

水平圧縮作用により地盤内に発生するデコルマの水～土骨格連成弾塑性解析

デコルマ 水～土骨格連成 弾塑性

名古屋大学 国際会員 ○豊田 智大, 野田 利弘
 特別会員 大西 和也
 地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡 顕

1. はじめに

地盤力学は、土構造物の安定性照査のような地盤工学上の諸課題の解決のみならず、地形形成過程の再現のような構造地質学・変動地形学分野における現象理解に貢献できる可能性を秘めている。非可逆的な地形変動を計算により再現するためには、(1)地盤の材料非線形性（特に軟化現象）を考慮可能な弾塑性構成式を搭載し、(2)地盤の形状および状態変化を刻々と追跡可能な有限変形理論に基づく解析手法が必須となる。著者らの研究グループでは、(1)(2)の点に加え、間隙水の存在と慣性力を考慮可能な地盤の変形解析コード **GEOASIA**¹⁾を用いて、端緒的ではあるが、横ずれ断層変位時に生じる Riedel せん断帯²⁾のほか、海底地盤の隆起傾斜に伴う正断層群 (listric 断層)³⁾や、水平圧縮作用下にある地盤内での衝上断層群 (imbrication)⁴⁾の形成過程を数値解析的に再現してきた。本稿では同様に、同解析コードを用いて、続成作用により骨格構造が発達した状態を想定した海底地盤の水平圧縮を解くことで、デコルマ (水平断層) の発生過程の再現可能性を示す。

2. 沈み込み帯における地形変動の概略

本章では、本解析の理解を促すために、プレート収束境界でできる地形のうち、日本列島をはじめとする「島弧～海溝系」における地殻変動について、狩野・村田⁵⁾、小出⁶⁾などを参考にその概略を述べる。海洋プレート上には堆積物が整然と堆積しているが (海洋プレート層序)、この堆積物はプレートに比べて比重が小さく、海洋プレートと共に沈み込むことができない。したがって、海溝において海洋プレートから剥ぎ取られ、大陸プレート側に付加されることとなる。剥ぎ取られた堆積層は「付加体」と呼ばれており、日本列島の大部分はこの付加体堆積物により構成されている。付加体はプレート沈み込みの過程で常に水平圧縮の作用を受けており、図1のような複数の衝上断層やデコルマ (水平断層) を伴う極めて複雑な地質構造を呈する。付加体の成長過程には剥ぎ取り付加 (offscraping accretion) と底付け付加 (underplating accretion) の2種類が知られている。剥ぎ取り付加では、図2(a)のように覆瓦状の衝上断層群 (imbrication) が piggyback 型の衝上順序で発達する (付加体の底にはデコルマができる)。底付け付加は、同図(b)のように、剥ぎ取り付加により形成された付加体の底に堆積物が付加されるもので、覆瓦状の duplex 構造の形成を伴う。

3. 解析条件

飽和状態にある水平堆積地盤の水平圧縮作用時の変形を解く。二次元平面ひずみ有限要素メッシュおよび境界条件を別報⁴⁾に倣い図3のとおり設定する。領域左端では水平変位のみ固定した (摩擦なし)。領域右端では左向き水平変位速度 $\delta = 10^{-5} \text{ m/s}$ を与え、鉛直変位は非拘束とした (摩擦なし)。模型

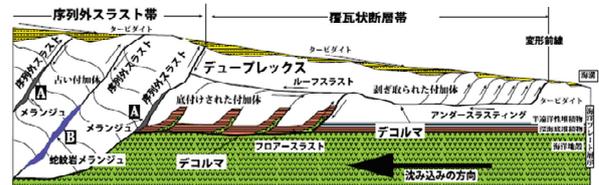


図1 沈み込み帯で起こる擾乱作用⁶⁾

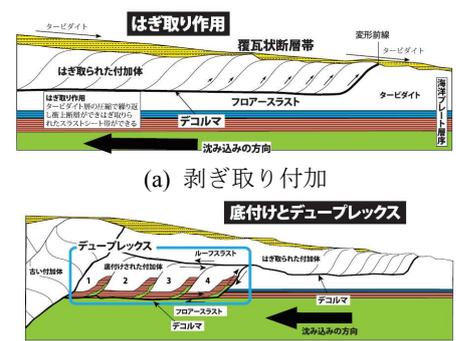


図2 沈み込み帯で起こる擾乱作用⁶⁾

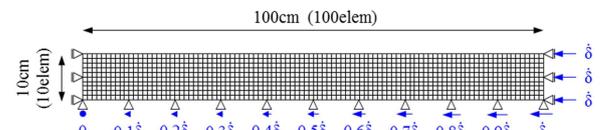


図3 有限要素メッシュと境界条件

表1 材料定数

弾塑性パラメータ		発展則パラメータ		初期値	
圧縮指数 λ	0.04	正規圧密土化指数 m	0.6	間隙比 e	深さ方向に分布
膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.002	構造劣化指数 a	1.0	過圧密の程度 $1/R_0$	1.3×10^6
限界状態定数 M	1.0	回転硬化指数 b_r	0.001	構造の程度 $1/R_0^*$	1.3×10^6
NCLの切片 N	1.77	回転硬化限界定数 m_b	0.001	異方性の程度 ζ_0	0.0
ポアソン比 ν	0.33	物性値		応力比 η_0	0.545
		土粒子密度 ρ^s (g/cm ³)	2.689		
		透水係数 k (cm/s)	1.0×10^{-5}		

Soil-water coupled elasto-plastic analysis of décollement in horizontally compressed ground.

Toyoda, T., Noda, T., and Onishi, K., Nagoya University, Asaoka, A., Association for the Development of Earthquake Prediction

底面では鉛直方向に固定し、水平方向には線形な変位速度分布（一様圧縮）を与えた。構成材料は二相系弾塑性体とし、弾塑性構成式には SYS Cam-clay model³⁾を用いた。その材料定数は山田ら³⁾に準拠し、物理的・化学的続成作用を受けて半固結状態にある中間土のパラメータを表 1 のとおり設定した。このとき、材料の挙動は拘束圧のみならず排水距離によっても変化し、幅 1 要素の水平な一様圧縮解析においては、深度に応じて図 4 のような塑性圧縮／膨張を伴う軟化挙動を示す。地表面近傍の要素ほど、ピーク強度およびピーク強度発現時のせん断ひずみは小さくなる。

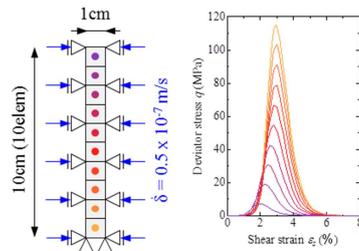


図 4 幅 1 要素の解析時の要素挙動 (二相系, 自重考慮, 平面ひずみ条件)

図 4 のような塑性圧縮／膨張を伴う軟化挙動を示す。地表面近傍の要素ほど、ピーク強度およびピーク強度発現時のせん断ひずみは小さくなる。

4. 解析結果

せん断ひずみ分布の経時変化を図 5 に示す。図中の ϵ_x は模型全体の水平圧縮ひずみを表す。まず、解析初期段階(a)においては imbrication の発生が解かれた。ただし、変形の進行とともに変形の局所化は右側の一本のすべり線に集中し、同図(b)においては、同すべり線の延伸により、模型中央深さにおいて 1 本目のデコルマの形成が解かれた (デコルマ上盤側領域 I の剥ぎ取り)。その後、剥ぎ取られたデコルマ内においては、圧縮変形の累積に伴い、せん断ひずみが非一様に発達し、地表面にも不規則な凹凸が発生することとなる。(c)-(d)においては、1 本目のデコルマの下盤側で 2 本目のデコルマの発達が発達し、領域 II が領域 I に底付けされる過程が解かれた。

次に、過剰間隙水圧に着目する。図 6 では、図 5(b), (d)の時刻 (1 本目および 2 本目のデコルマ発生時) において正の過剰水圧が生じている要素を赤で着色している。一般に、デコルマのすべりは間隙水圧の上昇を伴って進行することが知られているが⁵⁾、図 6 においても、デコルマの水平すべりの進展過程において、デコルマ面近傍では、材料の負のダイレイタンス (塑性圧縮) に起因する正の過剰水圧が発生していることが確認された。なお、変形局所化を解く上で不可欠な「軟化現象」と材料の「塑性圧縮」の同時発生は、SYS Cam-clay model により「構造」の概念を導入するとともに、二相系解析 (間隙水による体積拘束) を導入することで自ずと解かれうる現象であることを指摘しておく。

また、図 7 に示す点 P の加速度応答においては、変形の局所化に伴う地震動の発生が確認された。これは、本稿で用いた解析手法が慣性力を考慮し、運動方程式を時間積分しているからこそ解かれうる現象である。今回の模型寸法が高さ 10cm と小さいにもかかわらず、200gal 超の大きな加速度が得られた点も興味深い。

5. おわりに

本稿では、沈み込み帯近傍の地殻変動に着目し、半固結状態にある地盤に水平圧縮が作用したときの変形を二相系弾塑性解析により解き、比較的簡単な条件下でデコルマの発生過程が再現されうることを示した。また、デコルマ近傍での正の過剰間隙水圧の発生と地震動の生成が得られることを示した。今後は、部分排水の程度の影響を含む時間スケール効果やサイズ効果についても検討してゆく。

参考文献

- 1) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finited deformation analysis based on a rate-type equation f motion..., *S&F*, **48**(6), 771-790.
- 2) 野田ら (2015): 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..., *土木学会論文集 A2*, **71**(2), I_463-474.
- 3) Yamada, E. et al. (2021): Soil-water coupled elasto-plastic analysis on the formation process of normal faults..., *Proc. 20th ICSMGE*, accepted.
- 4) 大西ら (2021): 弾塑性計算地盤力学に基づく imbrication の形成に関する..., 第 56 回地盤工学研究発表会, submitted.
- 5) 狩野, 村田 (1998): 構造地質学, 朝倉書店, 129-142.
- 6) 小出 (2020): 地質学の学際化プロジェクト 第 5 巻 地質学 3 弧状シンギュラリティ..., 札幌学院大学総合研究所, 111-140.
- 7) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description of two-distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, **42**(5), 47-57.

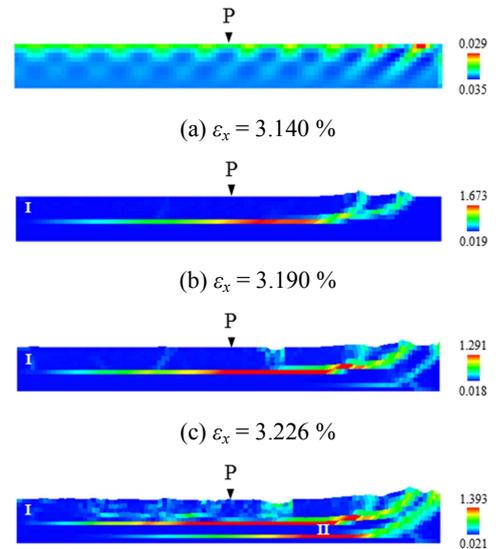


図 5 せん断ひずみ分布

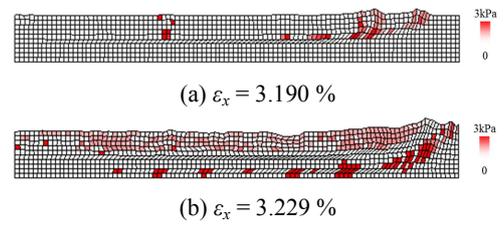


図 6 過剰間隙水圧分布

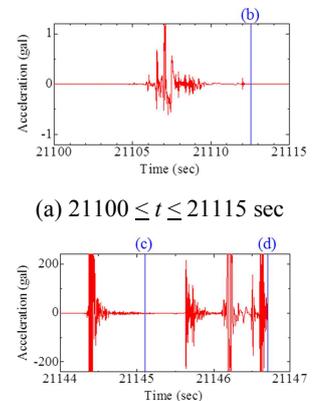


図 7 点 P の鉛直加速度

図中の(b)-(d)は図 5 の変形場(b)-(d)を表現したときの時刻を表す