横ずれ断層の非一様な幾何形状がリーデルせん断帯の形成過程に及ぼす影響

名古屋大学　（学）○山田 翔太　（ﾌｪﾛｰ）野田 利弘　（学）豊田 智大　（正）山田 正太郎
地震予知総合研究振興会　（ﾌｪﾛｰ）浅岡 顕

1. はじめに

横ずれ断層が変位すると，その直上に堆積した表層地盤内にはフラワー構造と呼ばれる花弁状のすべり面が複合的に形成され，地表面には「ミの字型」で規則的に並ぶ亀裂群であるリーデルせん断帯 [1]が出現することが知られている．著者らはこれまでに，断層変位場を境界条件として与えた表層地盤の弾塑性有限変形解析において「ジョグ（後述）」の存在を考慮することで，特徴的な付随断層構造の生成過程が再現できることを示してきた．本稿では，ジョグの幾何形状を系統的に変更した解析の結果を紹介するとともに，フラワー構造の生成過程についても議論する．

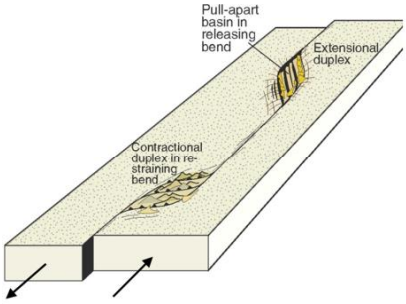


図-1　横ずれ断層のジョグ [2]

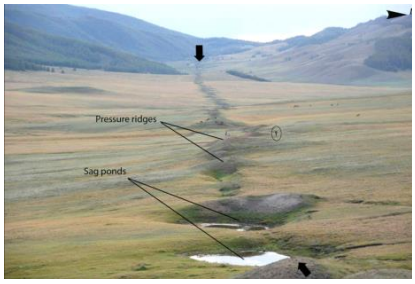


図-2　ブルネイ断層上の地形 [3]

2. ジョグとは

横ずれ断層の断層線が直線であることは極めて稀で，大抵は屈曲やステップといった非一様性を包含している．例えば**図-1** の左横ずれ断層は手前と奥の 2 箇所に断層線の「ずれ」を含んでおり，このような不連続な箇所をジョグと呼ぶ．図の奥側のような陥没を伴う伸張ジョグはプルアパート，図の手前側のような隆起を伴う圧縮ジョグはプッシュアップと呼ばれる．**図-2** はモンゴルのブルネイ断層の変位により生じた典型的な断層地形であり，走行方向にバルジと呼ばれる小高い丘とデプレッションと呼ばれる窪地が交互に規則的に連なる様子が確認できる [3]．

3. 解析条件

数値解析は，土の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model[4]を搭載した動的／静的水～土骨格連成弾塑性有限変形解析コード ***GEOASIA***[5]による．本手法は 2 相系解析にも対応しているが，本稿では 1 相系解析の結果を示す．有限要素メッシュは，**図-3** のような 3 次元直方体メッシュ（要素数：32800）とし，**図-4** のような屈曲した断層領域の両側に右横ずれ変位（変位速度：10^{-6}m/s）を与えることで，領域 A でプルアパート，領域 B でプッシュアップの変形場をそれぞれ表現した．その他，*x-z* 面は周期境界，*y-z* 面は摩擦なし境界とした．材料定数については詳細を割愛するが，排水三軸試験時に**図-5** のような顕著な軟化と塑性膨張を示すように設定した．

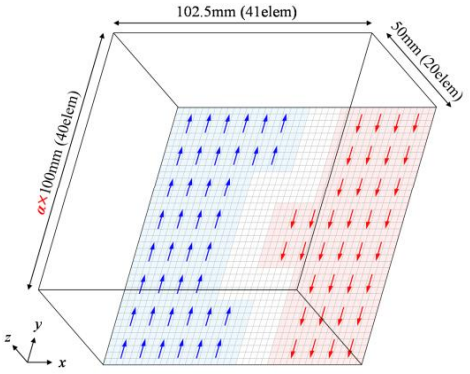


図-3　有限要素メッシュ

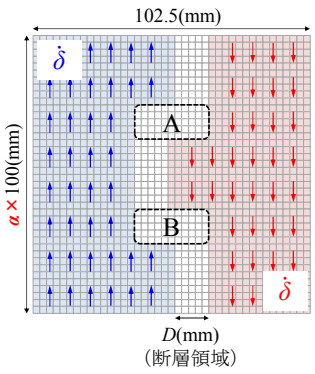


図-4　模型底面の境界条件

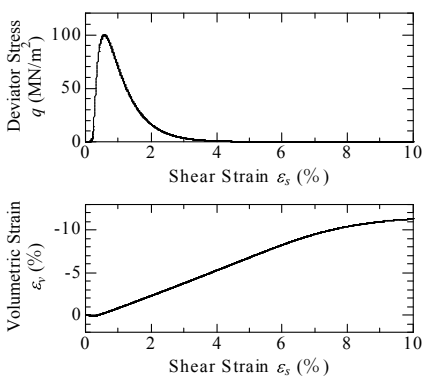


図-5　超過圧密土の排水せん断

キーワード　横ずれ断層，表層地盤，リーデルせん断，弾塑性，非線形性，ジョグ
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

4. 解析結果

4.1. 模型寸法の影響

前節の模型について，走行方向の模型寸法倍率 α と断層領域の幅 D を変えて解析を行った．地表面における解析終了段階でのせん断ひずみ分布を**図-6** に示す．同図より，α=1 では緑色の大域的なせん断帯が赤色の局所的なせん断帯を包含するフラクタルなせん断帯が，α=2，3 では左斜めのせん断帯の間を右斜めにつなぐ P-shear の出現が解かれており，これはジョグ同士の間隔の差に起因する．また，断層幅 D が大きいほど①せん断帯の幅は広がり，②独立したリーデルせん断しか出現しなくなることが分かる．また，α=2，3 でのプッシュアップ側・プルアパート側でのリーデルせん断の角度は，α や D や影響をほとんど受けないことも確認できる．

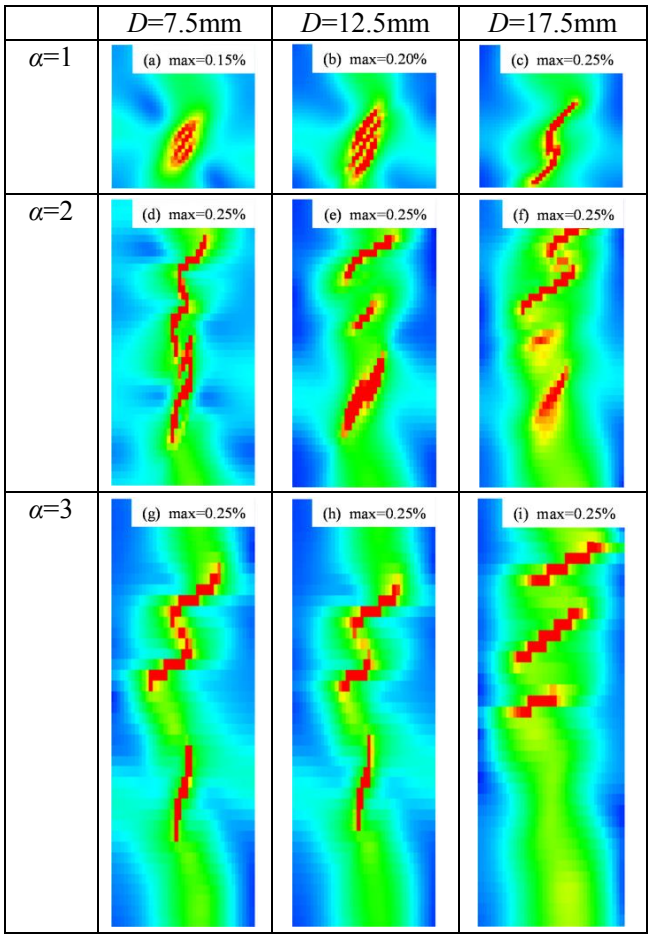
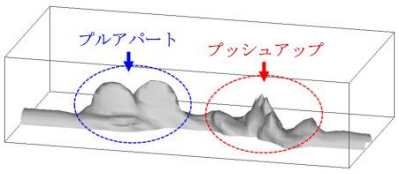


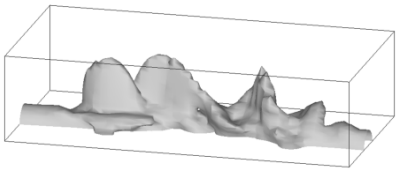
図-6 せん断ひずみ分布（0 max）

4.2. フラワー構造の発達過程について

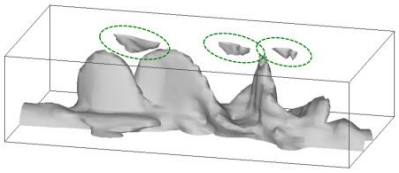
代表的に図-6(d)のケースについて，フラワー構造の発達過程を**図-7** に示す．同図(a)～(b)にかけて，プッシュアップ側では 1 枚のすべり面が鉛直方向に延伸してゆくのに対し，プルアパート側ではジョグを挟んで 2 枚のすべり面が花弁状に発達してゆく．(c)では，(b)で深部から延伸したすべり面が地表面近傍まで到達すると同時に，地表面側からもせん断ひずみが局所的に出現する．この現象は低拘束圧条件下でのスプレー現象に類似している．最終段階(d)では，これらのすべり面が互いに結合し，複合的・三次元的なすべり構造が形成される．



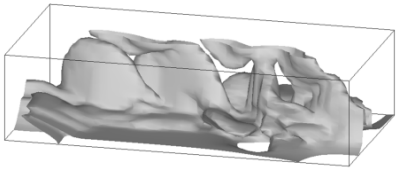
(a) t =177sec



(b) t =218sec



(c) t =233sec



(d) t =319sec

図-7 せん断ひずみの等高面（ε_s=0.25%）

5. おわりに

リーデルせん断の形成過程において，断層領域の幅が広くなるほど，フラクタルなせん断帯や P-shear といった二次的な構造は影を潜め，一次的なリーデルせん断のみが顕在化する傾向があることを確認した．また，すべり面はジョグを起点にして延伸するほか，その発達形態はプッシュアップ側とプルアパート側で異なり，最終的なフラワー構造はそれらの連結を伴って形成されることが分かった．

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) Riedel, W.: Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen. Zentral-blatt fur Mineralogie, Geologie und Paleontologie B, pp.354-368, 1929. 2) Haakon Fossen: Structural Geology, Cambridge University Press, pp.377-400, 2nd edition, 2016. 3) Rizza, M., et al.: Earthquake geology of the Bulnay fault, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.105, No.1, pp.72-93, 2015. 4) 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. 5) 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.