

横ずれ断層に伴う地表面のリーデルせん断帯の発生に及ぼす材料的初期不整の影響

リーデルせん断 数値解析 横ずれ断層

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

地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡 顕

1. はじめに

San Andreas 断層に代表される横ずれ断層においては、その運動に伴う付随断層として断層上に堆積する表層地盤にフラワー（花卉状）構造が発達するとともに、地表面においては図 1 のような雁行状のリーデルせん断帯が発現することが知られている¹⁾。前報²⁾では、骨格構造概念に基づく土の構成式 SYS Cam-clay model³⁾を搭載した静的/動的水～土骨格連成有限変形解析コード GEOASIA⁴⁾を用いることにより、フラワー構造を伴うリーデルせん断帯の発生過程が数値解析的に再現できることを示した。本報では、地盤に与える材料的な初期不整に応じて、形成されるリーデルせん断帯の様相が異なることを示す。



図 1 San Andreas 断層にみられるリーデルせん断¹⁾

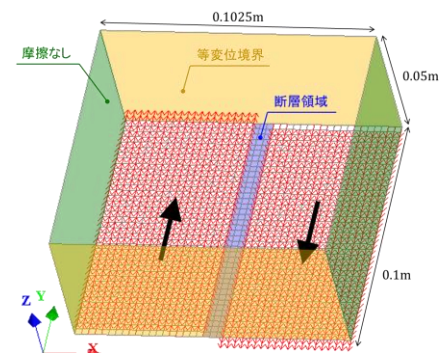


図 2 有限要素メッシュと境界条件

2. 断層領域上の地盤底面の土要素に周期的に材料的初期不整を与えた解析

2.1 解析条件 既往の解析²⁾と同様に模型地盤を想定し、土骨格を水と連成させない一相系材料として解析を実施した。図 2 のように y 軸を横ずれ断層の走向方向にとり、x-z 面に周期境界を設定した 3 次元直方体メッシュを用いた。メッシュ底面の節点には一様な y 方向の強制変位（速度 10^{-6} m/s）を断層部分を挟んで逆向きに加え、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⁵⁾と同一のものを設定する。ただし、材料的な初期不整を与えるため、正規圧密線の切片 N は地盤内で不均質な分布とした（後述）。初期値は、地盤全体で構造なし ($R_0^*=1.0$)、異方性なし ($\zeta_0=0.0$)、等方応力状態 ($K_0=1.0$) とし、一様に間隙比 ($e_0=0.57$) を与えた。この結果、初期の力のつり合いを満足したまま、N の不均質性に応じて過圧密比 ($1/R_0$) が不均質になる。

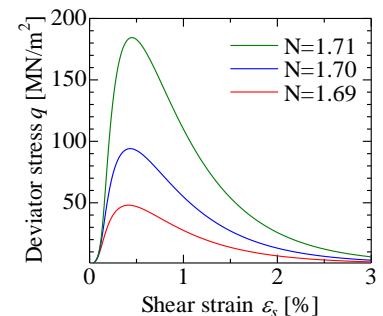
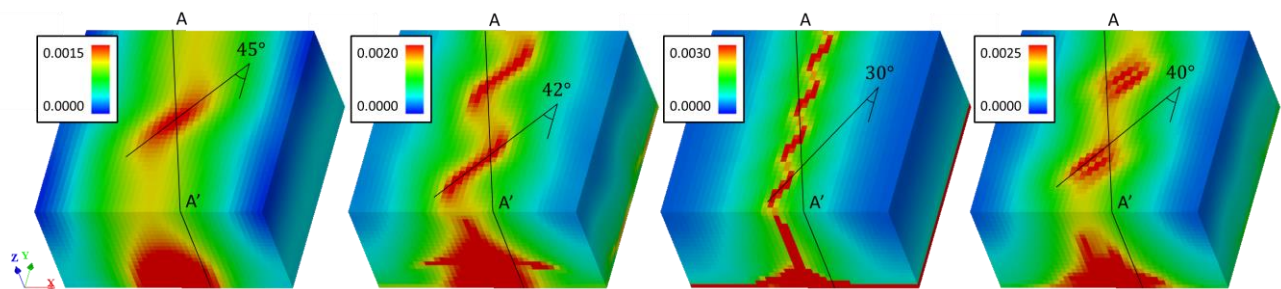


図 3 材料の排水せん断時の応答
一様に間隙比 ($e_0=0.57$) を与

これらの材料定数と初期値を与えたとき、SYS Cam-clay model は三軸排水せん断時に図 3 の応答を示す。すなわち、この土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大きく軟化を示す超過圧密土である。また、初期不整として N をより小さく与えることによって、相対的にピーク強度が小さく、しかも、小さいせん断ひずみで軟化に転じる材料（地盤内の弱点）を表現することができる。

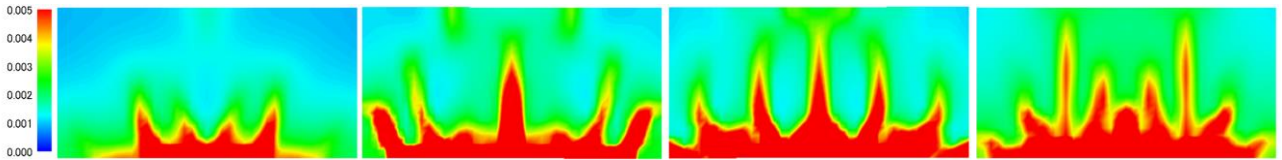
2.2 解析結果 メッシュ全体を $N=1.70$ として与えた地盤底面の土要素に、初期不整として等間隔に $N=1.60$ の軟化しやすい土要素や $N=1.80$ の軟化しにくい土要素を数箇所設けた場合について、十分にせん断が進んだ後のせん断ひずみ分布を図 4 に、同図 A-A'断面における断面図を図 5 に示す。図 4 より、地表面に断層の走向方向から傾いた波状のリーデルせん断帯を生じるとともに、そのせん断ひずみは底面に初期不整を与えた要素の直上で最も卓越することがわかった。また、図 5 より、初期不整の違いに応じて地盤内部におけるフラワー構造の発達の仕方が異なることもわかった。

ここで、図 4(b)の弱点 2 箇所のケースに着目する。断層領域を挟んで走行方向に相対変位 0.41%を与えたときの等せん断ひずみ面の鳥瞰図を図 6 に示す。この図から地盤内に発達したフラワー構造およびリーデルせん断帯が確認できる。



(a) 1 箇所不均質(N=1.60) (b) 2 箇所不均質(N=1.60) (c) 4 箇所不均質(N=1.60) (d) 2 箇所不均質(N=1.80)

図 4 せん断ひずみ分布の鳥瞰図—地表面に出現するリーデルせん断帯



(a) 1箇所不均質(N=1.60) (b) 2箇所不均質(N=1.60) (c) 4箇所不均質(N=1.60) (d) 2箇所不均質(N=1.80)

図5 せん断ひずみ分布の断面図—地盤内に発達するフラワー構造

2.3 断層運動に伴う構造の発達 次に、これらの構造が横ずれの進捗に伴って発達してゆく様子を確認する。図7(a)~(h)は、地盤内における等せん断ひずみ面の進展の様子を、x方向から観察した横断面図である。初期段階の(a)では変形が一樣に進行しているが、変形が進行するにつれて、(b)では不均質の両側で、(c)ではさらにその両側でせん断面が地表に向かって鉛直方向に進展する。これらのせん断面は(d)を経て成長した後、(e)ではこれらのせん断面が互いに合体して一つの大きなすべり面を呈する。これが図7におけるフラワー構造の花弁を構成する。その後、地表面からもひずみが進展して(f)のようなリーデルせん断帯が出現する。これらは(g)を経て成長し、やがて(h)に至る。このように、地表面のリーデルせん断帯は、フラワー構造とは独立して副次的に形成されることがわかった。

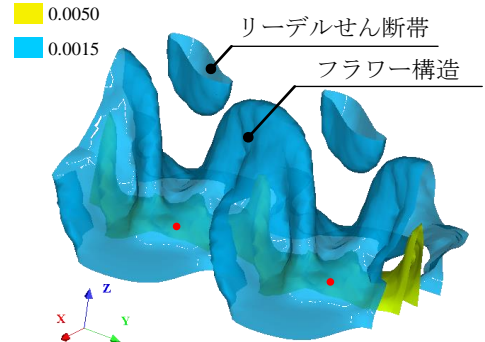


図6 等せん断ひずみ面の鳥瞰図

一方、 $N=1.80$ の要素を強点として2箇所設置した場合にも、変形はこの要素の直上で卓越するが、図5(d)のように、フラワー構造の様相は弱点を入れた場合と異なり、地表面には図4(d)のような雁行状構造が出現する結果となった。

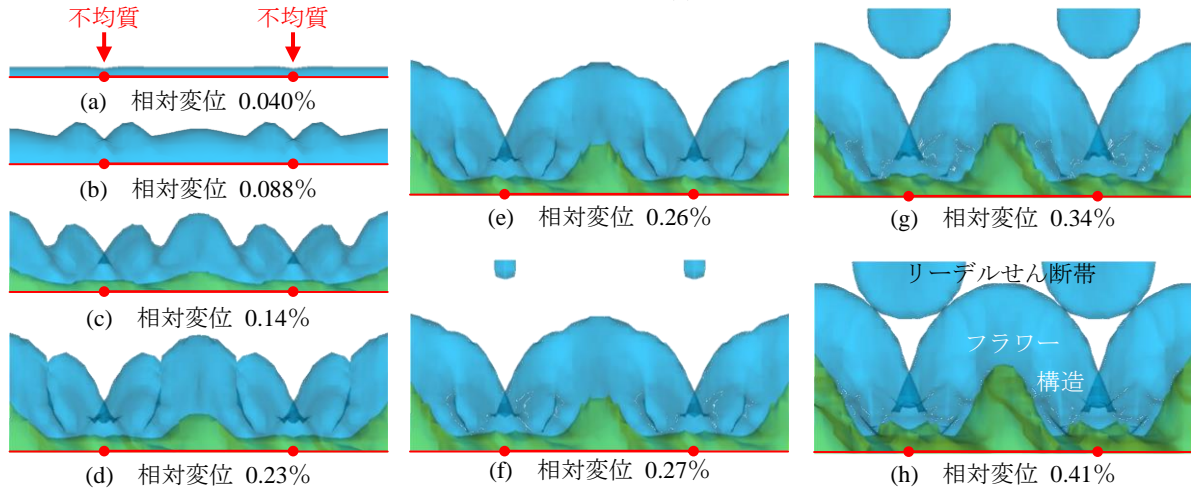


図7 フラワー構造の発達からリーデルせん断帯の形成まで (図中の●はNを変更した底面土要素の位置を示す)

2.4 初期不整と発生するリーデルせん断角度に関する考察 図4(a)~(c)より、不均質を多く設置するほど、せん断帯の幅と影響範囲が狭くなるとともに、リーデルせん断と走向方向のなす角はより鋭角になり、 $45^\circ - \phi/2 = 32.3^\circ$ (限界状態定数 M から算定される内部摩擦角: $\phi = 25.3^\circ$) に近づいてゆく⁶⁾ことがわかる。また、図4(b)と(d)の角度がほぼ一致していることから、この角度は不均質要素の間隔によって決まり、 N の大小によらないと考えられる。

3. おわりに

本稿では、横ずれ断層における上部地盤のせん断帯発生過程に材料的初期不整が与える影響について検討した。地盤内に初期不整をランダムに与えた場合については、紙幅の都合上示すことができなかった。発表当日に示す予定である。今回用いた地盤解析コード **GEOASIA** は、運動方程式の忠実な時間積分により動的問題にも対応可能であり、土骨格と間隙水の相互作用を考慮した2相系解析も可能である。せん断帯の発生に起因して生じる地震波の生成および波動伝搬の様子や、2相系解析を用いて間隙水の存在がリーデルせん断やフラワー構造の発生や進展過程に及ぼす影響および寸法効果なども調べているが、これらは別の機会に譲る。

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(B):課題番号25289143)の助成を受けた。

参考文献)

- 1) Riedel, W., (1929): Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen. Zentral-blatt für Mineralogie, Geologie und Paleontologie B, 354-368.
- 2) 川合,野田,山田,浅岡,澤田 (2014):横ずれ断層に伴うフラワー構造を伴うリーデルせん断..., 土木学会年次学術講演概要集,69, III-371
- 3) Asaoka, A., et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, 42(5), 47-57.
- 4) 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.
- 5) 山田,野田,浅岡 (2009): 過圧密地盤の排水支持力解析, 応用力学論文集, 12, 247-254.
- 6) Tchalenko, J.S., (1970): Similarities between shear-zones of different magnitudes, *Geological Society of America Bulletin* 81, 1625-1640.