

弾塑性計算地盤力学に基づく imbrication の形成に関する数値シミュレーション

衝上断層 imbrication piggyback

名古屋大学 特別会員 ○大西 和也

国際会員 野田 利弘, 豊田 智大

地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡 顕

1. はじめに

地盤に対し水平圧縮が作用すると、図 1 のような衝上断層群 (imbrication) が形成される。本報では、弾塑性地盤力学に基づく圧縮変形場での imbrication の形成解析の事例を紹介するとともに、imbrication を再現するためには模型底面に一様圧縮を伴う変位速度分布を与える必要があることを示す。また、imbrication の形成過程と発生間隔・順序・角度に及ぼす材料特性および境界条件の影響についても述べる。

2. 圧縮変形場で生じる断層変位地形について

構造地質学の分野では、変動地形の体系的な分類・整理が進められてきた²⁾。特に変位不連続を伴う断層変位地形は、単一のすべりに限定しても、傾斜角によって 45°以上の「逆断層」、45°未満の「衝上断層」に大別され、特に傾斜が水平の衝上断層を「デコルマ (decollement)」と呼ぶ。これらの断層が複数生じると、地盤は複数のブロックに分割され相対的な運動を開始し、共役な 2 本の断層面で切断されたくさび形の地盤ブロックが水平圧縮によって隆起する「pop-up」(図 2) や、平行な複数の衝上断層によりスライスされてできる「imbrication」が発生する。

Imbrication の発生順序に関しては Thrust sequence として Butler³⁾により整理されており、図 3(a)のように新しい衝上断層が古い衝上断層の下盤側に生じる「piggyback 型」と、逆に図 3(b)のように上盤側に生じる「overstep 型」が存在する。一般に大規模な造山帯は piggyback 型によって形成されるといわれている。

3. 解析条件

解析には、土の骨格構造概念に基づく土の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model⁵⁾を搭載した動的/静的水～土骨格連成有限変形解析コード GEOASIA⁶⁾を用いた。本稿では、一相系解析の結果について紹介する。

3.1 初期条件 材料定数は既往の横ずれ断層変位地形の形成解析事例⁷⁾に倣い設定する。初期状態は構造なし、等方応力状態とし、過圧密のみを考慮した。また、本解析においては自重を考慮するため、初期過圧密比分布を模型全体で一様に与えるとき、初期比体積は拘束圧に応じて非一様に分布することとなる。このとき、構成式は、模型中央深さの拘束圧に対して図 4 のような応答を示す。すなわち材料は、顕著な軟化と塑性膨張を示す超過圧密土としてふるまう。

3.2 境界条件 図 5 のように、二次元長方形メッシュ (二次元平面ひずみ条件、要素数: 幅 100 要素, 高さ 10 要素, 計 1000 要素) を用いる。ここでは、表 1 に示す 3 種類の境界条件を用意して解析を行った。とくに、(b)と(c)の模型底面においては、1 要素が一様圧縮されるような変位速度を各節点にあて、模型右端は底面に追従するように変位させた。

表 1 境界条件の設定

Case	左端側面	底面	右端側面
(a)	摩擦なし	摩擦なし	摩擦あり
(b)	摩擦なし	一様圧縮場	摩擦あり
(c)	摩擦なし	一様圧縮場	摩擦なし



図 1 地層中の Imbrication¹⁾

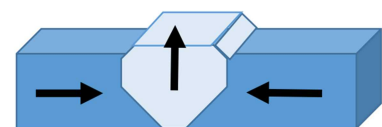
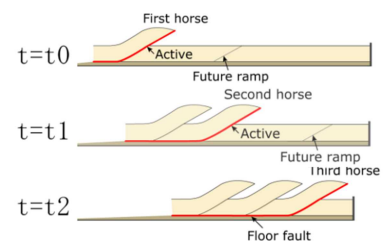
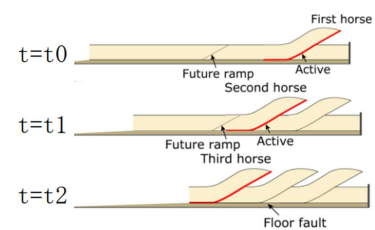


図 2 Pop-up

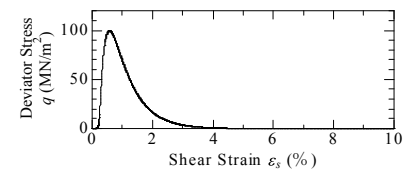


(a) Piggyback

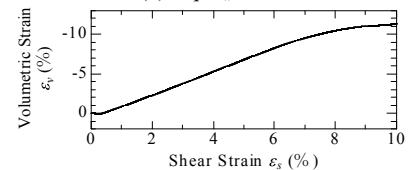


(b) Overstep

図 3 Imbrication の発生順序⁴⁾



(a) $q-\epsilon_s$ 関係



(b) $\epsilon_v-\epsilon_s$ 関係

図 4 排水三軸せん断時の応答⁷⁾

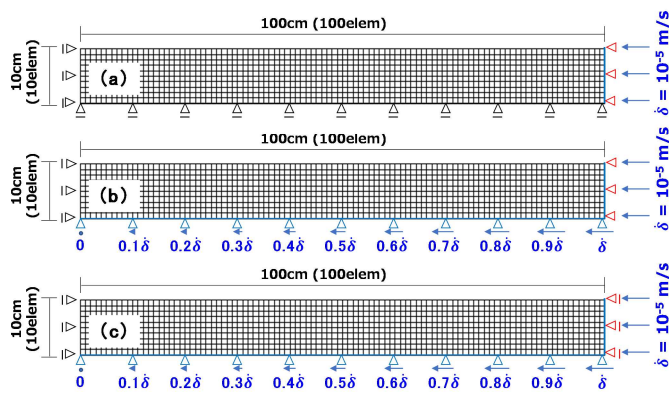


図5 有限要素メッシュと境界条件

4. 解析結果

図5で示した模型について、せん断ひずみ分布を図6に示す。同図(a)をみると底面に変位速度を与えない場合は地盤がブロック状に隆起する pop-up が解かれた。一方で同図(b)、(c)のように底面に一様圧縮の変位速度を与えた場合はいずれもせん断ひずみが複数箇所で卓越し、衝上断層群である imbrication を再現することができた。このことから模型底面に一様圧縮の変位速度を与えることが imbrication を再現する上で重要であることが分かる。また境界条件として右端に摩擦を考慮する場合(同図(b))としない場合(同図(c))では、後者のほうが発生する断層の本数が少なく間隔が相対的に広がっている。また発生順序についても、摩擦を考慮した場合(同図(b))は古い衝上断層の下盤側に新しい衝上断層が形成されていく piggyback 型に、摩擦を考慮しない場合(同図(c))は古い衝上断層の上盤側に新しい衝上断層が形成されていく overstep 型になることが分かった。このことから、境界条件の設定方法が imbrication の間隔と発生順序に影響を与えることが示された。発生角度については、モルクーロンの破壊基準より導かれる受働土圧のすべり角に一致していることを確認しており、imbrication の発生角度が内部摩擦角 ϕ (限界状態定数Mより推計)により決まることが分かった。

5. おわりに

水平圧縮を受ける地盤内に発生する imbrication の形成を一相系弾塑性有限変形解析により解き、以下の知見を得た。

- 1) 模型底面を摩擦なし条件とすることで pop-up が、模型底面に一様圧縮を伴う変位速度を与えることで imbrication が解かれることを示した。
- 2) Imbrication の発生形態について、端部摩擦の有無が発生間隔および発生順序 (piggyback 型/overstep 型) に影響を与えることを示した。また、発生角度は限界状態定数Mによって決まることが確認された。

地形形成過程を推論する上で、フィールド調査からのみでは限界があるが、地盤力学を援用して力学的見地からその発生過程を考究すれば、地形形成メカニズムに関する新たな視座を変動地形学・構造地質学分野に提供できるのではないかと考えている。

参考文献

- 1) 村田明広 (1988): 露頭スケールの duplex (Outcrop scale duplex), 地学雑誌, Vol.97, No.5, pp. Plate1-Plate2.
- 2) 狩野謙一, 村田明広 (2012): 構造地質学, 朝倉書店, pp. 129-141.
- 3) Butler, R.W.H. (1982): The terminology of structures in thrust belts, Journal of Structural Geology, Vol.4, No.3, pp. 239-245.
- 4) Fossen, H. (2015): e-learning material of "Structural Geology, second edition", Cambridge University Press, Contraction (Chapter 17).
- 5) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An Elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol.42, No.5, pp.47-57.
- 6) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, Vol.48, No.6, pp.771-790.
- 7) 野田利弘, 山田正太郎, 豊田智大, 浅岡顕 (2015), 横ずれ断層に伴う表層地盤のリーダー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), pp. I_463-I_474.

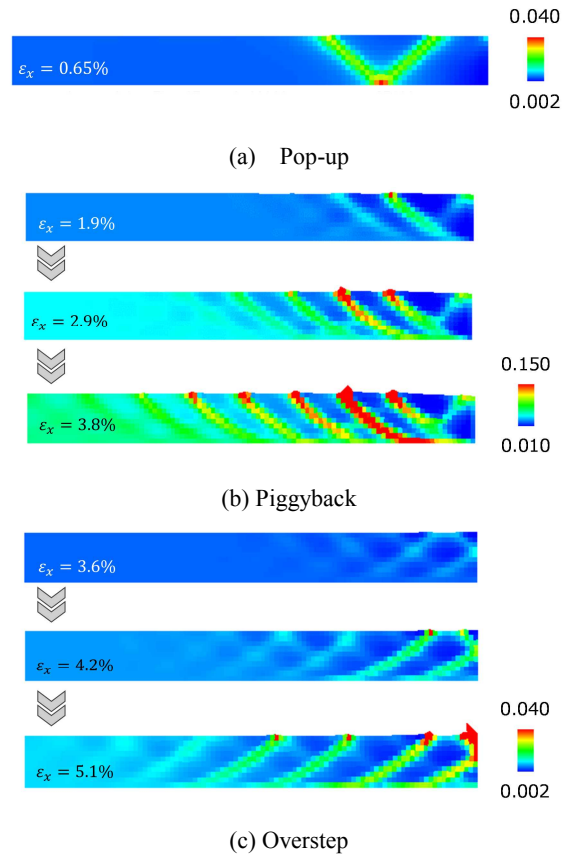


図6 せん断ひずみ分布