

リーデルせん断の数値シミュレーションとせん断面の発生角度に関する一考察 Numerical simulation of Riedel shear and discussion on the angle of slip surfaces

山田翔太¹, 野田利弘², 豊田智大³, 山田正太郎⁴, 浅岡顕⁵

- 1 名古屋大学大学院・工学研究科・土木工学専攻・yamada.shota@f.mbox.nagoya-u.ac.jp
- 2 名古屋大学・減災連携研究センター
- 3 名古屋大学大学院・工学研究科・社会基盤工学専攻
- 4 名古屋大学大学院・工学研究科・土木工学専攻
- 5 地震予知総合研究振興会

概 要

横ずれ断層が変位すると、その直上に堆積した表層地盤の内部にはフラワー構造と呼ばれる花卉状のすべり面が複合的に形成され、地表面にはリーデルせん断帯と呼ばれる雁行亀裂が出現することが知られている。著者らはこれまでに、ジョグと呼ばれる断層線の不連続性を境界条件として考慮した弾塑性有限変形解析により、フラクタルなせん断帯や P-shear といった特徴的なせん断帯の生成過程が再現できることを示してきた。本稿では、フラワー構造の発達過程およびリーデルせん断帯の発生角度について議論するとともに、せん断帯の発生過程に及ぼす寸法効果についても検討する。

キーワード：横ずれ断層，リーデルせん断，フラワー構造，弾塑性，ジョグ

1. はじめに

1905 年ブルネイ地震では、左横ずれ断層であるブルネイ断層の地表面において、明瞭な地表面の変状が出現した¹⁾。この断層地形は、地震発生から 100 年以上経っているにもかかわらず、モンゴル特有の乾燥気候や地下に存在する永久凍土の影響によって現在も風化せず残存している。

断層線上の地表面で確認された変状を図 1 に示す。同図より、同じスケールのバルジ（隆起）とデプレッション（陥没凹地）が等間隔で発生する様子が観察できる。このような地形は、横ずれ断層が不連続に配置する「ジョグ」と呼ばれる箇所の存在に起因して発達したとされている。すなわち、図 3 奥側のように、ジョグ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 4(a)のような負のフラワー構造が形成されて局所的な沈下（デプレッション）を生じる。これに対し、図 3 手前側のようにジョグ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 4(b)のような正のフラワー構造が形成されて局所的な隆起（バルジ）を生じる。構造地質学分野では、前者のような引張による変形場をプルアパート、後者のような圧縮による変形場をプッシュアップと呼ぶ。ジョグの存在は、地表地震断層の形成過程に重大な影響を及ぼすため、断層変位評価の観点で非常に重要である。それだけでなく、断層変位が長期に亘

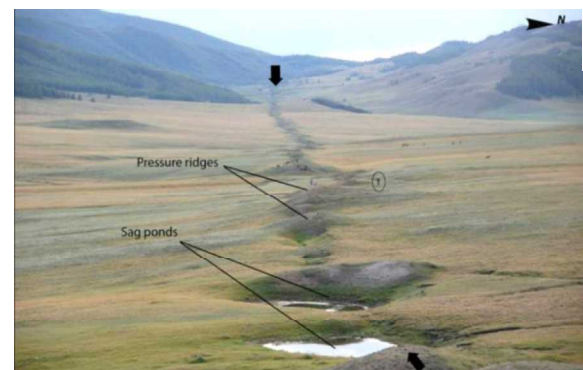
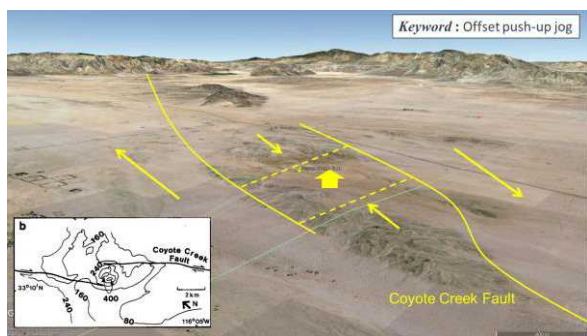


図 1 ブルネイ地震で出現したバルジとデプレッション²⁾

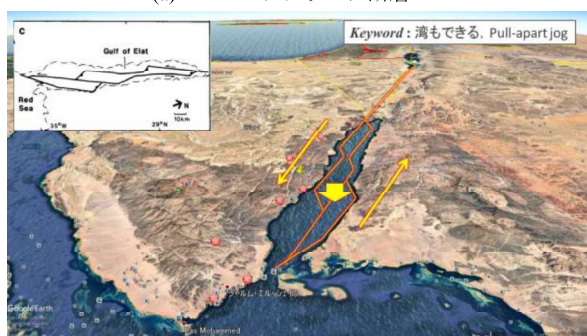
り累積することで形成される種々の断層変位地形の理解にもつながる。

図 2 は、前述したジョグを含む大規模な断層変位地形の例であり、同図(a)のコヨーテクリーク断層では、プッシュアップの変形場の下で緩やかな丘が形成されており、同図(b)のアカバ湾内の横ずれ断層系では、プルアパートの変形場の下で湾が形成されている。

これまでに著者らは、これらのプルアパートおよびプッシュアップを模擬した不連続な断層変位場（幾何不整）を境界条件として考慮した大規模 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ジョグの存在に起因した付随断層構造の形成過程を数値解析的に再現できることを示してきた⁷⁾。本稿では特



(a) コヨーテクリーク断層^{3), 4)}



(b) アカバ湾内の横ずれ断層系^{3), 5)}

図2 ジョグに起因して生じる断層変位地形の例

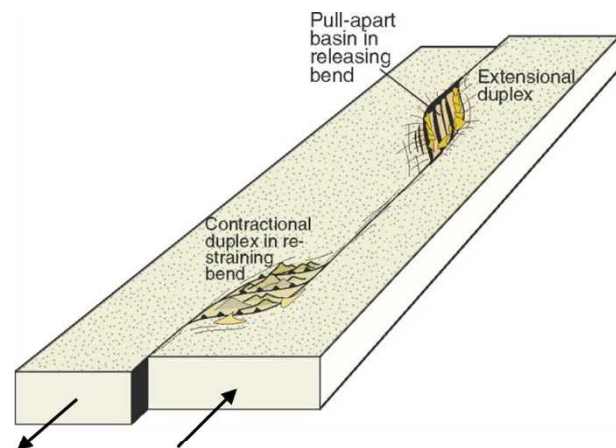


図3 横ずれ断層のジョグ⁶⁾

に、解析により解かれるフラワー構造の出現形態および角度について議論するとともに、付随断層構造の形成過程に及ぼす寸法効果について検討した結果を示す。

本稿の構成を以下に示す。2章では、著者らのこれまでの研究成果⁷⁾を紹介する。3章では表層地盤内のフラワー構造と地表面に出現するリーデルセン断帯の角度について、4章では寸法効果について議論する。最後に、5章では、本稿のまとめを示す。

2. これまでの研究成果⁷⁾

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 model⁸⁾を搭載した静的／動的水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**⁹⁾を用いる。なお、

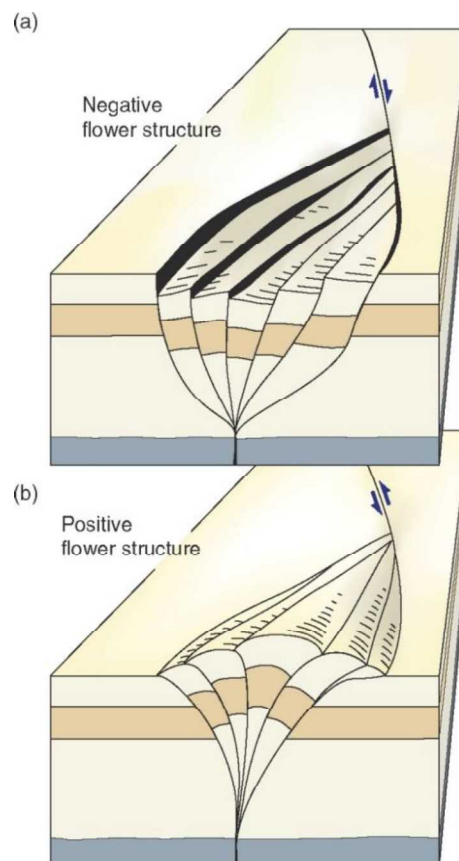


図4 フラワー構造⁶⁾

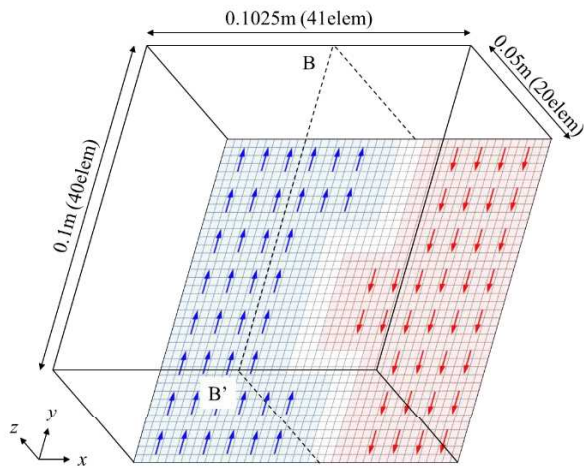
本解析で用いる手法は二相系連成解析にも対応しているが、本稿では一相系条件での解析について述べる。

2.1 有限要素メッシュと境界条件

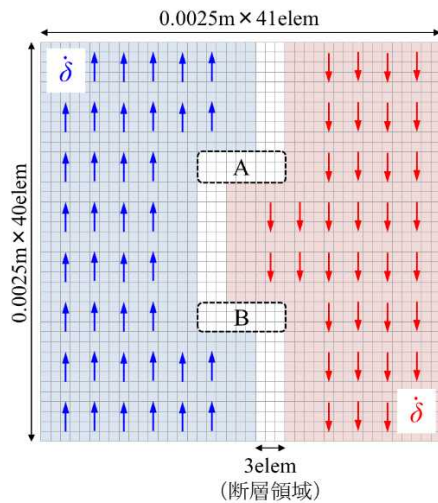
図 5(a) のように、 y 軸方向を横ずれ断層の走向方向にとる 3 次元直方体メッシュ（要素数：32800）を用いた。模型底面においては、鉛直変位を拘束した上で、図 5(b) に示すような屈曲した断層領域を設定し、その両側の節点に y 方向の強制変位（変位速度： $\dot{\delta}=10^{-6}\text{m/s}$ ）を与えることで、領域 A では引き離されてプルアパートの応力場が、領域 B では圧縮されてプッシュアップの応力場がそれぞれ表現されることとなる。側面については、 x - z 面では周期境界を設定し、 y - z 面では摩擦なし条件を与えた。

2.2 材料定数と初期条件

SYS Cam-clay model の材料定数は、既往の解析事例^{7), 10)}を参照し、表 1 の通り設定する。初期状態は、土の骨格構造のうち過圧密のみを考慮し、一様に間隙比 ($e_0=0.57$) を与えた。この時の初期状態分布を図 6 に示す。また、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 7 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る超過圧密土である。ピーク強度発現後の著しい軟化を示す材料パラメータを設定することで、岩盤材料の脆性的な応答を模擬した。



(a) 有限要素メッシュ



(b) 模型底面の境界条件

図5 解析模型

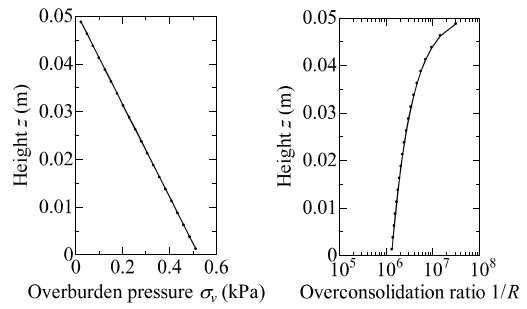
表1 材料定数

＜弾塑性パラメータ＞	
圧縮指数 λ	0.0150
膨潤指数 k	0.0002
限界状態定数M	1.0
NCLの切片*N	1.7
ポアソン比 ν	0.30
＜発展測パラメータ＞	
正規圧密土化係数 m	2.0
＜物性値＞	
土粒子の密度 ρ^s	2.65g/cm ³

* せん断応力 $q=0$ 有効応力 $p'_0 = 98.1\text{kPa}$ における練返し粘土のNCL上の比体積

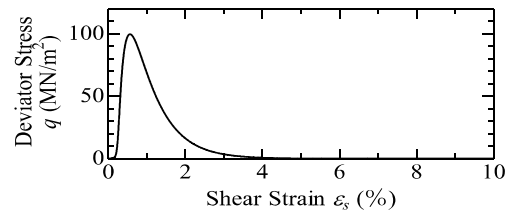
2.3 解析結果

図-5に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-8(a)に示す。また、この模型寸法を要素数は変えずに y 軸方向に2倍、3倍に拡大することによりプッシュアップとプルアパートの間隔を変えた模型の解析結果を同図(b), (c)にそれぞれ示す。

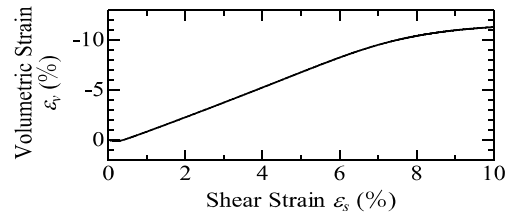


(a) 鉛直土被り圧分布 (b) 過圧密比分布

図6 初期状態



(a) せん断応力-せん断ひずみ関係



(b) 体積ひずみ-せん断ひずみ関係

図7 三軸排水せん断時の応答

等倍模型について、図-8(a)のようにプッシュアップ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、緑色で示された大域的なせん断帯が赤色で示された局所的な雁行状のひずみを内包する「フラクタル」な形態をとっている(走行方向に「周期境界」を入れた計算であるため、緑色の大域的なせん断帯は模型の手前側と奥側に周期的に連なる)。

2倍模型について、図-8(b)の地表面の変状を見ると、不連続に連なるリーデルせん断を互いに接続するように伸びるせん断帯が、図-9のようにリーデルせん断とは逆向きに、かつ二次的に形成されていることがわかる。Naylor et al.は模型実験において同様の現象を確認しており、これを「P-shear」と呼んでいる¹¹⁾。上田もまた模型実験により同様の現象を確認しているが、P-shearは乾燥砂地盤には出現せず、模擬岩盤においてのみ形成されることを確認している¹²⁾。したがって、このようにP-shearが数値解析的に再現されたのは、構成式で材料の脆性的な挙動を精緻に考慮したためであると考えられる。

3倍模型について、図-8(c)をみると、プルアパート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動的に形成され、プッシュアップ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動的に形成されることが確認された。

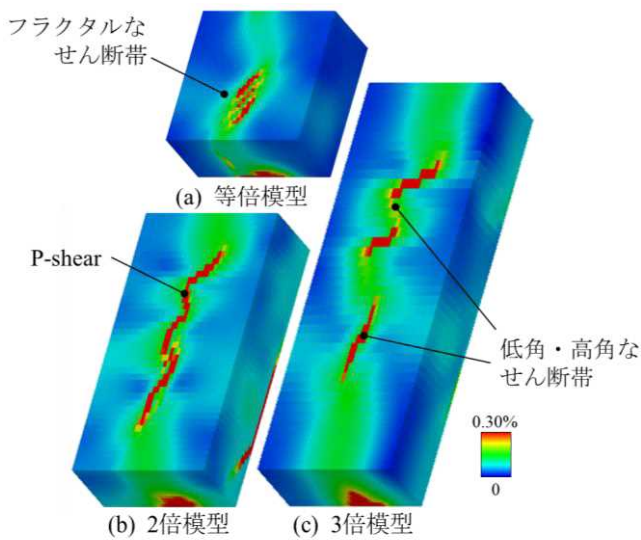


図8 せん断ひずみ分布⁷⁾

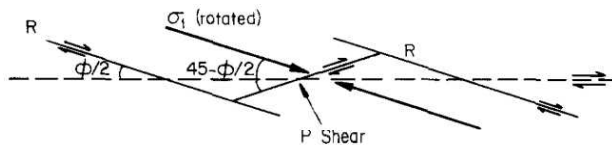


図9 P-shear¹¹⁾

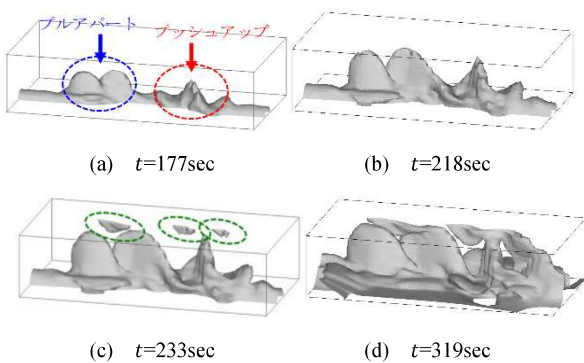


図10 せん断ひずみの等高面 ($\epsilon_s=0.25\%$)

以上のように、ジョグの存在を考慮した数値解析により、フラクタルなせん断帯、P-shear、低角・高角なせん断帯といった、特徴的な付随断層の出現形態が解かれることを明らかにした。なお、これらの変状は Noda et al. の「材料不整」を入れた解析¹³⁾においては確認されておらず、ジョグの存在を考慮しなければ出現し得ない変状であると考えられる。

3. フラワー構造とせん断帯の角度に関する議論

3.1 フラワー構造に関する議論

代表的に図-8(b)の2倍模型のケースについて、フラワー構造の発達過程を図-10に示す。同図のフェーズ(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枚のすべり面が花卉状に発達してゆ

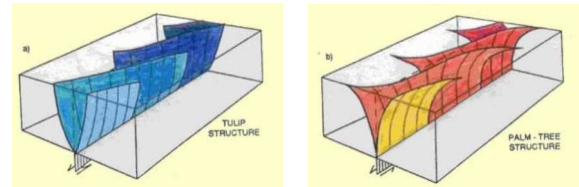


図11 チューリップ構造とパームツリー構造¹⁴⁾

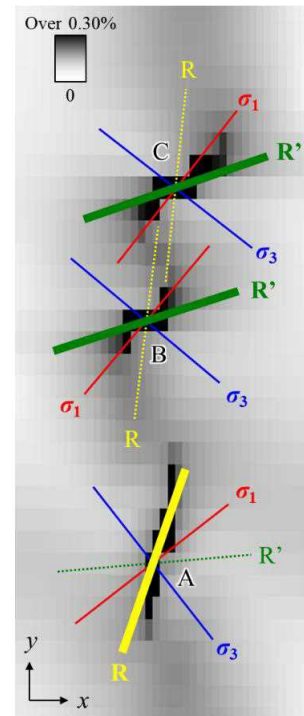


図12 3倍模型の地表面における主応力方向

表2 内部摩擦角より予測される R-shear, R'-shear の角度

	主応力方向		せん断の方向	
	σ_1	σ_3	R-shear	R'-shear
A	52.4	-37.6	19.7	85.1
B	40.2	-49.8	7.4	72.9
C	38.8	-51.2	6.1	71.6

※ 走向方向に対する時計回りの角度(deg)を表す

く。その後フェーズ(c)では、フェーズ(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 splay 現象に類似している。最終フェーズ(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。

一般にフラワー構造は、プルアパート側（トランステンション場）では、図-11(a)のように起点から水平に広がるチューリップ構造になり、プッシュアップ側（トランスペッション場）では、図-11(b)のように起点から鉛直に伸びるパームツリー構造になると言われているが¹¹⁾、図-10のフェーズ(a)~(b)からも分かるように、解析結果はこのような断層近傍での変形初期におけるすべり面の進展の仕方の特徴の違いをよく捉えている。

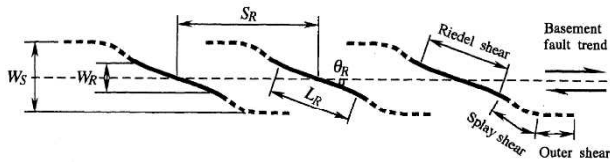
図13 Splay shear および Outer shear の形成¹⁵⁾

表3 模型高さと载荷速度

	模型高さ H	载荷速度 δ
等倍 (基準)	5cm	10^{-6} m/s
10 倍	50cm	10^{-5} m/s
100 倍	5m	10^{-4} m/s
1000 倍	50m	10^{-3} m/s

3.2 リーデルせん断帯の角度に関する議論

3 倍模型について、せん断帯の角度に関してより詳細な検討を加えたい。図-12 は図-8(c)の上面図を白黒表示したもので、地表面のせん断帯上の地点 A~C において解析により得られた主応力方向を併記してある（ただし、圧縮を正として、 σ_1 は最大主応力、 σ_3 は最小主応力を表しており、地表面は平面応力状態にあるため中間主応力 σ_2 は鉛直方向に作用する）。リーデルせん断には傾斜の異なる 2 種類のパターンがあり、1 つは R-shear、もう 1 つは R'-shear と呼ばれるが、谷らによれば、(A) R-shear が走向となす角は θ_R は、 σ_1 軸が走向となす斜交角度 ψ と有効内部摩擦角 ϕ' を用いて

$$\theta_R = \psi - \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (1)$$

と表され¹⁵⁾、(B) R'-shear は R-shear と共役な関係にある¹⁶⁾。そこで、図-12 中の各地点での主応力に対して(A)(B)より推定される R-shear と R'-shear の向きをそれぞれ算定すると、それぞれ表-2 のようになる。これを図-12 に併記すると、R-shear は黄線、R'-shear は緑線となる。ここで、有効内部摩擦角 ϕ' は 1 相系解析であることを考慮して限界状態定数 M より次式で算定した。

$$\sin \phi' = \frac{3M}{6+M} = \frac{3}{7} \Rightarrow \phi' = 25.4^\circ \quad (2)$$

推定した R-shear と R'-shear の位置を解析結果と比較すると、プッシュアップ側における高角なせん断帯の角度は R-shear に概ね一致し、プルアパート側における低角なせん断帯の角度は R'-shear に概ね一致していることがわかる。この結果は、ジョグの応力場、すなわちプッシュアップとプルアパートの違いが、互いに共役なせん断面の片方を選択的に誘発する因子となっている可能性を示唆するものである。また、同図からは、地表面において破断線が直線ではなく、S 字曲線となっていることが確認でき、これはリーデルせん断が生じた後に二次的に発生する、図-13 のような splay shear および outer shear の形成が解かれていることを意味している。

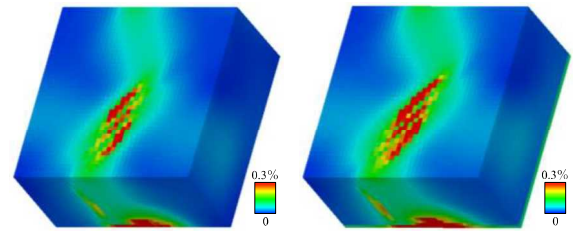
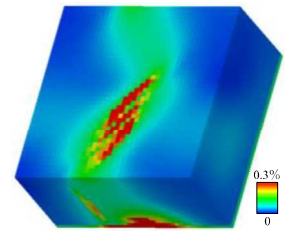
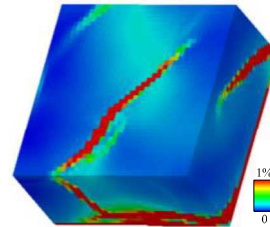
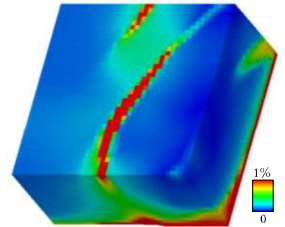
(a) 基準寸法 ($e_0=0.570$)(b) 10 倍 ($e_0=0.570$)(c) 100 倍 ($e_0=0.570$)(d) 1000 倍 ($e_0=0.570$)

図14 せん断ひずみ分布 (比体積一定)

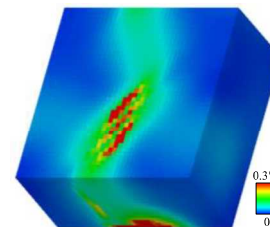
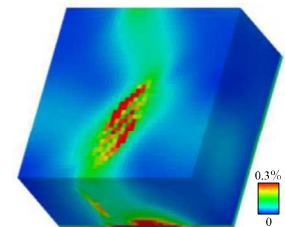
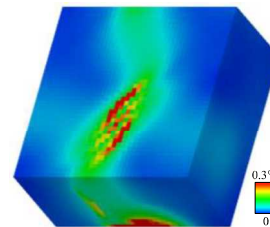
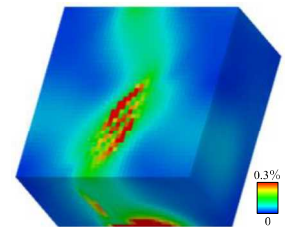
(a) 基準寸法 ($e_0=0.570$)(b) 10 倍 ($e_0=0.535$)(c) 100 倍 ($e_0=0.501$)(d) 1000 倍 ($e_0=0.466$)

図15 せん断ひずみ分布 (底面過圧密比一定)

4. 寸法効果に関する検討

図8の等倍模型の解析終了段階におけるせん断ひずみ分布を図-14(a)に再掲するとともに、この模型を基準として模型全体の寸法と変位速度を 10 倍、100 倍、1000 倍と相似的に拡大した表-3 の模型について、解析結果を図-14(b)~(d)に示す。同図より、寸法の大きい模型では、地表面に単一のリーデルせん断しか生じないことがわかる。これは、寸法の大きい模型では土被り圧の増加により材料が正規圧密状態に近づくため、材料の挙動は延性的に、軟化の程度は小さくなり、地表近傍での分岐を伴うスプレー現象が生じにくくなったことに起因すると考えられる。事実、底面の過圧密比が基準模型と等しくなるように模型の間隙比を調整した図-15 の解析では、いずれのスケールにおいても基準模型の場合と同様の

せん断帯が出現する。この結果は、リーデルせん断が「さまざまなスケールで生じる」という意味でのフラクタル性を裏付けるものである。なお、図-14 の計算を、ジョグを設けずに直線の断層領域を設定して解析すると、寸法 10 倍以上のモデルでは、材料不整の有無にかかわらず変形の局所化は起こらず、せん断面も出現しない¹³⁾。このことから、寸法の大きいモデルでせん断帯の出現を解くには、ジョグの存在を考慮して解くことが重要であったといえる。

5. まとめ

横ずれ断層上に堆積した表層地盤内における付随断層構造の形成過程を、「ジョグ」の存在を境界条件として考慮した大規模3次元弾塑性有限変形解析によって解き、以下の結論を得た。

- ・ フラワー構造の発達形態は、プッシュアップジョグでは鉛直に伸びるバームツリー型、プルアパートジョグでは水平に広がるチューリップ型になることを確認した。
- ・ プッシュアップジョグ／プルアパートジョグでは、それぞれ低角／高角なせん断帯の形成が解かれ、その角度がモール・クーロン規準より演繹される R -shear/ R' -shear の推定角に一致することが確認された。このことから、ジョグの応力場、すなわちプッシュアップとプルアパートの違いが、互いに共役なせん断面の片方を選択的に誘発する因子となっていることが推察される。
- ・ 変形の進行に伴うせん断方向の変化 (outer-shear) の出現が解かれた。これは、トランスプレッション場／トランステンション場における主応力方向の回転に起因すると考えられる。
- ・ 寸法効果について検討し、模型底面の過圧密比を統一すれば、本稿で試したあらゆるスケールにおいて同様のせん断帯の形成が相似的に解かれることを確認した。この結果は、リーデルせん断が「あらゆるスケールにおいて生じる」という意味でのフラクタル性を裏付けるものである。

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(A)：課題番号 17H01289）の助成を受けた。

参考文献

- 1) 大矢暁：モンゴルに地震断層を追う，地震ニュース617号，pp.24-40，2006年1月号。
- 2) Rizza, M., Ritz, J.-F., Prentice, C., Vassallo, R., Braucher, R., Larroque, C., Arzhannikova, A., Arzhannikov, S., Mahan, S., Massault, M., Michelot, J.-L., Todbileg, M. and ASTER Team: Earthquake geology of the Bulnay fault (Mongolia), Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.105, No.1, pp.72-93, 2015.
- 3) Woodcock, N. H. and Fischer, M.: Strike-slip duplexes, Journal of Structural Geology, 8, pp.725-735, 1986.
- 4) Google earth V.7.3.1.4507. (February 6, 2018). Ocotillo Wells, America California. 33° 7'12.68"N, 116° 5'36.00"W, Eye alt 1.16km. Google 2018. <http://www.earth.google.com> 2018.5.13.
- 5) Google earth V.7.3.1.4507. (February 6, 2018). Qesm Sharm Ash Sheikh, Egypt St. Catherine. 28°43'3.98"N, 34°30'2.45"E, Eye alt 113.02km. Google 2018. <http://www.earth.google.com> 2018.5.13.
- 6) Fossen, H.: Structural Geology, Cambridge University Press, pp.377-400, 2nd edition, 2016.
- 7) 豊田智大, 野田利弘, 山田正太郎, 山田翔太：横ずれ断層における幾何学的不整が表層地盤のせん断帯の形成に及ぼす影響，第29回中部地盤工学シンポジウム，pp.1-4，2017.
- 8) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils Found, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 9) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: 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.
- 10) 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕：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.
- 11) Naylor, M. A., Mandl, G. and Sijpesteijn, C. H. K.: Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states, Journal of Structural Geology, Vol.8, No.7, pp.737-752.
- 12) 上田圭一：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，N08039，2009.
- 13) 野田利弘, 山田正太郎, 豊田智大, 浅岡顕：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.
- 14) University of Sydney, School of Geosciences, Wrench Tectonics IV Structural geology of transpression, <http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/Teaching/Geol-3101/Wrench/TV.html>, 2018.6.30.
- 15) 谷和夫, 上田圭一, 阿部信太郎, 仲田洋文, 林泰幸：野島地震断層で観察された未固結な表層地盤の変形構造，土木学会論文集，Vol.568, pp.21-39, 1997.
- 16) 小山良浩, 谷和夫：横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の表面に発達するせん断帯の構造分析，土木学会論文集，Vol.750, pp.171-181, 2003.