第7章　崩壊の再現解析

7.1 解析の目的

① 静岡県が2021年7月に行った原因推定は、現地の目視結果に基づき現象の単純化や大胆な仮定を設定し、「盛り土に概ねどういう現象が発生したのだろうか」という推定だった。

② より客観性のある原因推定（究明）のためには、現地の水文・地質・土質調査から得られた数値データ等を用いて、発生した現象を数値解析により再現（シミュレート）することが望ましい。

7.2 第2回委員会及び委員による個別指導で暫定的に了解された「解析方法の基本的考え方」

① 河川堤防の盛土や道路盛土など、解析において境界条件や土質条件の設定が比較的容易なものについては、以下のような方法で解析することが可能なことが多い。

- 「二次元又は三次元浸透流解析」により、盛土内の水の流動（流速、流量、流向、地下水位等）を推定する。
- 浸透流解析から得られた盛土内への水の流動の時間的空間的分布データ及び土質定数を入力条件とし、「盛土（斜面）の二次元又は三次元崩壊の再現解析」を行い、盛土内のひずみ分布等の時間的変化等を推定し、盛土の崩壊に至るまでのメカニズムを推定する。

② 斜面の崩壊の再現解析では、「浸透流解析による盛土の水の流動」と「土の土質定数の設定」が重要である。しかし、浸透流解析においては、逢初川源頭部という狭い範囲の水の流れを推定する点で、十分な解析精度が得られないことが懸念される。今回の盛り土は複数の場所から土が搬入されたと推測されるため、場所によって土の性状が異なり、かつ締固めが弱い。また、固化材なども使われている。盛り土の土質定数の推定には実際の施工者からの施工情報等の情報が不可欠であるが、情報が十分得られない可能性がある。

③ 崩壊の再現解析は、解析目的と解析条件に適合した解析モデルを選択し行う必要がある。上記のとおり、浸透流解析の精度に懸念があるものの、まずは浸透流解析の結果を待って、盛り土の崩壊の再現解析の方法を検討すべきである。

7.3 浸透流解析の結果

① 浸透流解析については、第6章で示したように十分な解析精度を得ることができなかった（2021年10月～12月の流量観測データをうまく再現できなかった)。

7.4 第3回委員会での対応方針

① 今後、追加的な浸透流解析は行わない。崩壊の再現解析においては、盛り土内の土中の水の流動や土の水による飽和・不飽和の状態は、水文調査の結果などを参照しつつ適宜仮定して行う。

② 盛り土は、締め固め度が弱く、間隙が大きい状態であったと推定される。このことはボーリングによる地盤調査からも明らかになっている。また、地下水が流入しやすい場所であった

ことから、土中の間隙には常時、水が多く入り込んでおり、さらに直前の降雨で盛り土内への水の流入が増えた（飽和度が高い）ものと推定される。

③ このような状態の場所の崩壊の再現解析を行う場合には、飽和度（土の湿潤状態）の違いによる土の強度変化を考慮できる解析モデルを用いることが望ましい。

④ この解析モデルの選定には、高度な工学的な知見を要する。よって、地盤工学会中部支部に数値解析モデルの選定について助言を依頼した。

⑤ これまでの数値解析により、地質・地盤構造をモデル化しているので、そのモデルを公表する。また、ボーリングデータや土質試験結果を解析において使いやすい形で公表する。

⑥ これらによって、社会の知による解析を可能とする。

7.5 対応状況

① 助言を依頼した地盤工学会中部支部からは、盛り土のほとんどが災害時に流出し、これまでの取組では予測できない現象もあることから、既存資料や調査結果を基に崩壊に関する数値解析を実施できる専門家の推薦があった。

② このため、専門家と解析手法の選定について協議した結果、様々な土材料から成る地盤と盛り土に降雨が浸透及び地下水が流入したときに、盛り土がどのように変形・破壊するのかを解析可能な手法として、「GEOASIA（以下、ジオアジアという）」の紹介があった。委員とも協議した結果、崩壊の再現解析には本解析コードを用いることとした。

7.6 解析方法

7.6.1　ジオアジアの概要

本手法は、土の間隙に水だけでなく空気も含む「不飽和土」に対応した慣性力考慮の有限変形解析手法であり、降雨浸透や地下水流入により土の間隙が水で飽和化されて、土が変形から破壊に至る過程を表現可能な手法である。今回の解析に用いたジオアジアの支配方程式として、次の式(7-1)、式(7-2)、式(7-3)はそれぞれ運動方程式、土骨格と間隙水の質量保存式、土骨格と間隙空気の質量保存式を示す。

$$\rho(\mathrm{D_s}\boldsymbol{v}_\mathrm{s}) = \mathrm{div}\,\boldsymbol{T} + \rho\boldsymbol{b} \tag{7-1}$$

$$s^\mathrm{w}\,\mathrm{div}\,\boldsymbol{v}_\mathrm{s} + \frac{1}{\rho^\mathrm{w}}\mathrm{div}\left[\rho^\mathrm{w}\frac{k^\mathrm{w}}{\gamma_\mathrm{w}}\{-\mathrm{grad}\,p^\mathrm{w} + \rho^\mathrm{w}\boldsymbol{b} - \rho^\mathrm{w}(\mathrm{D_s}\boldsymbol{v}_\mathrm{s})\}\right] + n(\mathrm{D_s}s^\mathrm{w}) + \frac{ns^\mathrm{w}}{K_\mathrm{w}}(\mathrm{D_s}p^\mathrm{w}) = 0 \tag{7-2}$$

$$s^\mathrm{a}\,\mathrm{div}\,\boldsymbol{v}_\mathrm{s} + \frac{1}{\rho^\mathrm{a}}\mathrm{div}\left[\rho^\mathrm{a}\frac{k^\mathrm{a}}{\gamma_\mathrm{w}}\{-\mathrm{grad}\,p^\mathrm{a} + \rho^\mathrm{a}\boldsymbol{b} - \rho^\mathrm{a}(\mathrm{D_s}\boldsymbol{v}_\mathrm{s})\}\right] + n(\mathrm{D_s}s^\mathrm{a}) + \frac{ns^\mathrm{a}}{\rho^\mathrm{a}\bar{\mathrm{R}}\Theta}(\mathrm{D_s}p^\mathrm{a}) = 0 \tag{7-3}$$

ここで、$\mathrm{D_s}$は土骨格から見た物質時間微分を表す作用素である。$\boldsymbol{v}_\mathrm{s}$は土骨格の速度ベクトル、$\mathrm{D_s}\boldsymbol{v}_\mathrm{s}$は土骨格の加速度ベクトル、$\boldsymbol{T}$は全 Cauchy 応力テンソル（引張が正）、$\boldsymbol{b}$は単位質量あたりの物体力ベクトル、$p^\mathrm{w}$は間隙水圧（圧縮が正）、$p^\mathrm{a}$は間隙空気圧（圧縮が正）、$s^\mathrm{w}$は飽和度（$s^\mathrm{a} = 1 - s^\mathrm{w}$）、$n$は間隙率を表す。$\rho$、$\rho^\mathrm{w}$、$\rho^\mathrm{a}$はそれぞれ土全体、水、空気の密度、$\gamma_\mathrm{w}$は水の単位体積重量、$k^\mathrm{w}$は透水係数、$k^\mathrm{a}$は透気係数を表す。$K_\mathrm{w}$は水の体積弾性係数、$\bar{\mathrm{R}}$は空気の気体定数、$\Theta$は絶対温度を示す。詳細は Noda et al. (2008)および Noda & Yoshikawa (2015)を参照されたい。

また、ジオアジアに搭載している土骨格の構成式は、弾塑性構成式 SYS カムクレイモデル (Asaoka et al., 2002)である。SYS カムクレイモデルは、粘土から砂、さらにはその中間土までの広範な土の力学挙動を統一的な枠組みで記述できるモデルである。カムクレイモデルを基にしており、例えば降雨浸透や地下水流入により間隙水圧が上昇すると、有効応力が低下するために、強度や剛性が低下して、軟化に至る挙動を表現可能なモデルである。その他、今回の解析に用いた不飽和浸透特性モデルは、van Genuchten–Mualem モデルである。

参考文献

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, 42(5), 47-57.

Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, 12, 513-522.

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, 48(6), 771-790.

Noda, T. and Yoshikawa, T. (2015): Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, 55(1), 45-62.

van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898.

7.7 解析条件

7.7.1 解析の流れ

図 7-1 に解析の流れを示す。まず、土質試験や現地調査を基に、解析に必要な土質パラメータと初期条件・境界条件を設定する。次に、今回の解析では、施工履歴に基づいて基盤と上部盛り土・下部盛り土を、土要素を追加していく形で構築する。その後に、2021 年 7 月 1 日から 7 月 3 日までの降雨による盛り土の崩壊シミュレーションを実施する。

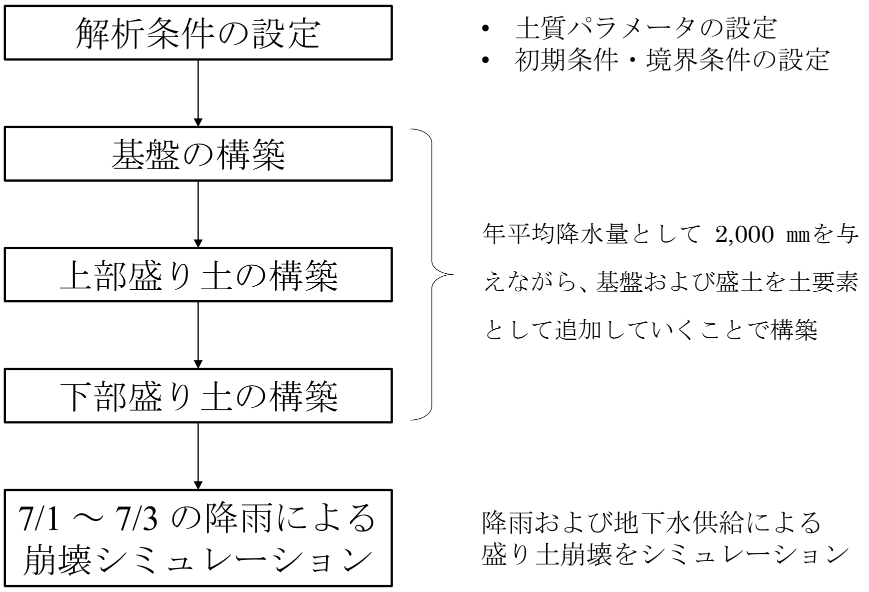


図 7-1　解析の流れ

7.7.2 解析断面

図 7-2 に平面図、図 7-3 に解析断面を示す。解析断面はボーリングNo.1、No.5、No.3、No.4 と逢初川谷部を結ぶＣ断面とする。2 次元平面ひずみ条件で解析を行った。

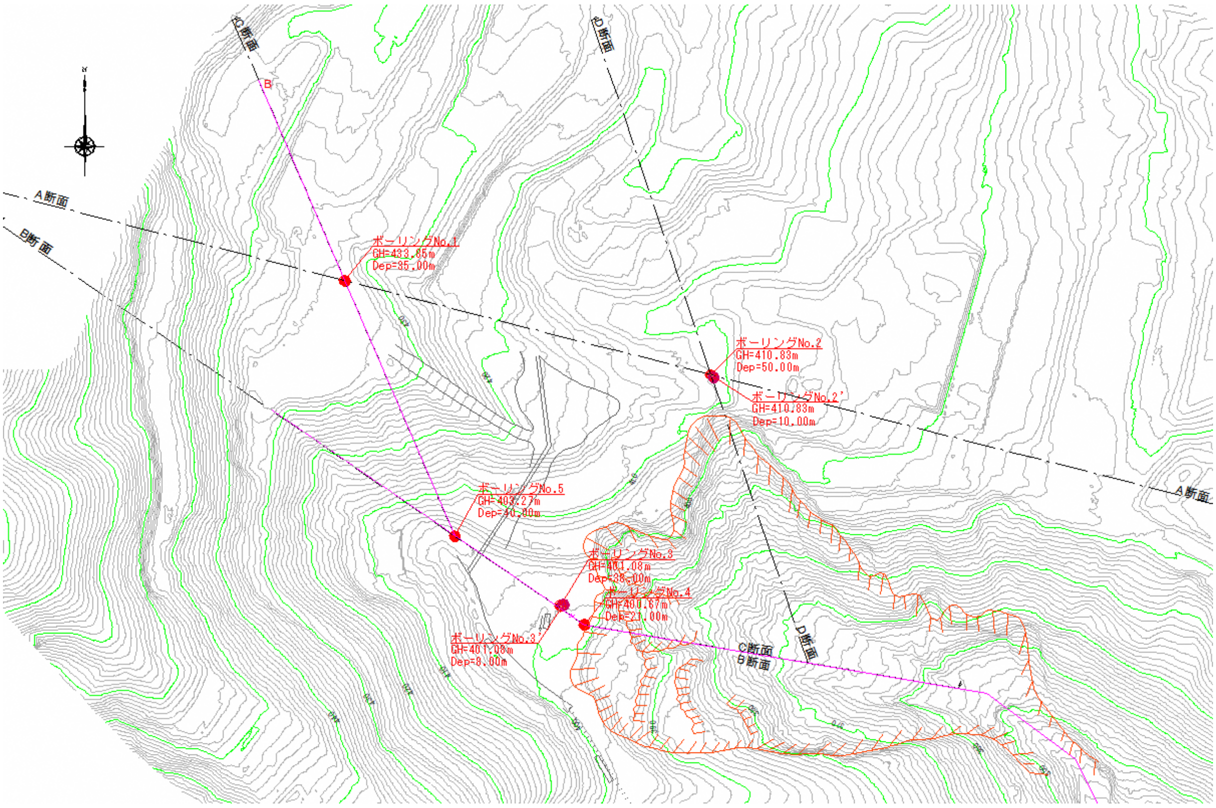


図 7-2　平面図

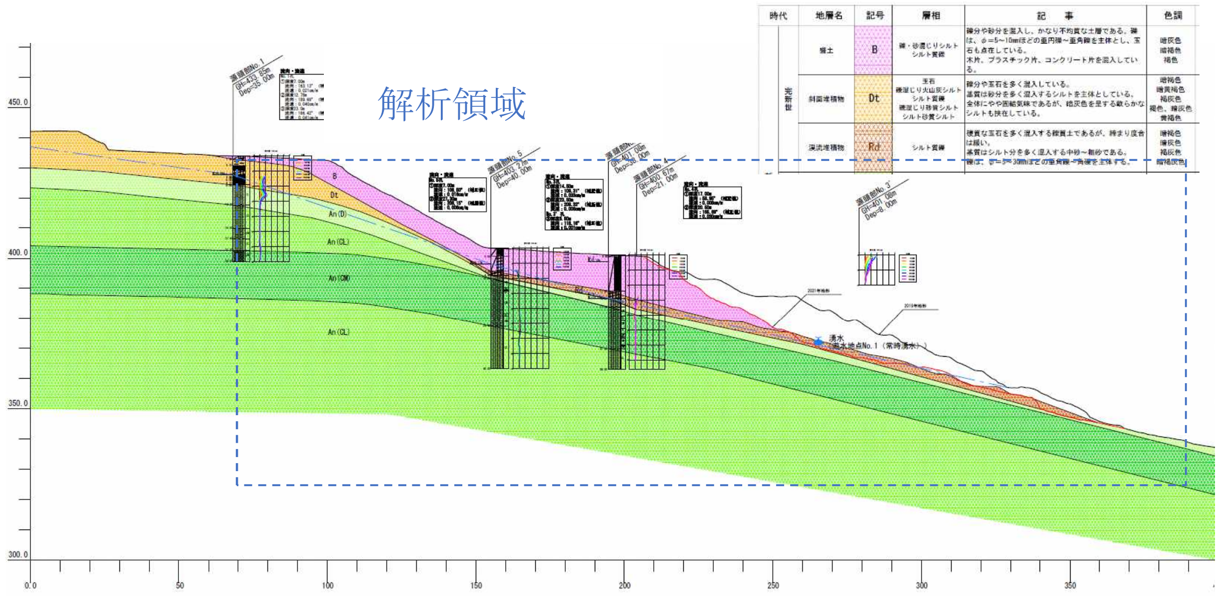


図 7-3　解析断面（Ｃ断面）

図 7-4 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、上部盛り土、下部盛り土の 5 つの材料から構成されるものとして、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た。水理境界条件について、左端と右端及び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。また、本断面は降雨時に逢初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供給が多いことがわかっているため、7/1～7/3 の崩壊シミュレーションにおいては、図 7-4 中に示す透水性の高い渓流堆積物の下部から所定の流量を供給する条件を設定した。

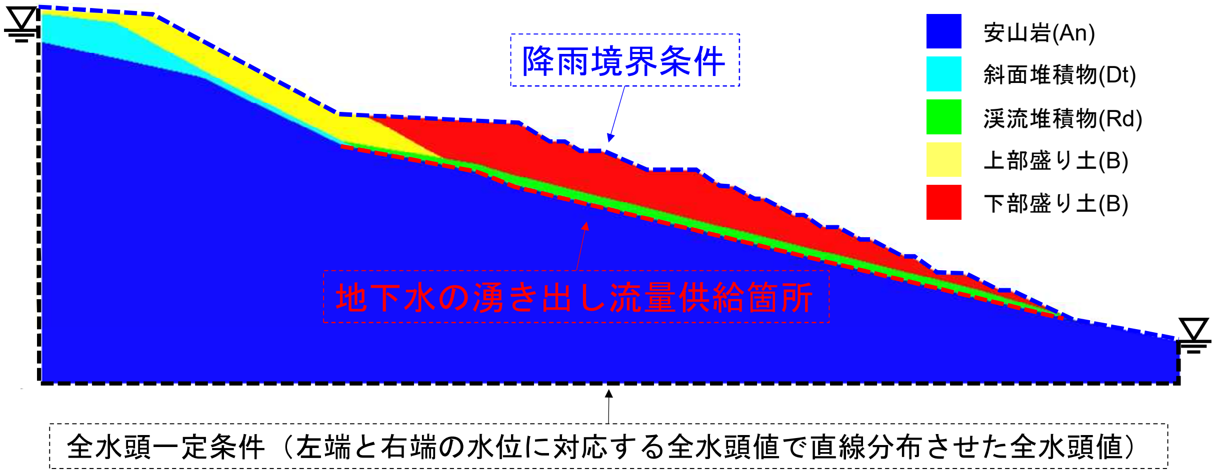


図 7-4　水理境界条件

7.7.3 解析パラメータ

まず弾塑性構成式 SYS カムクレイモデルのパラメータについて、現地に残っている盛り土から採取した土の三軸圧縮試験における供試体の変形挙動を再現するパラメータを設定した。図 7-5 は実験結果とその再現結果を示す。表 7-1 は設定した弾塑性構成式 SYS カムクレイモデルのパラメータを示す。なお、上部盛り土と下部盛り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、盛り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、硬くて変形が生じにくいパラメータを設定した。

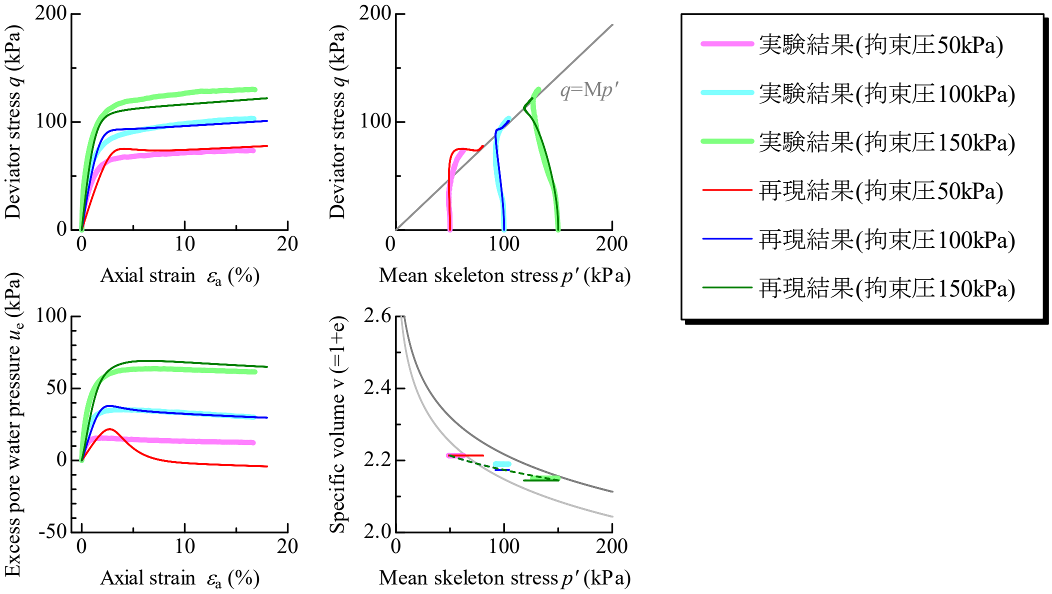


図 7-5　三軸圧縮試験の実験結果とその再現結果

表 7-1　弾塑性構成式 SYS カムクレイモデルの盛り土のパラメータ

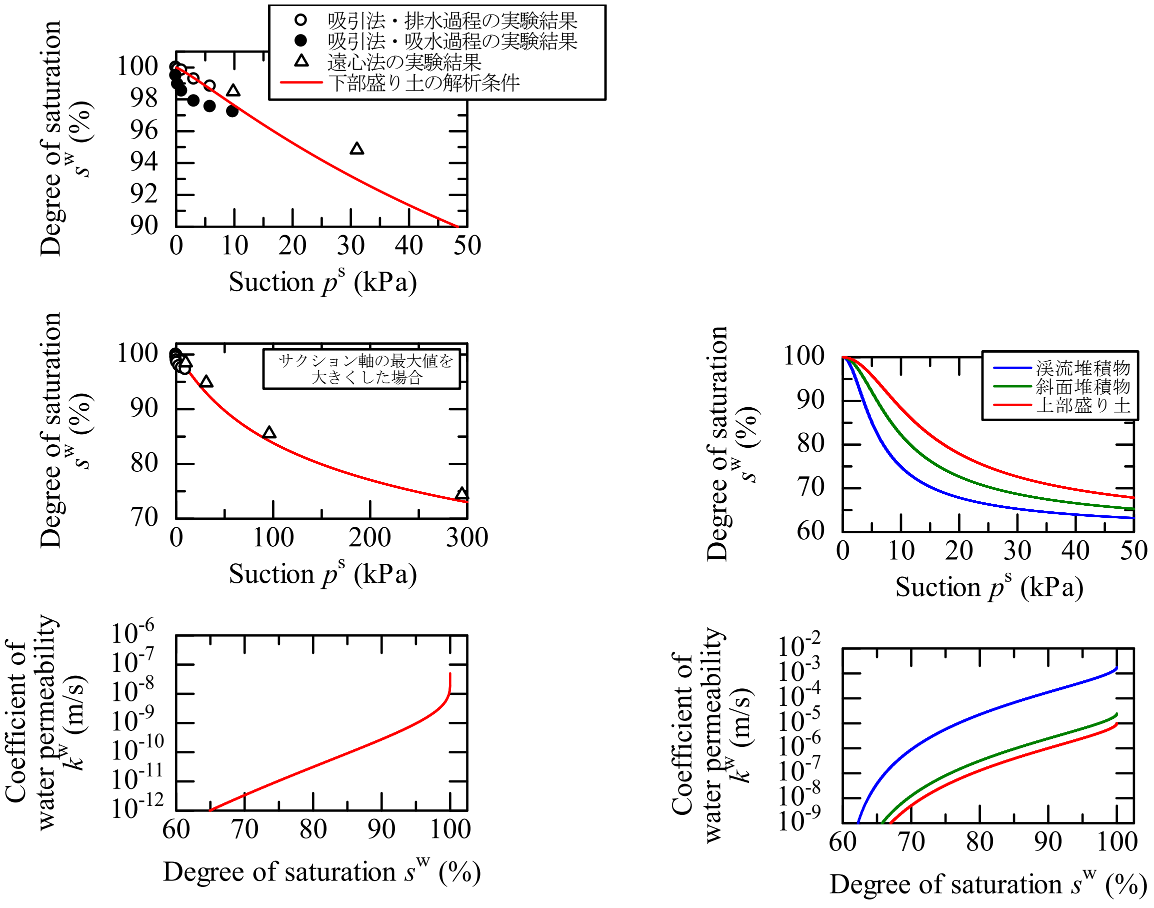
弾塑性パラメータ	NCL の切片 N	2.22
	限界状態定数 M	0.95
	圧縮指数 λ	0.15
	膨潤指数 κ	0.05
	ポアソン比 ν	0.3
発展則パラメータ	構造劣化の塑性変形の進展尺度における$-\boldsymbol{D}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{p}}$と$\|\boldsymbol{D}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{p}}\|$の割合	0.2
	構造劣化指数 a	0.1
	正規圧密土化指数 m	10.0
	回転硬化指数 b_r	0.05
	回転硬化限界面 m_b	1.0
初期値	間隙比 e_0	1.21
	構造の程度$1/R_0^*$	1.2
	応力比 η_0	0.545
	異方性の程度 ζ_0	0.545

次に浸透特性について、表 7-2 は飽和透水係数の値を示す。下部盛り土、渓流堆積物及び安山岩の値はボーリング No. 3 の現場透水試験結果の値を、上部盛り土の値はボーリング No. 5 の現場透水試験結果の値を、斜面堆積物の値はボーリング No. 1 の現場透水試験結果の値を用いた。

表 7-2　飽和透水係数の値

下部盛り土	5.31×10-8 m/s
上部盛り土	1.02×10-5 m/s
渓流堆積物	1.79×10-3 m/s
斜面堆積物	2.50×10-5 m/s
安山岩	8.40×10-7 m/s

図 7-6 は不飽和浸透特性を示す。下部盛り土は保水性試験結果を基にしてパラメータを決定した。渓流堆積物、斜面堆積物および上部盛り土は、飽和透水係数の値を基にして、渓流堆積物、斜面堆積物、上部盛り土の順に保水性が高くなるようなパラメータを設定した。



下部盛り土の不飽和浸透特性　　渓流堆積物、斜面堆積物および上部盛り土の不飽和浸透特性

図 7-6　不飽和浸透特性

また、降雨について、基盤・上部盛り土・下部盛り土の構築時は年平均 2000mm の雨量を、単位時間あたりに換算して地表面の境界条件として与えた。7/1～7/3 の崩壊シミュレーションにおいては、熱海雨量観測所で観測された発災時の 72 時間雨量である 461mm を、単位時間あたりに換算して地表面の境界条件として与えるとともに、図 7-4 中に示す地下水の湧き出し流量供給箇所に、鉛直上向きに単位奥行き辺り 225m²/日の流量を与えた。このとき、上流から下流へと

3 次元的に集水してくることを考慮して、流量を下流ほど 1 次関数的に大きくなるように設定した。地下水湧き出し条件については、さらなる検討を行う予定であり、今回設定した条件は試験的なものである。なお、7/1～7/3 の崩壊シミュレーションにおいては、盛り土以外の力学試験は実施しておらず力学特性が不明であるため、盛り土以外は変形しない条件を設定した。

7.8 解析結果

図 7-7 は 7/1～7/3 の崩壊シミュレーションにおけるせん断ひずみ分布と飽和度分布の経時変化を示す。7/1～7/3 の降雨開始直前と、降雨開始から 1 日経過時、2 日経過時および 3 日経過時のコンター図を示す。

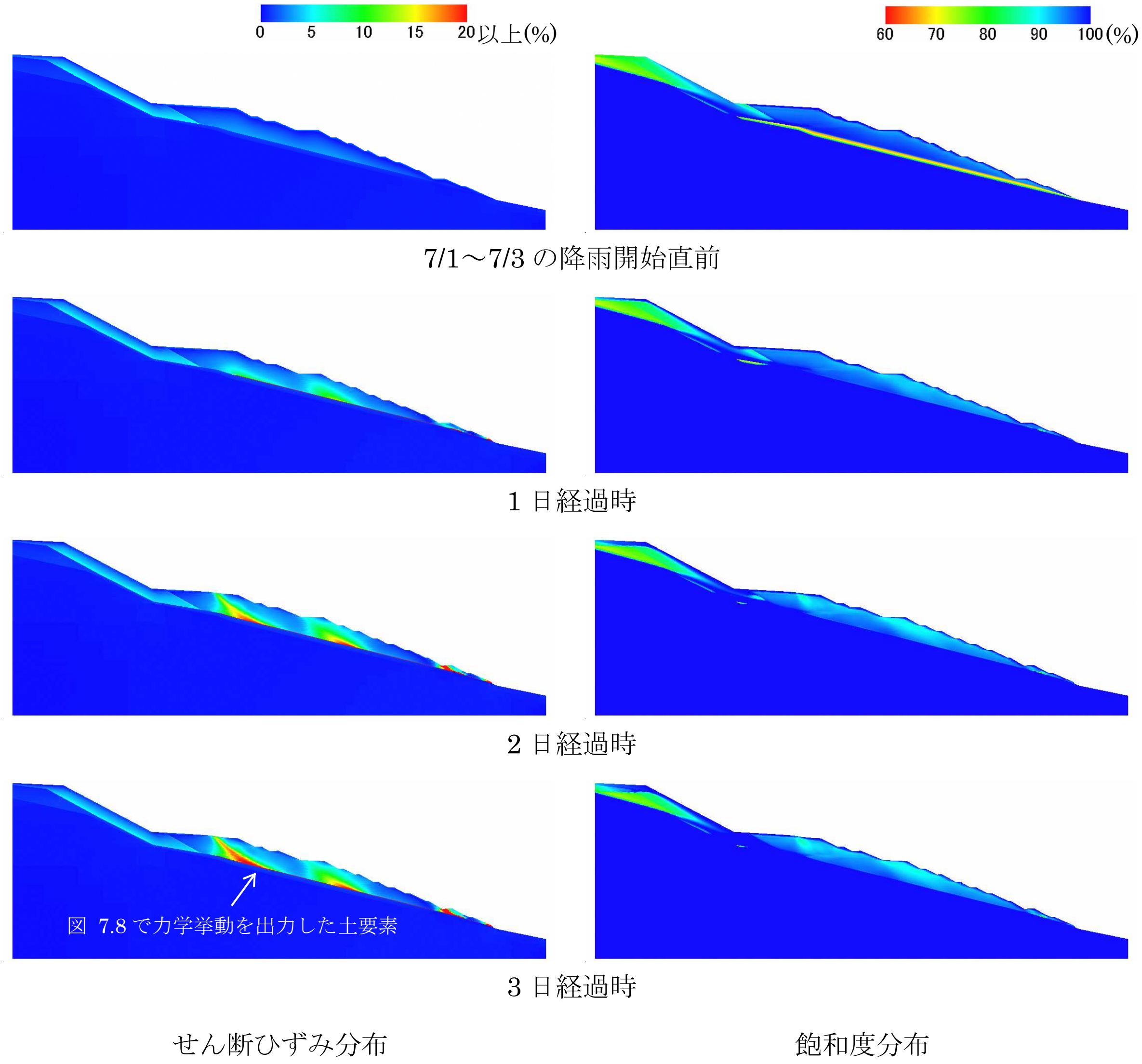


図 7-7　せん断ひずみ分布と飽和度分布の経時変化

図 7-8 は、図 7-7 中に示す、下部盛り土の最下部で渓流堆積物との層境に位置するすべり面上の土要素の力学挙動を示す。

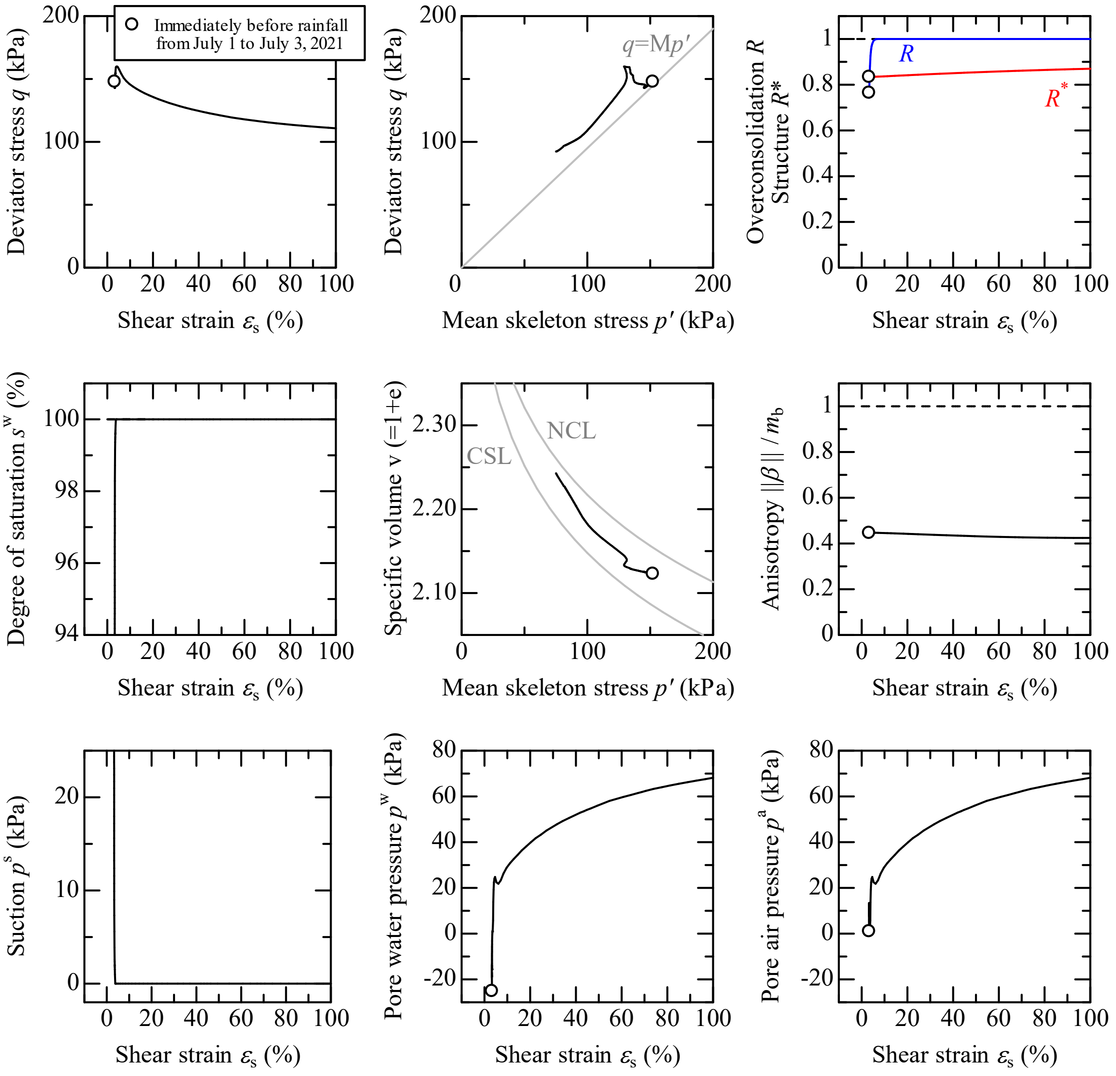


図 7-8　下部盛り土の最下部ですべり面上に位置する土要素の力学挙動

（図 7-7 中に示す渓流堆積物との層境に位置する下部盛り土の土要素の力学挙動）

7.9 考察

図 7-7 のせん断ひずみ分布より、7/1～7/3 の降雨開始直前から時間が経過するに従って、下部盛り土の法尻付近から上方へと順にすべり面が形成され、降雨開始から 3 日経過時には、実際に崩壊した辺りまですべり面が生じている。このとき飽和度分布より、地表面から浸透した降雨による飽和度変化はほぼ生じていない一方で、渓流堆積物下部から供給された地下水により、法尻付近から上方へと順に飽和度が上昇し、下部盛り土の下部に水が供給されている。

次に図 7-8 の下部盛り土の最下部ですべり面上に位置する土要素の力学挙動から、すべり破壊のメカニズムを考察する。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、偏差応力 q～平均有効応力 p'関係より、盛り土施工過程で応力比 q / p' が既に大きい状態にある。その後降雨が開始すると、地下水供給により、間隙水圧 p^w（および間隙空気圧 p^a）の上昇、サクション p^s の低下、飽和度 s^w の上昇が生じている。飽和度 s^w が 100%になってからは、地下水がさらに供給され、間隙水圧の上昇により、平均有効応力 p'の低下と偏差応力 q の低下が生じ、軟化挙動を呈している。このとき、比体積 v が大きく上昇（塑性体積膨張）している。このように、下部盛り土の下部に多量の地下水が供給され、飽和度と間隙水圧の上昇、つまり有効応力の低下が生じて、大きな（塑性）体積膨張を伴う軟化挙動を呈してすべり破壊が生じたことが示唆された。

【考察の解説】

透水性が高い渓流堆積物に大量の地下水が流入し、渓流堆積物内の水圧が上昇すると、その上にある盛り土へも地下水が流入して、特に渓流堆積物との層境に位置する盛り土内で水圧が上昇する。水圧が高くなると土粒子間を結びつける力が弱まり、特に大きなせん断力（滑ろうとする力）が働いている土は、吸水して水圧が上昇すると、容易にドロドロになり、軟らかくなる性質がある。本断面では、高い盛り土が施工されたため、盛り土下部においては、大きなせん断力が働きやすく、かつ透水性の高い渓流堆積物があったため、盛り土下部は水圧が高まりやすい。集水しやすい盛り土下部付近から順に上方へと吸水して水圧が上昇し、軟らかくなり、盛り土荷重に抵抗することができなくなるたびに土塊の滑りが生じて、その結果盛り土全体が崩壊した。

（注）

本解析は、崩壊がどこで始まったか等の崩壊の初期現象を直接示すものではない。しかし、盛り土下端の渓流堆積物及びそれとの層境に位置する盛り土内における水圧の上昇と盛り土の軟化（ドロドロ化）は、他の場所に比べて早期に始まり、かつその程度は高い。それにもかかわらず、盛り土下部にはそれを支える擁壁がない。

よって、崩落は盛り土の下端部から始まり、その後、上部が崩壊したものと推定される。

また、この解析結果では、盛り土の表層の崩壊すべりや、盛り土の浅い層での崩壊、すべりが生じていない。これは、盛り土がもともと飽和度が高く、かつ、透水性が低いため、表層からは降雨が流入しにくい状況にあったという条件で計算しているためである。実現象としても、崩壊前は盛り土は常時水分量が高い状態にあったことが現地で作業した者の話として確認されている。