

熱海盛土崩壊メカニズムに関する空気～水～土連成弾塑性有限変形解析

斜面崩壊 弾塑性解析 三相系解析

名古屋大学 国際会員 ○吉川 高広 野田 利弘 中野 正樹

1. はじめに

令和3年7月3日に熱海市の逢初川源頭部で盛土が崩壊し、土石流災害が発生した。この盛土崩壊のメカニズムを明らかにするために、弾塑性構成式 SYS Cam-clay model¹⁾を搭載した慣性力対応の空気～水～土連成有限変形解析コード²⁾により、盛土構築から崩壊までの一連過程の数値解析を行った。本稿では、その解析結果として、降雨時の地下水流入により盛土底部が塑性体積膨張を伴う軟化（吸水軟化）挙動を呈することで盛土全体が崩壊に至ることを示す。

2. 解析条件

図1は解析断面と水理境界条件を示す。当該盛土への降雨浸透や地下水流入を詳細に把握するためには3次元解析が必要であるが、ここでは崩壊メカニズムを短期間で明らかにするために、2次元平面ひずみ条件下での数値解析を実施した。解析対象断面は、静岡県³⁾が実施したボーリング No. 1, No. 5, No. 3, No. 4 と逢初川谷部を結ぶ断面とした。本断面は地形上集水しやすい谷部、つまり最も厳しい外力条件下にある。解析断面は、安山岩、斜面堆積物、溪流堆積物、上部盛土および下部盛土の5種類の土材料から構成されるものとした。盛土は施工履歴に基づいて、上部盛土・下部盛土の順に、土要素を追加していく形で構築した⁴⁾。水理境界条件について、左右端と下端は全水頭一定境界条件、地表面は降雨境界条件とした。降雨境界条件について、上部盛土・下部盛土の構築時より、年平均降水量 2,000 mm から年平均蒸発量 500 mm を差し引いた 1,500 mm を、単位時間当たりに換算して地表面の境界条件として与え、まずはこの条件下で定常状態となるまで数値解析を実施した。その後、盛土崩壊の数値解析においては、7/1 午前 0 時から 7/3 午前 10 時までの 58 時間に静岡県熱海雨量観測所で観測された 459 mm の雨量を、単位時間当たりに換算して地表面の境界条件として与えた。また、当該領域は降雨時に逢初川・鳴沢川流域上部に降った雨が溪床部等を通して流下するルートなど地下水流入が多いことが水文調査から明らか⁵⁾となっているため、盛土崩壊の数値解析においては、図1中に赤破線で示す透水性の高い溪流堆積物の底部から、鉛直上向きに単位奥行き当たり 250 m³/日の湧き出し流量を与えた。ここで、現場の地形は、下流側が上流側に比べて谷が狭くなっている（奥行きが小さい）ため、下流に行くほど地下水が周りから集まりやすく、盛土底面への単位面積当たりの流入量は増える。このことを2次元平面ひずみ解析で考慮するために、地下水流入量を下流に行くほど直線的に大きくなるように設定した。なお、盛土崩壊の数値解析直前までは流量の湧き出し条件を設定していないが、解析断面左右端と下端に設定した全水頭一定境界条件により、平時の地下水流れを考慮している。

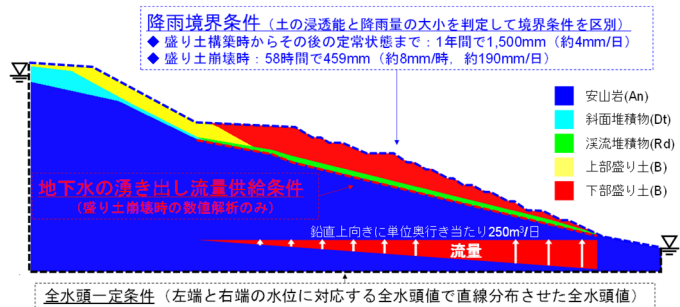


図1 解析断面と水理境界条件

SYS Cam-clay model に関する盛土の材料定数と初期値については、紙幅の都合上割愛するが、現地に残存した盛土から採取した土を用いて、現場密度で締め固めて作製した飽和供試体の圧密非排水三軸圧縮試験結果を、一様変形場を仮定した SYS Cam-clay model の応答挙動を再現してパラメータを決定した。なお、上部盛土と下部盛土のどちらにおいても同じ材料定数と初期値を用いた。また、盛土以外の材料定数と初期値については、力学試験が実施されていないため、硬くて変形が生じにくいパラメータを設定した。さらに、7/1～7/3 の盛土崩壊の数値解析においては、盛土以外の土は変形しない条件を設定した。次に浸透特性については、安山岩は常に飽和状態、その他の土材料は飽和・不飽和両状態をとるものとして、不飽和浸透特性モデルには van Genuchten⁶⁾–Mualem⁷⁾ モデルを用いた。安山岩、斜面堆積物、溪流堆積物、上部盛土および下部盛土のそれぞれにおいて代表的な1つの浸透特性を与えて数値解析を実施した。飽和透水係数の値は現場透水試験結果より決定しており、下部盛土、溪流堆積物および安山岩はボーリング No. 3、上部盛土はボーリング No. 5、斜面堆積物はボーリング No. 1 の結果を用いた。不飽和浸透特性について、下部盛土は保水性試験結果を基にパラメータを決定した。上部盛土、斜面堆積物および溪流堆積物に対しては、飽和透水係数の値が下部盛土、上部盛土、斜面堆積物、溪流堆積物の順に大きいため、この順に保水性が低くなるようにパラメータを設定した。

3. 解析結果

図2と図3はそれぞれ、盛土崩壊の数値解析におけるせん断ひずみ分布と含水比変化分布の経時変化を示す。せん断ひずみ分布の図中には、崩壊の数値解析開始時の地表面位置を黒色の実線で示した。含水比変化は崩壊の数値解析開始時からの変化量（吸水が正）である。図2のせん断ひずみ分布を見ると、7/1～7/3の降雨開始からの時間経過に伴い、

下部盛土の法尻付近から上方へと順にせん断ひずみの局所化領域（以後「すべり」）が生じ、58 時間経過時には下部盛土の最上部まで到達している。このとき図 3 の含水比変化分布を見ると、下部盛土では地表面からの降雨浸透による吸水がほぼ生じていない一方で、溪流堆積物からの地下水流入による吸水が生じており、時間経過とともに上方へと吸水領域が広がっている。図 2 と図 3 の最下段は、58 時間経過時の盛土のみを抽出かつ下部盛土部分を拡大したせん断ひずみ分布と含水比変化分布をそれぞれ示す。溪流堆積物からの地下水流入により、下部盛土は透水性が低いために底部のみで著しく吸水し、一方で地表面付近まで到達したすべり面ではほぼ吸水が生じていないことから、下部盛土底部の吸水によるせん断変形をきっかけとして、下部盛土全体のすべりが生じたことがわかる。なお、下部盛土よりも透水性が高い上部盛土では、地表面からの降雨浸透によって吸水量が増加しているが、下部盛土底部ほどは吸水していない（間隙水圧が上昇していない）ため、大変形は生じなかった。

図 4 は、図 2 中に示した下部盛土の最底部ですべり面上に位置する土要素の力学挙動を示す。7/1～7/3 の降雨開始以降の解析結果を示しており、○は降雨開始直前の状態を示す。まず降雨開始直前の状態について、せん断ひずみ ε_s は大きくないものの、(b)有効応力経路（せん断応力 q ～平均有効応力 p' 関係）より、盛土構築により応力比 q/p' が再構成試料の力学試験から決定した限界状態定数 M と同程度に大きい状態にある。その後降雨が開始して地下水が流入すると、(d)間隙水圧 p^w の上昇、(c)飽和度 s^w の上昇および(f)サクシヨン p^s の低下により、(b)有効応力が M よりも、さらに高い応力比へと状態を移している。図中の△は飽和度 s^w が 100 % になった時点を示しており、それ以降も地下水が流入することで、(c)間隙水圧 p^w がさらに上昇して、(b)平均有効応力 p' とせん断応力 q が低下する軟化挙動を呈している。このとき、(e)比体積 v が大きく増加（塑性体積膨張）している。以上のように、溪流堆積物からの地下水流入により、下部盛土の底部において間隙水圧と飽和度が上昇して有効応力が M よりもさらに高い応力比状態を移し、飽和化後も地下水がさらに流入して間隙水圧が上昇すると、塑性体積膨張を伴う軟化現象が生じて、盛土のすべり破壊が生じた。

4. おわりに

幾つかの仮定を設けつつ数値解析を行った結果、盛土崩壊は、降雨浸透によっては発生せず、降雨に伴う地下水流入により発生することを示した。今後は盛土高さや降雨に伴う地下水流入量などを系統的に変化させた数値解析を実施して、各種条件が盛土崩壊の力学挙動に与える影響を明らかにしていきたい。

謝辞 静岡県交通基盤部河川砂防局砂防課からは水文/地盤調査データをご提供頂きました。また、元静岡県副知事の難波喬司氏、名城大学の小高猛司教授、岐阜大学の沢田和秀教授、静岡大学の今泉文寿教授にはご助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献 1) Asaka et al.: An elasto-plastic..., S&F, 42(5), 47-57, 2002. 2) Noda and Yoshikawa: Soil-water-air coupled..., S&F, 55(1), 45-62, 2015. 3) 静岡県: 逢初川の発生原因調査検証委員会関連調査結果, 静岡県逢初川土石流災害関連 Web Page, 2021. 4) Takaine et al.: Predictive simulation..., S&F, 50(2), 245-260, 2010. 5) 静岡県: 逢初川土石流の発生原因調査報告書 (2022.9.8 公開), 第 5 章 地質・水文調査, 2022. 6) van Genuchten: A closed-form equation..., Soil Sci Soc Am J, 44(5), 892-898, 1980. 7) Mualem: A new model..., Water Resour. Res., 12(3), 513-522, 1976.

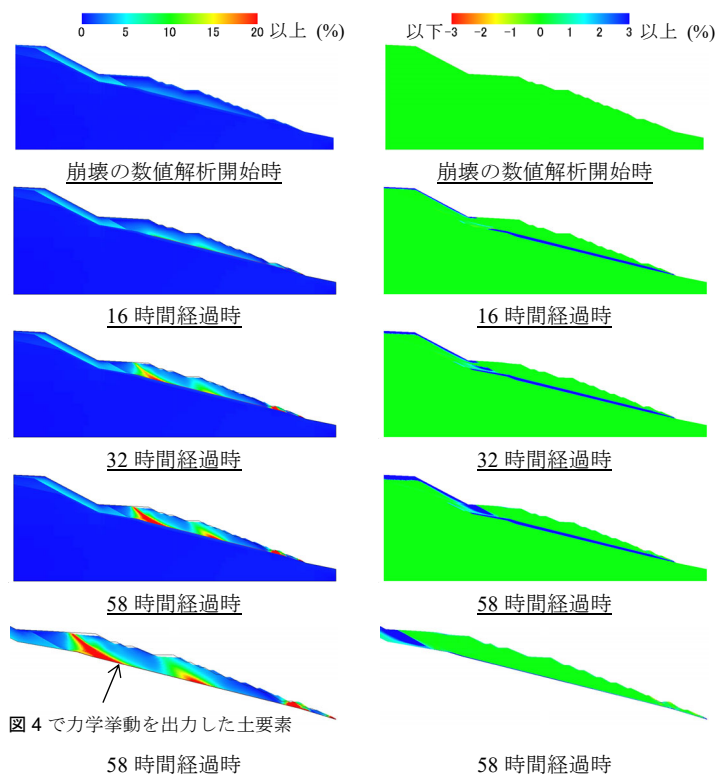


図 4 で力学挙動を出力した土要素

58 時間経過時
(盛土のみを抽出、下部盛土部を拡大)

図 2 せん断ひずみ分布の経時変化

58 時間経過時
(盛土のみを抽出、下部盛土部を拡大)

図 3 含水比変化分布の経時変化

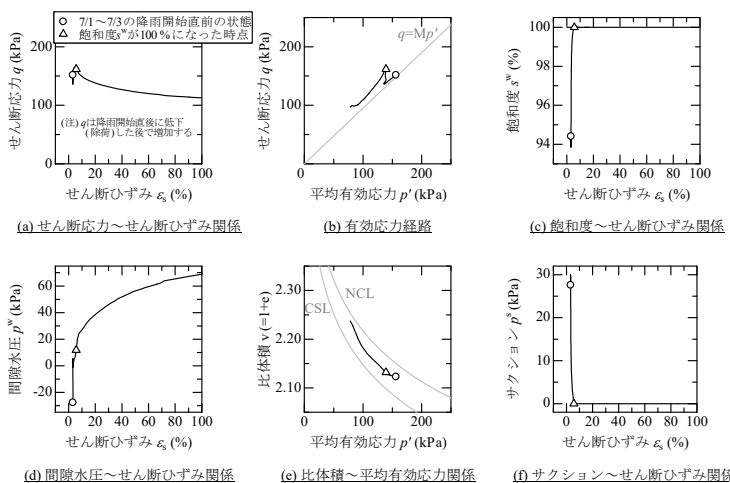


図 4 下部盛土の最底部ですべり面上に位置する土要素の力学挙動