

横ずれ断層に伴うフラワー構造を伴うリーデルセン断帯生成の数値シミュレーション

名古屋大学 学生会員 ○川合裕太
名古屋大学 フェロー会員 野田利弘 正会員 山田正太郎
地震予知総合研究振興会 フェロー会員 浅岡顕 正会員 澤田義博

1. はじめに

横ずれ断層の活動時は、断層上部の地盤内部で深部から地表に向かって枝分れたフラワー（花卉状）構造や地表面でリーデルセン断（雁行状せん断）帯（写真 1¹⁾）などが付随発生することが知られている。上田²⁾は、横ずれ断層模型実験を実施し、X線 CT スキャンを用いて地盤内部でのせん断帯の発達過程を調べた。また、澤田・上田³⁾は、構成式にモール・クーロン破壊規準に基づく弾完全塑性体を用いた大変形解析を実施し、上記模型実験にて確認したリーデルセン断等の形成過程をシミュレートしている。

本研究では、骨格構造概念に基づく土の構成式 **SYS Cam-clay model**⁴⁾ を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**⁵⁾ を用いて、澤田・上田と同様に、横ずれ断層に伴う上部地盤のせん断帯発生過程の再現を試みた。以下では、はじめにフラワー構造の生成のみを目的とした 2 次元メッシュを用いた解析の結果を示した後、フラワー構造を伴うリーデルセン断帯の生成を目的とした 3 次元メッシュを用いた解析の結果を示す。なお、いずれも水と連成させない一相系で解析を実施した。



写真 1 サンドレアス断層沿いに発達したリーデルせん断帯¹⁾

2. フラワー構造の生成のみを目的とした解析

2.1 解析条件 上田の模型実験¹⁾を参照し、断層の走向方向（y 方向）に 1 つ有限要素を配置した 2 次元メッシュを用いて 3 次元解析を実施した。中央下端の 3 要素を断層部分とみなし右横ずれ断層を想定した。境界条件として、y 方向の向かい合う垂直な面（x-z 面）のうち、断層直上部分には周期境界を、それ以外には一様な y 方向の強制変位（定率速度 10^{-6} m/s）を、断層部分を挟んで逆向き（図 1(a)に矢印で示した向き）に与えるとともに、x-z 面および y-z 面は摩擦なしの条件とした。SYS Cam-clay model の材料定数は、既往の排水支持力の計算⁶⁾に用いた値と同じ値を用いた。初期値については、初期構造なし ($R_0^*=1.0$)、初期異方性なし ($\zeta_0=0.0$)、初期等方応力状態 ($K_0=1.0$) にある超過圧密土 ($R_0=10^6$) を想定して与えた。これらの材料定

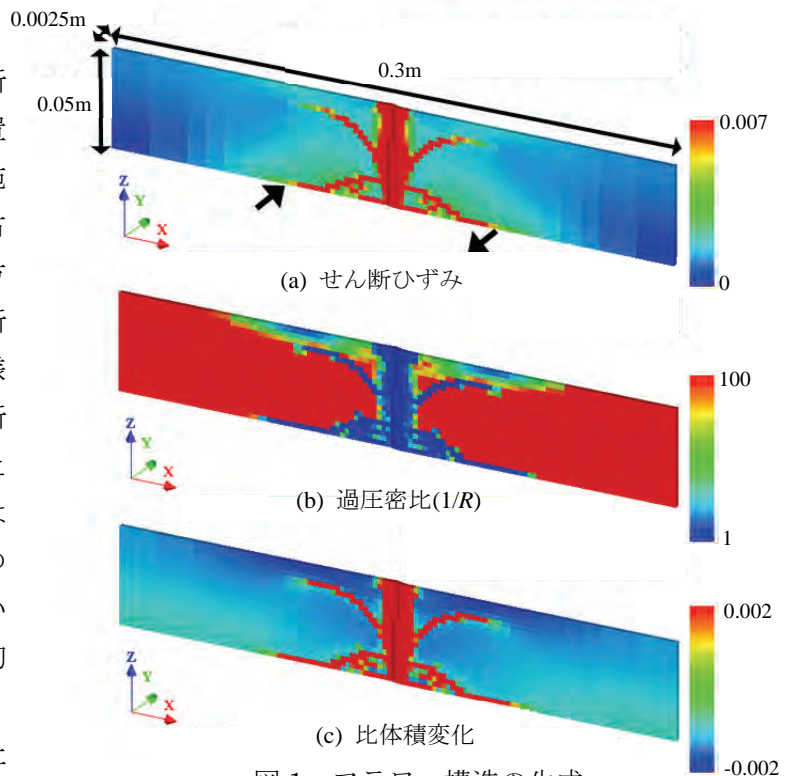


図 1 フラワー構造の生成（せん断ひずみ分布）

キーワード 横ずれ断層，リーデルせん断，フラワー構造，数値解析

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学 大学院 工学研究科 TEL 052-789-4621

数と初期値を与えた時 **SYS Cam-clay model** は排水せん断により比較的小さなひずみ領域で膨張を示した後、やはり小さなひずみ領域でせん断応力 q がピークを示し低下する。

2.2 解析結果 図1に十分にせん断が進んだ後の諸量の分布を示す。せん断帯は地盤下端の断層部分から発生し、横ずれの増大に伴い、上部に向かって上に凸な対数螺旋形状（フラワー構造）を示している。せん断帯（ひずみの局所化領域）では過圧密が解消し、体積が膨張している。なお、初期過圧密比を小さくして、膨張しにくい状態にすると、フラワー構造は表れなかった。

3. フラワー構造を伴うリーデルせん断帯の生成を目的とした解析

3.1 解析条件 次も上田の模型実験²⁾を参照するが、ここでは土層全体を解析対象とする。y方向に40要素を配置しx-z面に周期境界を設定した3次元メッシュを用いて解析を実施した。下端節点には、断層部分を挟んで一様なy方向の強制変位（速度 10^{-6} m/s）を逆向きに与えた。下端の断層部分の土要素について材料定数（NCLの切片N）に違いを与えることで初期不整を与えた。

3.2 解析結果 解析の結果、地盤内部でフラワー構造が複数発生後、地表面まで到達し、雁行状のリーデルせん断帯が現れた。図2に様々な方向から見たせん断ひずみ分布を示す。(b)は(a)に示す線における断面図である。また、(c)は変形を200倍に拡大している。(a)より地表面において断層の走行方向から傾いたリーデルせん断帯の発生を確認できる。(b)より地盤内部にはフラワー構造が複数発生している様子を見て取れる。また、(c)より、リーデルせん断帯部分は、隆起を示していることがわかる。なお、初期不整がない場合は、断層に平行なせん断帯が現れるのみで、リーデルせん断帯は生成されなかった。また、材料定数の違いに応じてリーデルせん断と走向方向のなす角が変化した（「内部摩擦角」 ϕ' が小さい場合、このなす角は小さくなった）。

4. おわりに

本稿では、地盤解析コード **GEOASIA** を用いて、横ずれ断層に伴う上部地盤のせん断帯発生過程の再現結果を示した。なお、同解析コードは速度型の運動方程式を忠実に時間積分して運動を求める動的問題にも対応可能なコードであり、せん断帯発生に伴う波動生成や波動伝播も再現可能である^{7),8)}。結果は示さなかったが、条件によっては波動生成が顕著に見られる場合もあった。今後はこの観点から更に研究を深めてゆく。

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(S)：課題番号 21226012，基盤研究(A)：課題番号 25249064，基盤研究(B)：課題番号 25289143）の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献)

1) Wallace R.E. (1990): The San Andreas Fault System, California, *USGS Professional Paper 1515*.
 2) 上田 (2003): 横ずれ断層系の発達過程ならびに変位地形の形成過程, 電力中央研究所研究報告:U03021
 3) 澤田, 上田 (2009): 横ずれ断層の進展に伴う地盤の破壊領域評価のための..., 電力中央研究所研究報告:N08028
 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) 山田ら (2009): 過圧密地盤の排水支持力解析, 応用力学論文集, **12**, 247-254.
 7) Noda, T., et al. (2013): Acceleration generation due to strain localization of saturated clay specimen based..., *S&F*, **53**(5), 653-670.
 8) 浅岡, 山田, 野田 (2013): 地表面載荷による地盤の破壊現象と破壊に伴う振動の発生..., 日本地球惑星科学連合大会概要集.

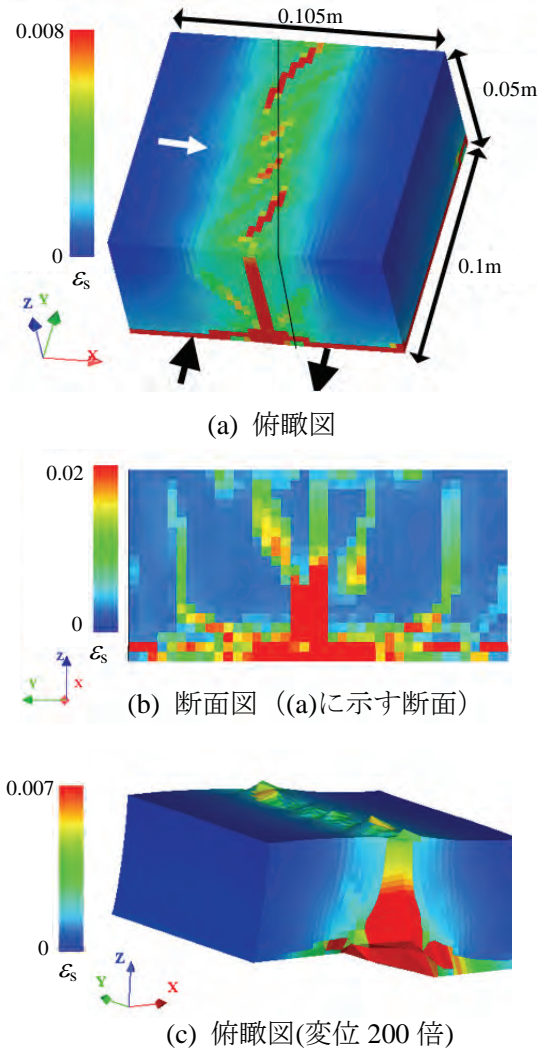


図2 フラワー構造を伴うリーデルせん断帯の生成（せん断ひずみ分布）