

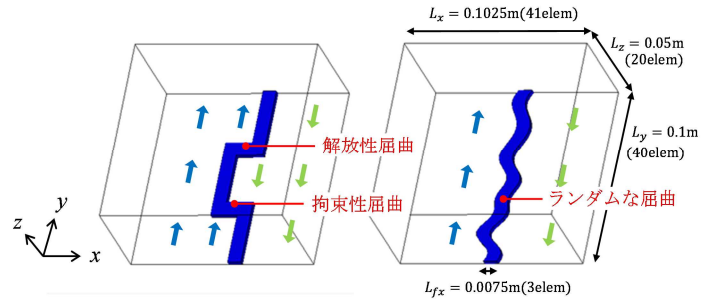
# ランダムな屈曲を有する横ずれ断層の変位に伴う表層地盤の3次元弾塑性変形解析

横ずれ断層 表層地盤の変形 断層線形状

名古屋大学 特別会員 ○岩井周平  
国際会員 野田利弘, 豊田智大

## 1. はじめに

地下深部で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立体的・複合的なすべり面（flower 構造）が発達し、地表面では雁行状のせん断ひずみの局所化（Riedel せん断）が生じる。著者らはこの生成メカニズムを解明するため、図 1(a)のような規則的な屈曲を有する断層線上に堆積した表層地盤の変形を 3 次元弾塑性変形解析により解き、屈曲部を起点として生じる flower 構造および地表面での Riedel せん断の出現形態が屈曲部での幾何的な変形場（解放性屈曲/拘束性屈曲）により異なることを示してきた<sup>1)</sup>。本稿では、実際の断層線が不規則な凹凸を有することを踏まえ、模型底面に同図(b)のような非一様な断層線を与えて解析を行った。ランダムな断層線形状を複数ケース用意して解析を実施したが、いずれのケースにおいても flower 構造の発達起点が「断層線の傾斜が最大となる拘束性屈曲」となることが分かり、断層線のトポグラフィに基づく断層変位時の変形卓越箇所の推定可能性が示唆された。



(a) 先行研究<sup>1)</sup> (b) 本研究

図1 右横ずれ断層のモデル化

## 2. 不規則な断層線をもつ模型

模型は y 方向を横ずれ断層（主断層）の走行方向にとる 3 次元直方体メッシュ（要素数：32800）である。断層線である不規則な曲線を、Fourier 正弦級数として次式で与える。

$$f(y) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k \sin\left(\frac{k\pi}{L_y} y\right) \quad (1)$$

ただし、 $f(y)$ は y 方向（奥行き方向）の断層線形状、 $L_y$ は模型の奥行きである。断層線のランダム性は、式(1)の Fourier 係数 $a_k$ を $-0.02 \sim +0.02m$ の一様乱数として与えることで付加する。この操作により生成可能な無数の不規則な断層線のうち、本稿では、 $n = 10$ として生成した図 2 に示す 4 ケースについて解析を行った。

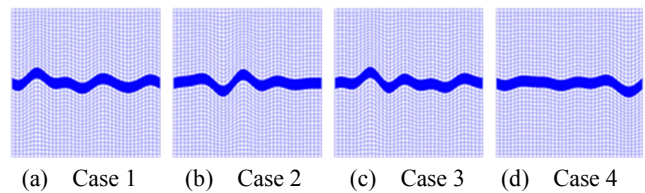


図2 解析に用いる 4 種の不規則な断層線

## 3. 解析条件

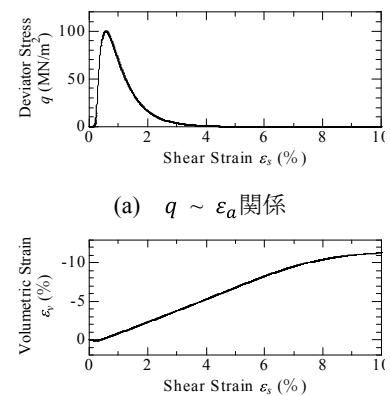
解析には、土の骨格構造に基づく土の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model<sup>2)</sup>を搭載した動的/静的～土骨格有限変形解析コード GEOASIA<sup>3)</sup>を用いる。なお、本稿の結果は一相系解析によるものである。

**3.1. 境界条件** 模型底面は z 方向（鉛直方向）を非拘束とし、各節点には中央の断層線を境に逆向きの強制変位（変位速度 $\dot{\delta} = 10^{-6}m/s$ ）を与えている。また、x-z 面は周期境界、y-z 面は摩擦なし境界としている。

**3.2. 材料定数, 初期条件** 材料定数の設定は既往の解析事例<sup>1)</sup>に準拠する。初期状態は簡単のため過圧密のみを考慮し（構造なし、等方応力状態）、一様な間隙比（ $e_0 = 0.570$ ）を与える。このとき材料は超過圧密状態となり、構成式応答として図 3 のようなピーク強度発現後の顕著な軟化挙動と塑性膨張を示す。

## 4. 解析結果

地表面でのせん断ひずみ分布および地盤内でのせん断ひずみの等数値面（すべり面）の経時変化をそれぞれ図 4 および図 5 に示す。図 5(a)に示すように、最初には模型底面の狭い範囲においてせん断ひずみが局所的に発達する。その後、(b)-(c)では底面の他の箇所でもせん断ひずみが進展し、等数値面は z 方向上向きに発達しつつ x, y 方向への広がりも見せる。最終的には、同図(d)のように、底面で最初にひずみの局所的増大が見られた箇所のほぼ直上の地表面に最も早く変形が到達する。紙幅の都合上割愛するが、この傾向は Case2-4 においても同様である。



(a)  $q \sim \varepsilon_a$  関係  
(b)  $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$  関係  
図3 排水三軸せん断時の応答

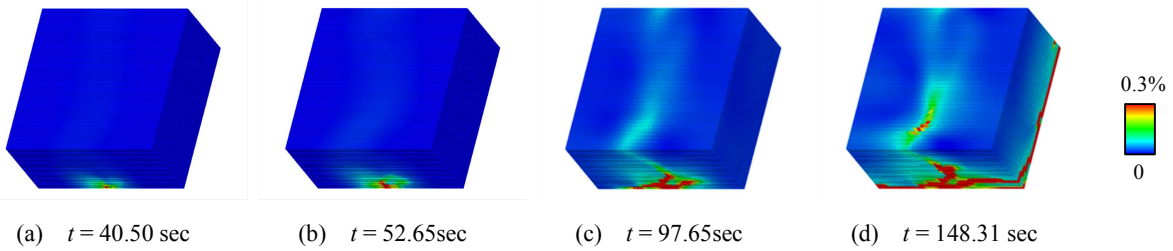


図4 Case1における模型表面のせん断ひずみ分布

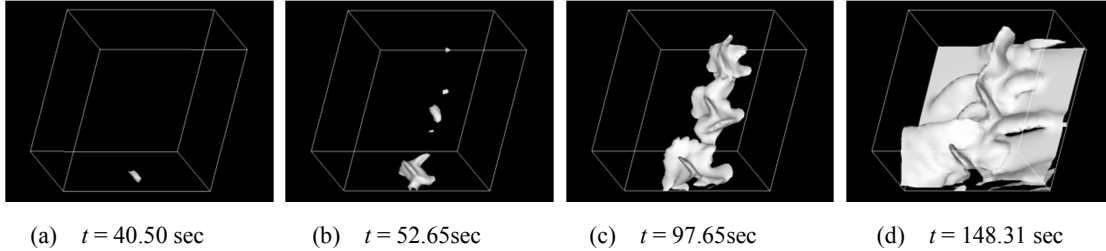


図5 Case1におけるせん断ひずみの等数値面 ( $\epsilon_s = 0.3\%$ )

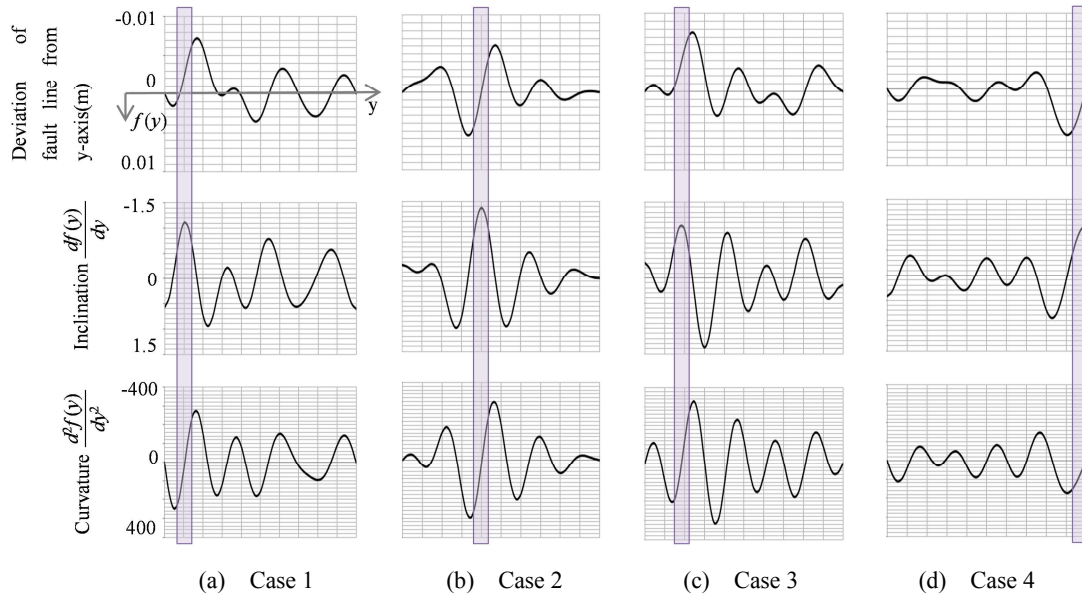


図6 Case別の断層線の形状 $f(y)$  (上段), 断層線の傾き $df/dy$  (中段), 曲率 $d^2f/dy^2$  (下段)

次に、図6に各Caseの断層線の形状とその傾き、曲率のグラフである。特に、傾きが正の領域は断層の右横ずれ変位の累積により伸張を受けるのに対し（解放性屈曲）、負の領域は圧縮を受ける（拘束性屈曲）。ここで、同図に併記された紫色の帯は、図4(a)のような模型底面において最初にせん断ひずみの局所的増大が生じた位置を表しているが、全てのCaseで傾きが負で最大となる場所（拘束性屈曲）と一致することがわかる。拘束性屈曲において変形の局所化が先行することは、先行研究<sup>1)</sup>においても確認されている。

## 5. まとめ

ランダムな形状を有する右横ずれ断層上に堆積した表層地盤の変形を解き、今回試した数値解析ケースにおいては、ひずみの局所的増大が「断層線の傾きが最大の拘束性屈曲」において優先的に発生し、そのほぼ直上の地表面において最も早くせん断ひずみが卓越することを示した。この事実は、地下の主断層線の形状が特定された際に、その変位により生じる副次断層の変位がどこで卓越するかを予測する際の手がかりになり得るのではないかと考えている。今後は、主断層の $y$ 方向の純横ずれ変位に正断層/逆断層的な $x, z$ 方向の相対変位が競合する場合についても検討してゆく。

**謝辞** 本研究の数値解析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システム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) 豊田, 野田, 山田, 山田, 浅岡 (2018): Riedel せん断帯の形成過程における..., 第53回地盤工学研究発表会, 1799-1800.
- 2) Asaoka, A., et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, **42**(5), 47-57.
- 3) 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.