Riedel せん断の片方を選択的に誘発する因子となっている可能性を示唆するものである。

ここで注目したいのが、断層線の逸脱量 d が小さいほど、push-up 側と pull-apart 側でのせん断帯の角度の差異もまた小さくなる点である。とくに、jog の逸脱量が

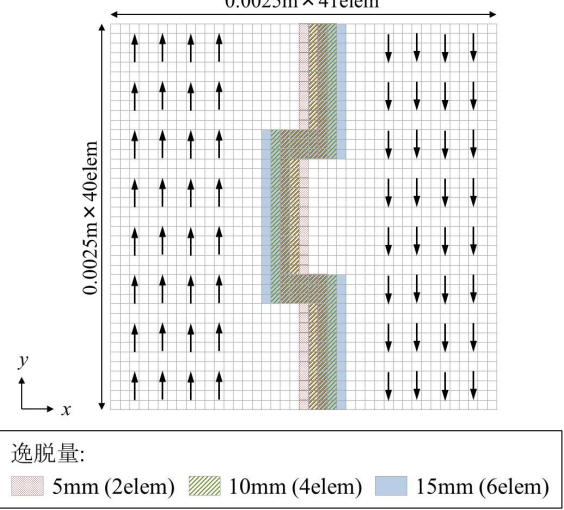


図-6 模型底面における断層領域の設定方法

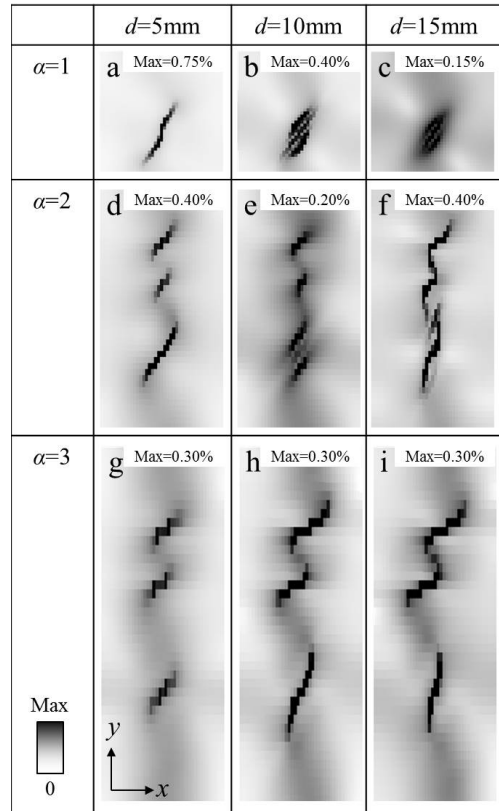


図-7 解析終了時のせん断ひずみ分布

小さい $d=5\text{mm}$ のケースではせん断帯の角度は push-up 側と pull-apart 側でほぼ等しくなっている。このことは、模型倍率 α によらず言える。この理由について考えるため、3 倍模型を例にとり、地表面での主応力分布が jog の逸脱量に応じてどのように変化するか調べてみよう。図-9 は、push-up jog、pull-apart jog 直上の地表面での最大主応力 σ_1 の方向と jog の逸脱量 d の関係をプロットしたものである。ただし、最大主応力方向は、断層走行方向から時計回りを正として表示している。同図より、以下のことが言える。

- (1) 緑色で示される 45 度線は圧縮や引張が競合しない純せん断の応力場を表しているが、push-up/pull-apart 領域周辺は、jog の存在により transpression/transtension 下にあるため、応力場も純せん断からずれたものとなる。今回の解析において、最大主応力方向は、push-up 側 (赤線) では 45° より常に大きく、逆に pull-apart 側 (青線) では 45° より

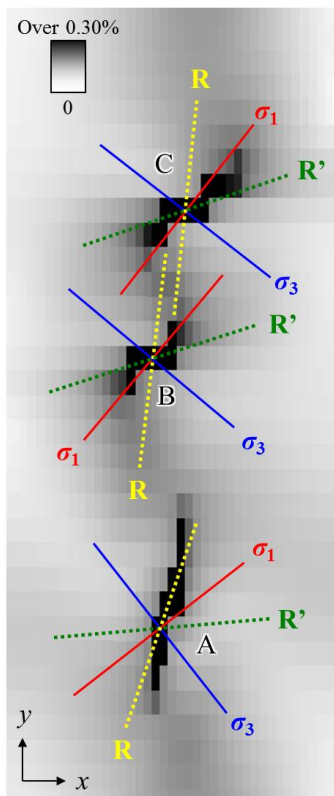


図-8 図-7(i)における地表面での主応力方向

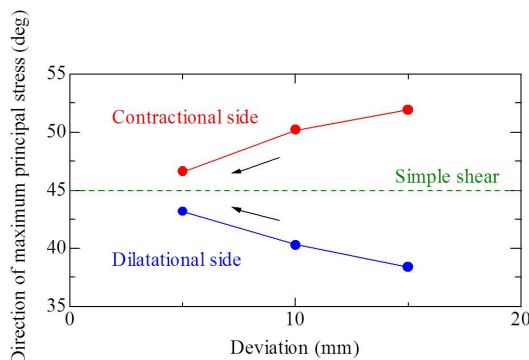


図-9 jogの逸脱量と最大主応力方向の関係(3倍模型)

り小さくなっていることが確認できる。すなわち、圧縮/引張の競合が主応力方向をそれぞれ時計回り/反時計回りに回転させていることがわかる。先に確認したとおり、主応力方向とRiedelせん断の間に関係があることを踏まえると、push-up側とpull-apart側のせん断帯の角度の差もまた、jogによる主応力の回転方向の違いに起因すると考えられる。

- (2) 断層領域の幅 d が小さくなるほど、最大主応力方向は純せん断の 45° に近づく。これは、jogの逸脱量が小さくなるほど、transpression/transensionに占める純圧縮/純引張の割合が小さくなることによる。逸脱量の小さい $d=5\text{mm}$ のケースで push-up側と pull-apart側のRiedelせん断の角度の差が小さくなる理由もこれに起因すると解釈できる。

5. まとめ

3次元弾塑性解析により、横ずれ断層上のjogの逸脱量がRiedelせん断の発生角度に及ぼす影響を調べた。jog

の逸脱量が大きくなるほど、transpression/transensionに占める圧縮/引張の相対的な割合が増す。これに伴う主応力の回転方向の相違によって、push-up/pull-apart側ではそれぞれ走行方向に対して低角/高角な異なる角度のせん断帯が生じることとなる。これらの角度はMohr-Coulomb規準より推定されるR-shear/R'-shearの角度と等しいことから、jogの形態の違いが共役なすべり片方を誘発する因子となっていることが示唆される。

6. 今後の予定

jogの逸脱パターンを変えた解析ケースを蓄積することで、地表の断層変位地形の出現形態をjogの観点から分類/整理してゆきたい。また、二相系解析を実施することで、本解析における間隙水の影響や透水係数・載荷速度の効果についても調べてゆく。

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] 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>, 2019年4月3日閲覧。
- [2] Fossen, H.: Structural Geology, Cambridge University Press, pp.377-400, 2nd edition, 2016.
- [3] 豊田智大 他: 非線形地盤力学に基づく横ずれ断層上の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, 第64回理論応用力学講演会, OS3-02-06, 2017.
- [4] 豊田智大 他: Jogの存在を考慮したflower構造を伴うRiedelせん断帯の弾塑性有限変形解析, 極大地震時における表層地盤の強い非線形現象とその影響に関する研究シンポジウム, pp.67-76, 2018.
- [5] 豊田智大 他: 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, 第53回地盤工学研究発表会, pp.1799-1800, 2018.
- [6] Asaoka, A. et al.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils Found, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- [7] Noda, T. et al.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating SYS Cam-clay model, Soils Found, Vol.48, No.6, pp.771-790, 2008.
- [8] 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 研究報告書, N08039, 2009.
- [9] 谷和夫 他: 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, pp.21-39, 1997.
- [10] 小山良浩, 谷和夫: 横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の表面に発達するせん断帯の構造分析, 土木学会論文集, Vol.750, pp.171-181, 2003.