三相系弾塑性有限変形解析コードによる 熱海市逢初川盛土崩壊の数値シミュレーション

Numerical Simulation on Failure of Embankment Constructed on Aizome River in Atami City Using Three-Phase Elastoplastic Finite Deformation Analysis Code

吉川高広¹⁾,野田利弘²⁾,中野正樹²⁾

Takahiro Yoshikawa, Toshihiro Noda, and Masaki Nakano

1) 博(工) 名古屋大学 大学院工学研究科 助教 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail:

yoshikawa.takahiro.d3@f.mail.nagoya-u.ac.jp)

2) 博(工) 名古屋大学 大学院工学研究科 教授(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Embankment failure and debris flow disaster occurred in Atami City on July 3, 2021. To elucidate the embankment failure mechanism, numerical simulation on a series of processes from embankment construction to failure has been conducted using a three-phase finite deformation analysis code considering inertia force incorporating the elastoplastic constitutive model SYS Cam-clay model. The results show that a large amount of groundwater flowing into the bottom of the embankment may have caused softening behavior with plastic volume expansion (water absorption softening) in the soil in that area, leading to the failure of the whole embankment.

Key Words: Three-Phase Analysis, Elastoplastic Analysis, Water Absorption Softening, Rainfall

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.本研究では、この盛土崩壊の メカニズムを明らかにすべく数値解析を行った.具体的 には、砂から中間土、粘土までの広範な土から構成される 盛土について、降雨浸透や地下水流入に伴う変形・破壊挙 動を解析できる手法として、土骨格の弾塑性構成式SYS Cam-clay model^[1]を搭載した空気~水~土連成有限変形 解析コード^[2]を採用し、地盤・水文調査結果^[3]に基づいて 解析条件を設定した上で盛土構築から崩壊までの一連の 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の土が塑性体積膨張 を伴う軟化(吸水軟化)挙動を呈することで盛土全体が崩 壊に至ることを述べる.

2. 解析条件

(1) 解析断面と境界条件

図-1は盛土崩落領域周辺の平面図,図-2は解析対象断 面の地質図を示す.本来,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. しかし,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,ボーリングNo.1, No.5, No.3, No. 4と逢初川谷部を結ぶC断面とした.本断面は地形上集水 しやすい谷部,つまり最も厳しいと考えられる外力条件 下にあり,またボーリング調査地点も同様の観点から選 定されているため,その調査結果を利用しやすい.



図-1 盛土崩落領域周辺の平面図



図-3は解析断面と水理境界条件を示す.解析断面は,安山岩,斜面堆積物,渓流堆積物,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は, 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1,500mmを、単位時間当たりに換算して 地表面に与え,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, 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に与えた. また, 当該領域は降雨時に逢初川・鳴沢川流域上部に降っ た雨が渓床部等を通っ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^[3]となっているため, 7/1以降の解析においては、図-3中に赤破線で示す透水性 の高い渓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 は増えるものと考えられる.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, 7/1以降の解 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.



(2) 土質条件

a) 力学特性

土骨格の弾塑性構成式はSYS Cam-clay model^[1]を用いた. 盛土の材料定数と初期値については,現地に残っている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の応答挙動で

再現するようにパラメータを決定した. 図-4は実験結果 とその再現結果を示す. 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, 力学試験を実施し ていないため, ここでは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以降の解析においては, 盛 土以外の土は変形しない条件を設定した.



b) 浸透特性

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 Genuchten^[5]-Mualem^[6] モデルを用いた. 安山岩, 斜面堆 積物, 渓流堆積物, 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. ただし, 浸透特性が降雨時の浸透挙動ひいては変形 挙動に大きな影響を与えるため,実際に崩落した下部盛 土に対しては、2ケースの解析条件を設定した.表-1は両 ケースの飽和透水係数の値を示す.図-5と図-6はそれぞ れ、ケース1とケース2の不飽和浸透特性を示す.まずケー ス1について、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,渓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, 斜面堆積物および渓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,渓 流堆積物の順に大きくなっているため、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.次にケース2は, ケース1に対して下部盛土の条件のみを変更しており,7/1 以降の解析直前(年平均降水量・蒸発量を与えて定常状態

表-1 飽和透水係数の値

	ケース1	ケース2
下部盛土	5.31 × 10 ⁻⁸	7.50×10^{-7}
上部盛土	1.02×10^{-5}	
斜面堆積物	2.50×10^{-5}	
渓流堆積物	1.79×10^{-3}	
安山岩	8.40×10^{-7}	

単位:m/s



になった時点)に、ボーリングNo.3位置における下部盛 土の飽和度の解析結果が、サンプリング時に計測された 現場飽和度の値となるように、浸透特性を設定した.この とき、ケース1よりも下部盛土の飽和透水係数は大きく、 保水性が低い条件となっているが、ケース1の場合と同様 に、下部盛土の飽和透水係数が最も小さく、保水性が最も 高くなるように設定している.

3. 解析結果

まずケース1について述べる. 図-7と図-8はそれぞれ, 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、7/1以降の解析開始時の地 表面位置を黒色の実線で示した.含水比変化は7/1以降の 解析開始時からの変化量(吸水が正)である.図-7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 ひずみが局所化する領域(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-8の含水比変化分布より、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、渓 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-9 と図-10は、ケース1の58時間経過時の盛土部分のみを抽 出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. せん断ひずみ分布の図中には, 7/1以降の解析開始時 の地表面位置を黒色の実線で示した. 渓流堆積物からの 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ており、一方で地表面付近まで到達 している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, 大きな変形は生じなかった.

次にケース2について述べる.図-11と図-12はそれぞれ, せん断ひずみ分布と含水比変化分布の経時変化を示す. なお,ケース2では非常に大きな変形が生じて,36時間経 過時に計算が発散し,数値解析を終了した.せん断ひずみ 分布の図中には,7/1以降の解析開始時の地表面位置を黒 色の実線で示しており,含水比変化は7/1以降の解析開始 時からの変化量(吸水が正)である.図-11のせん断ひず み分布を見ると,ケース1の場合と同様に,下部盛土の法 尻付近から上方へと順にすべり面が形成されている.降 雨開始から36時間経過時には,下部盛土の最上部まです べりが生じており,ケース1と比べると,短時間で大変形 が生じている.このとき図-12の含水比変化分布では,ケ ース2はケース1に比べて下部盛土の透水性が高いものの, 地表面からの降雨が下部盛土の内部まで浸透していく様 子は見られない.図-13と図-14は,ケース2036時間経過





時の盛土部分のみを抽出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. せん断ひずみ分布の図中には, 7/1以降の解析開始時の地表面位置を黒色の実線で示した. ケース1と同様に,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.また,図-10と図-14のケース1とケース2の含水 比変化分布の比較より,下部盛土の透水性が高いケース2 の方が,下部盛土底部で著しく吸水している領域が大き いため,ケース2ではケース1よりも短時間で大変形が生 じている.

図-15は、図-9中に示したケース1の下部盛土の最底部 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、〇は降雨開 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'が図-4に示す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、(c)間隙水圧 p*の上昇、(c)飽和度s*の上昇および(f)サクションp*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、(d)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、渓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.図面は省略するが、ケース2の場合においても、同じ位置の土要素では同様の力学挙動を呈していた.なお、本構成式で表現された塑性体積膨張を伴う軟化現象は、Cam-claymodelが元来記述できる力学特性である^{[7],[8]}.

4. おわりに

土骨格の弾塑性構成式SYS Cam-clay model^[1]を搭載し た空気~水~土連成有限変形解析コード^[2]を用いて,盛土 構築から崩壊までの一連の過程の数値解析を行った.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を仮定した.土の力学特性と浸透特 性に関する解析条件は,圧密非排水三軸圧縮試験,保水性 試験および現場透水試験の結果を基に設定した.降雨に ついては,静岡県熱海雨量観測所で観測された雨量を地 表面に境界条件として与えるとともに,盛土崩落領域で は地下水の流入が多いことが水文調査から明らか^[3]とな っているため,透水性が高い渓流堆積物底部からの地下 水の湧き出しを考慮した.

この結果,盛土構築過程で再構成試料の力学試験から 決定した限界状態定数Mと同程度に大きい応力比状態に あった盛土底部において,地下水流入に伴って間隙水圧 と飽和度が上昇するため,飽和化した土が限界状態定数 Mよりも高応力比状態に移った後,さらなる地下水流入 に伴い吸水軟化現象(塑性体積膨張を伴う軟化現象)を示 した.また,この吸水軟化現象によって盛土内にすべり面 が,集水しやすい法尻付近から上方へと順次形成され,最 終的に下部盛土全体が崩壊に至った(「進行性破壊」).

このことから,実際の盛土崩壊の原因は,直接的な盛土 への降雨浸透に起因したものではなく,下部盛土底部に おける地下水流入に伴う吸水軟化現象に起因したもので あると考察した.

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

- Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 5, pp. 47-57, 2002.
- [2] Noda, T. and Yoshikawa, T.: Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol. 55, Issue. 1, pp. 45-62, 2015.
- [3] 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.
- [4] Takaine, T., Tashiro, M., Shiina, T., Noda, T. and Asaoka, A.: Predictive simulation of deformation and failure of peat-calcareous soil layered ground due to multistage test embankment loading, *Soils and Foundations*, Vol. 50, No. 2, pp. 245-260, 2010.
- [5] van Genuchten, M.T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898, 1980.
- [6] Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 513-522, 1976.
- [7] Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Soil-water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state, *Soils and Foundations*, Vol. 34, No. 1, pp. 91-105, 1994.
- [8] Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Annealable behaviour of saturated clay, an experiment and simulation, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.4, pp.9-20, 1995.