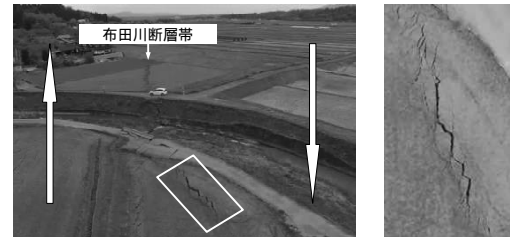


横ずれ断層における jog の存在を考慮した Riedel せん断帯の生成シミュレーション

名古屋大学 学生会員 豊田 智大 JI0-会員 野田 利弘
正会員 山田 正太郎 非会員 山田 翔太

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、図-1 のような走行方向に対して雁行状に連なる Riedel 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付随断層構造の一形態として知られており、表層地盤内部には flower 構造とよばれる花弁状のすべり面が主断層を起点として三次元的に発達することが知られている。



(a) 布田川断層帯 (b) せん断帯

図-1 熊本地震で出現した Riedel せん断帯¹⁾

野田ら²⁾は材料的初期不整の導入により 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 構造は幾何学的初期不整、すなわち図-2 に示すような横ずれ断層が不連続に配置する jog 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、図-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図-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。これに対し、図-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図-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。構造地質学の分野では、前者のような引張による変形場を push-up、後者のような圧縮による変形場を pull-apart と呼ぶ。本稿では、これらの push-up および pull-apart を模擬した不連続な断層変位場（幾何学的初期不整）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。

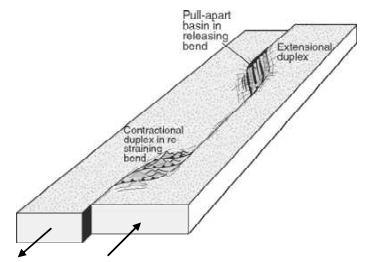


図-2 横ずれ断層の jog⁴⁾

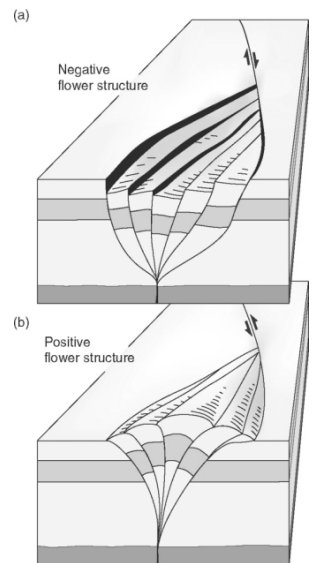


図-3 flower 構造⁴⁾

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 model⁵⁾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 GEOASIA⁶⁾を用いる。図-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、図-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), 7)}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図-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。

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図-7(a)に示す。また、この模型寸法を y 軸方向に 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。

キーワード 横ずれ断層, Riedel せん断帯, flower 構造, jog, 弾塑性有限変形解析, 幾何学的初期不整

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学工学部 9 号館 3 階 TEL: 052-789-3834

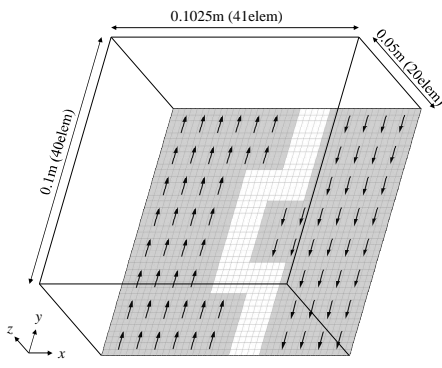


図-4 有限要素メッシュ

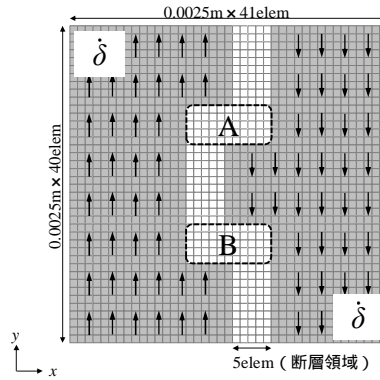


図-5 模型底面の境界条件

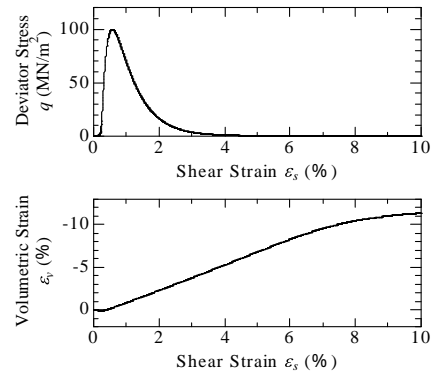
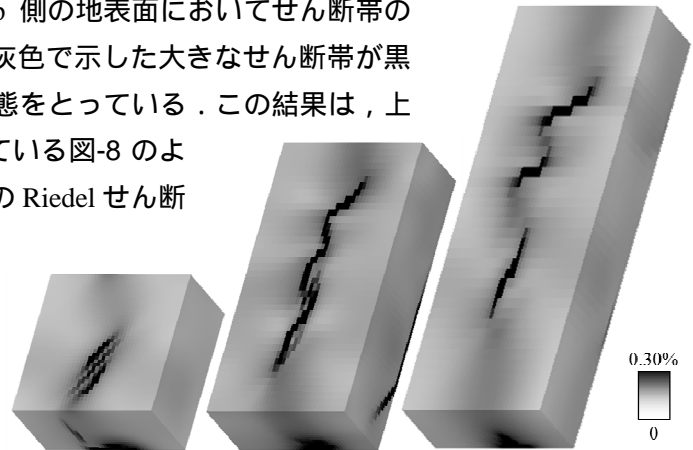


図-6 超過圧密土の排水せん断

まず、等倍模型について、図-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、濃灰色で示した大きなせん断帯が黒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⁸⁾の模擬岩盤を対象とした実験において確認されている図-8 のような 1 次オーダーの Riedel せん断帯と 2 次オーダーの Riedel せん断帯に類似している。次に 2 倍模型について、図-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-shear⁹⁾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⁸⁾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。また、3 倍模型の解析においては、図-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。



(a) 等倍模型 (b) 2 倍模型 (c) 3 倍模型

図-7 せん断ひずみ分布

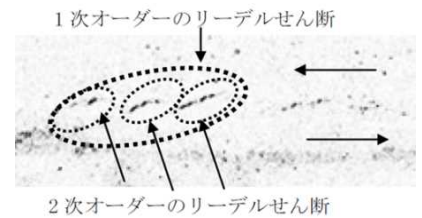


図-8 Fractal なせん断帯⁸⁾

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。

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(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 年 1 月 .
- 2) 野田ら: 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 (応用力学論文集 Vol.18), 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) Haakon fossen: Structural Geology, Cambridge University Press, pp.377-400, 2nd edition, 2016.
- 5) 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.
- 6) Noda, T., et al.: 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.
- 7) 山田ら: 過圧密地盤の排水支持力解析, 応用力学論文集, Vol.12, pp.247.254, 2009 .
- 8) 上田: 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 .
- 9) Naylor, M. A., et al.: Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states, Journal of Structural Geology, Vol.8, No.7, pp.737-752.