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

名古屋大学	学生会員	〇川合裕太		
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 分れしたフラワー(花弁状)構造や地表面でリーデルせん断(雁行状せん断) 帯(写真1<sup>1)</sup>)などが付随発生することが知られている.上田<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>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 認したリーデルせん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<sup>4)</sup>を登 載した水〜土骨格連成有限変形解析コード *GEOASIA*<sup>5)</sup>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せん断帯の生成 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<sup>1)</sup>

2. フラワー構造の生成のみを目的とした解析 0.0025m 2.1 解析条件 上田の模型実験<sup>1)</sup>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<sup>-6</sup>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 %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<sub>0</sub>=1.0)にある超過圧密土 (R<sub>0</sub>=10<sup>6</sup>)を想定して与えた.これらの材料定



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 0.008
3.1 解析条件 次も上田の模型実験 <sup>2)</sup>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<sup>-6</sup>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 <sup>0</sup> 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 の位置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

## 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<sup>7),8)</sup>.結果は示さなかった (a) (find the descent of the desc

0.105m

0.05m

(c) 俯瞰図(変位 200 倍)

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)

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る. 参考文献)

-742-

<sup>1)</sup> Wallace R.E. (1990): The San Andreas Fault System, California, USGS Professional Paper 1515.

<sup>2)</sup> 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

<sup>3)</sup> 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

<sup>4)</sup> Asaoka, A., et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S&F, 42(5), 47-57.

<sup>5)</sup> Noda, T., et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion  $\cdots$ , S&F, 48(6), 771-790.

<sup>6)</sup> 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.

<sup>7)</sup> Noda, T., et al. (2013): Acceleration generation due to strain localization of saturated clay specimen based…, *S&F*, **53**(5), 653-670.

<sup>8)</sup> 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.