

第 8 章 発生原因の総括

8.1 各章ごとの総括

(1) 第 1 章 土石流災害の概要

【災害の概要】

- ・ 2021 年 7 月 3 日に逢初川の源頭部の標高 350～400m 付近を起点として発生した土石流は、午前 10 時 30 頃から正午過ぎまで数度にわたり発生し、死者・行方不明者 28 名、全壊家屋 53 戸を含む 136 戸の住宅等被害が生じるなど甚大な災害となった。

【地形及び地質】

- ・ 逢初川源頭部には湯河原火山噴出物等が堆積しており、また北西部には岩戸山(標高 734m)があり、山体崩壊等により下流の鳴沢川付近の広い緩斜面が形成された。逢初川は鳴沢川と比較すると明瞭な V 字谷形状が形成されており、鳴沢川や南側の寺山沢と比較して溪床の標高が低いのが特徴である。

【土石流発生前の気象及び降雨】

- ・ 土石流が発生した 7 月 3 日までの 72 時間の雨量は 461 mm となり、県の熱海雨量観測所では、1985 年の観測開始以降、72 時間雨量としては最大の雨量を記録した。

【災害発生時の状況】

- ・ 逢初川源頭部には 2007 年 4 月に熱海市へ静岡県土採取等規制条例に基づく土の採取等計画届出書が提出され、その後、届出内容とは異なる土砂の搬入、盛り土の造成が行われた。災害前(2020 年 1 月)と災害後(2021 年 7 月)に取得された 3 次元点群地形データに基づく地形差分解析によると、源頭部の崩落土砂量は約 55,000 m³、そのうち約 7,500 m³が途中の砂防堰堤に捕捉され、約 48,000 m³が砂防堰堤下流の市街地方面に氾濫流下したと推定される。

【土砂移動範囲】

- ・ 逢初川は、V 字谷部から住宅街に出て、1.5m 幅の開水路となり、途中から道路と兼用した暗渠構造となっている。土砂は住宅街では最大 100m 程度の幅で氾濫した。暗渠部では上流から流下してきた土砂が道路上を河道のように流れ、東海道新幹線、東海道本線のガードを通過し、国道 135 号の上下部を流れ、海岸の伊豆山港等にまで到達した。

(2) 第 2 章 現地概要

【崩落地内の踏査】

- ・ 2021 年 8 月、10 月、2022 年 5 月、7 月に崩落地内の詳細な現地踏査を行った。
- ・ 崩落地は中央、左岸側及び右岸側の 3 つに分かれ、中央と左岸側では崩落面が急勾配で崩土はほとんど流出しているのに対し、右岸側上部は盛り土が斜面上に残っている。
- ・ 崩落地内の地山は褐色の礫混り砂質シルト等からなる斜面堆積物(Dt)及び変質した溶岩からなる。一方で盛り土は色調等から碎石主体、黒色、褐色の大きく 3 つに分けられる。
- ・ 湧水は左岸側もしくは逢初川の流路沿いに多く見られ、盛り土や崩土と地山の境界から多く湧き出している。一部にはパイピングホールが認められる。2022 年 7 月には、円礫を主体とする堆積物(溪流堆積物)の層から約 30L/分の流量が湧水点 No. 1 で計測された。

- ・ 崩落地内には瓦礫や県外自治体指定の家庭用ゴミ袋のほか、電柱や立木が立ったまま埋められている。
- ・ 盛り土末端付近の溪床洗堀地点にφ20 cmの有孔管が視認されたが、上流部への接続は確認できなかった。現在はパイプからの出水はないが、発災前に排水が機能していたかは不明である。
- ・ 現地踏査時においては、鳴沢川流域から逢初川流域に表流水が大量に流入した明瞭な形跡は見られなかった。

【谷部の土石流流下域の踏査結果】

- ・ 崩落地内の踏査にあわせて、谷部の土石流流下域の踏査を行った。
- ・ 流下痕跡は左岸側と右岸側で高さが異なる。局所的に溪床から20m程度の位置に流下痕跡があるところもある。このような流下痕跡は河道の屈曲による流向変化と慣性力による乗り上げによって生じたと考えられる。
- ・ 映像等から判断すると、第1波は10時28分頃、住宅街の上部に達し、一旦停止した。第1波は粘性度が比較的高いもので流木等も多く混じっていた。10時55分に住宅街に達した土石流（第2波）は、水分量が非常に大きかったように見える。水分量が大きかったと推定されることから、第1波により、一時的な河道内の土砂堆積やそれに伴う水の貯留が形成されていた可能性は否定できないが、一時的な河道内の土砂堆積が形成されていたか否かについて、推定は困難である。

【ドローンによる湧水点調査】

- ・ 崩落地内には、崩落発生直後から多くの湧水点が認められた。多数の雨裂も生じているが、目視だけでは雨裂が湧水によるものか、降雨のみによるものかの判断が難しい。よって、ドローンに搭載した熱画像カメラで湧水及び流水の分布を調査した。
- ・ 湧水点調査の結果、崩落地内には82箇所の湧水点があることが判明し、そのうち約70%にあたる57箇所が逢初川左岸側に分布していた。このことは北側の鳴沢川流域からの地下水が相対的に標高の低い逢初川に流入している可能性を示唆している。

【源頭部の水道管からの漏水の可能性と源頭部水道管の切断時刻】

- ・ 源頭部の市管理水道管は崩落によって切断されている。崩落発生前には七尾調圧槽（源頭部水道管に接続）の水位変化や送水流量に変化がないことから、崩落発生前には源頭部内での漏水はなかったと考えられる。七尾調圧槽の水位は10時53分に急低下していることから、源頭部の水道管付近の崩落は10時53分頃であると推定される。

(3) 第3章 地形・地質の詳細と盛り土履歴

【地形・地質】

- ・ 逢初川の北側の鳴沢川は、岩戸山下流域の緩斜面が侵食されて形成された溪流である。
- ・ 逢初川は、兩岸を高い尾根に挟まれたV字谷であり、鳴沢川や南側の寺山沢よりも20～30m程度溪床の標高が低い。逢初川は、流域面積が狭く、表流水の流入は周囲の谷や川・沢より相対的に少ないにもかかわらず、周囲の谷よりも相対的に深い谷地形である。このことは、逢初川に地下水等が集中しやすく、侵食が進んできたことを示唆する。
- ・ 既往の地質図によると、崩落地周辺にはSy（湯河原火山噴出物等）とSd（山地緩斜面堆

積物) が分布している。Sy は空隙の少ない溶岩や変質作用を受けて一部粘土化した溶岩と火砕岩の互層から成る。Sd は丸みのある大きさの不揃いの礫で、鳴沢川の現河床より標高の高い場所に緩斜面を形成している。

- ・ 木村氏 (深田地質研究所) は、論文において、崩落地周辺の基盤の地質構造が、南から南東方向に 16~25° の角度で傾斜するとしており、この地質構造は逢初川源頭部の流域面積に比べて 6 倍もの広さをもつ鳴沢川流域に加え、さらに岩戸山北側のおよそ標高 580m 以上の流域からの深層地下水が、逢初川源頭部付近に流入する可能性を指摘している。
- ・ また、千木良氏 (深田地質研究所) は、論文において、逢初川上流部には、かつて岩戸山東側斜面から流出した土石流の砂礫や安山岩片 (「乱雑堆積物」と呼ぶ) が層となり堆積していると説明している。乱雑堆積物層は鳴沢川上流から逢初川方向 (南東方向) に向かって低くなっていることが示唆されることから、乱雑堆積物を通して、隣接する鳴沢川の流域から地下水が流入しているものと推定している。

【盛り土履歴調査】

- ・ 過去に撮影された国土地理院の空中写真や静岡県航空レーザ計測データ等により、地形改変履歴を把握した。
- ・ 1967 年と 2021 年の地形データにより崩落範囲を比較すると、左岸側の崩落箇所は 1967 年時点で馬蹄形状の谷地形になっていることから、逢初川上流部の溪流部を埋めた盛り土だけでなく、左岸側の谷地形を埋めた部分が崩落している。
- ・ 谷地形付近の北側の鳴沢川の溪床は、逢初川の溪床より標高が約 30m 高く、逢初川上流部も馬蹄形状の谷地形であることから、逢初川の上流部では盛り土施工前から地山の侵食が生じていた可能性が示唆され、その侵食の原因は元々湧水が多い溪流であったことと推察される。
- ・ 1967 年以降、高木が増え森林化するとともに、作業道と見られる小道が多数設置された。2002~2005 年の空中写真からは、鳴沢川周辺の造成が行われ、鳴沢川の自然流路は埋め立てられた。2009~2012 年の空中写真では逢初川最上流から崩落箇所付近にかけての埋め立てが確認できる。
- ・ 2012 年の空中写真時点で、主な盛り土は完了しているが、盛り土の北側 (左岸側) に雨裂が生じており、盛り土の上を表流水が流れていたことが示唆される。
- ・ 2017 年の空中写真では崩落した私道上部への小規模な盛り土が新たに確認できる。また、盛り土の小段上に湿り (水たまり) が認められる。
- ・ その後 2017~2019 年にかけては、顕著な地形改変・変化は認められない。
- ・ 1967 年データには植生などの影響で相当な誤差はあるものの、1967 年と 2019 年の地形データを比較すると、逢初川・鳴沢川ともに厚いところで 10m を超える盛り土が認められる。

【盛り土の施工関係者へのヒアリング】

- ・ 崩落した盛り土がどのように施工されたかを把握するため、施工関係者のヒアリングを実施した。
- ・ 2009 年 3 月以前は、上部から土砂を谷に落とし込むだけの状態でぐちゃぐちゃであった。
- ・ 盛り土の転圧は重機で踏んだ程度で締固め管理をしていたとは言えない。
- ・ 持ち込まれた土砂の受け入れを拒否したことはなく多様な土砂で盛り土が形成されてい

ると考えられる。

- ・ 持ち込まれた土砂に対して、現場の担当者の感覚で固化材を入れていた。なお固化材はセメント系の「タフロック 3E」を使用した。
- ・ 2012 年には沈砂池はなく、木製の縦排水路も壊れていた。
- ・ 斜面の小段の法尻側には 365 日水が染み出しており、場所によっては水たまりもあった。全体がぐしゃぐしゃであり、排水不良であった。

(4) 第 4 章 土石流流下状況

【流下痕跡の判読】

- ・ 土石流の流下痕跡とその特徴を把握するため、ドローン画像や現地踏査結果から流下痕跡を判読し、溪床からの流下痕跡高を整理した。
- ・ 土石流は地形の影響を受けて流下したことから右岸側、左岸側で異なる流下痕跡が見られた。
- ・ 流下痕跡は下流側に比べて上流側の痕跡高が低くなる逆勾配や水平部が形成されていないことから大きな河道閉塞の痕跡は見られないが、溪床のどこかでの一時的な土砂の堆積と水の貯留、その後の流水による堆積土砂の移動が発生した可能性はある。

【現地撮影映像等からの流下実態把握】

- ・ 消防の通報記録、住民が撮影した動画・静止画、NHK による放送番組などをもとに、土石流の流下状況等を時系列で整理した。
- ・ 8 時 30 分から住宅地最上部の谷出口に濁水が流下していた。
- ・ 10 時 28 分頃、粘性度の高い土石流が「爆発するような勢い」で住宅地最上部の谷出口に到達し、付近の住宅等を流失させた。その後少なくとも 3 回の段波が確認され、10 時 42 分時点では土石流の先頭部は住宅地上部域を通過する市道伊豆山神社線付近で停止している（第 1 波）。
- ・ 10 時 53 分に逢初川源頭部左岸側の崩落が発生し（水道管破断記録より推定）、10 時 55 分に水分量の多い最大規模の土石流（第 2 波）が市道に到達し、多くの人家を破壊した。
- ・ 10 時 59 分、市道付近で再び土石流の流下が確認された（第 3 波）。第 2 波の堆積土砂が再移動したように見える。
- ・ 11 時 15 分、新幹線横過部上流で、瓦礫と土砂が上流から極めてゆっくりと流下している中、それに覆いかぶさるように明瞭な段波が流下し（第 4 波）、次いですぐ後にさらに大規模な段波が流下した（第 5 波）。
- ・ 12 時 10 分、逢初橋に流速 1 m/s 程度のゆっくりとした流れが流下（第 6 波）。この流れは道路下にある河道でなく、道路上を流下してきた。
- ・ 13 時 47 分より後の時刻で、逢初橋付近の人家が後ろからゆっくり押されるように倒壊したことから、第 6 波と同様の高粘性の流れが流下したと考えられる（第 7 波）。

(5) 第 5 章 地質・水文調査

【湧水点観測（図 5-3）】

- ・ 崩落地内の湧水が認められる 7 箇所において、湧水量と EC（電気伝導度）を計測した。

- ・ 湧水点No.1～No.3の湧水量が他と比較して多く、湧水点No.3の湧水量は比較的安定している。特に盛り土と地山の境界である溪流堆積物層からの流出と推定される湧水点No.1では、7月に約30L/分を記録するなど常に湧水が見られ、全湧水点の中で最も多い湧水量が確認できる。
- ・ 崩落地左岸側湧水点No.4の電気伝導度の値が比較的大きいことは、鳴沢川から逢初川まで尾根の岩盤層をゆっくりと通って浸みだす湧水であると考えられ、電気伝導度からも鳴沢川流域から地下水が流入していることが推定される。

【ボーリング調査（図 5-6）】

- ・ ボーリング調査は7箇所で行った。
- ・ 盛り土がほとんど存在しないボーリングNo.1やNo.2では、地表面付近には斜面堆積物である玉石や礫混じりシルト層などが見られ、その下に風化・変質安山岩が確認された。
- ・ 盛り土層の厚さは、ボーリングNo.3では地表から11.95m、No.4では14.40m、No.5では9.35mまで確認され、木片のほかプラスチック片やレンガ片を混入している。
- ・ ボーリング孔で、現場透水試験、地下水検層、流向流速測定を実施した。透水係数は盛り土部では $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-9}$ (m/s)であり、盛り土部以外では $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-9}$ (m/s)、ボーリングNo.3における溪流堆積物層では 1.0×10^{-3} (m/s)程度の透水性の高い地下水層が確認された。

【電気探査（図 5-11）】

- ・ 電気探査は電氣的な性質（比抵抗）から地層の状況を把握する調査であり、地中の水分量が多くなると、比抵抗値は低い値を示す。
- ・ 電気探査の結果からは、逢初川本川を結ぶ測線（測線④）において、降雨の多少にかかわらず低比抵抗部が確認されたことから、逢初川本川には恒常的な地下水の分布が示唆される。
- ・ 鳴沢川と逢初川の境界尾根部の測線（測線①）における低比抵抗部は、測線上のボーリングNo.1及びNo.2の地下水検層で地下水流動層と判断した位置と整合していることから、鳴沢川流域から逢初川流域に向かう地下水の分布と考えられる。

【土質試験（表 5-3）】

- ・ 崩落した盛り土及び地山の土質特性を把握するため、ボーリング孔や崩落していない盛り土部から試料採取し、室内土質試験を実施した。

【災害発生時の降雨規模の評価】

- ・ 水文統計手法に基づき、熱海雨量観測所（県）と相関性が高い網代観測所（気象庁）の84年間の雨量データを用いて災害発生時の降雨確率規模を算出した結果、3日間雨量では20年に1度発生する規模であった。
- ・ 降雨による土砂災害危険度の高まりを把握する指標である「土壌雨量指数」は直列3段タンクモデルにより計算される。2021年7月3日10時頃の指数は、盛り土の造成がほぼ完了したと確認できる2012年12月以降で最大値となり、また流出の遅い地下水を表現しているタンクモデル3段目のタンク値が最も高い値となっていることから、6月28日以降の断続的な降雨により、逢初川や鳴沢川流域から流入した地下水により地中水分量が非常に高まった状態となっていたといえる。

【ボーリング孔で得られた流向・流速】

- ・ 崩落地周辺の地下水がどのように流動しているのかを把握するため、ボーリング孔において流向と流速を計測した。
- ・ 逢初川左岸側尾根上に位置するボーリングNo.1 とNo.2 では、崩落地内の湧水点に相当する深度において、鳴沢川流域から逢初川に向かう地下水の流れが認められた。一方で、盛り土内のボーリング孔では、盛り土内に顕著な流れは認められなかったものの、盛り土底面付近では孔内掘削中に掘削水が全て逸水するほどの極めて透水性の高い層が存在した。
- ・ このことから、崩落した盛り土へは、以下の二つの地下水供給ルートが考えられる。
 - ① 逢初川流域の上部に降った雨が地下浸透し、逢初川流域上部の盛り土前の溪床部や地中の水みち等を通して流下し、湧水するルート（逢初川流域からの地下水流入）
 - ② 鳴沢川流域から、尾根の地中を通して逢初川流域へ流入し、地中の水みち等を通して流下し、湧水するルート（鳴沢川流域からの地下水流入）

【三角堰による流量観測（図 5-36）】

- ・ 崩落地内において、常時流水がある 4 箇所と崩落地外の下流側 2 箇所で三角堰を設け、流量を連続観測した。
- ・ 崩落地内の R-1、R-2、R-3 及び R-4 では、無降雨時にも大きく変動しない連続した流量が確認されたことから、逢初川には常に地下水が供給されていることが示唆される。（基底流量が存在）
- ・ 鳴沢川側から流入する地下水（R-2）は、逢初川上流域から流入する地下水（R-1）と異なり、降雨後数日して流量が増加する現象も見られることから、鳴沢川流域から岩盤層をゆっくりと通って浸みだした地下水の流入する可能性が伺える。
- ・ 逢初川上流域に関する地下水（R-1）については、早い段階で流出の総量が逢初川流域上部の降雨の総量を上回り、上回る総量も多い。このことは、逢初川の地下水は地形上の流域（逢初川流域）よりも広い集水面積を持つことに加え、集水した水を速やかに盛り土内へ流入させるルートがある可能性を示唆している。

(6) 第 6 章 浸透流解析による崩落地への水の流動解析

- ・ 盛り土の崩落原因を解明するためには、数値解析モデルによりその現象を再現することが有効であることから、降雨による逢初川源頭部への地下水及び表流水の流入状況を把握するために、3次元浸透流解析を試みた。
- ・ 解析の結果は、降雨に対し、応答の早い流量についてはある程度の再現性はあるものの、盛り土の崩壊解析において重要となる地下水の流速、流量、流向、地下水位については十分再現性を得ることはできなかった。これは、現地の地形・地質が複雑なことに加え、崩落地内の地下水は水みちのような局所的に透水係数が大きいところを流れる地下水の影響を大きく受けるが、解析モデルがそれを表現できていないこと等によるものと考えられる。
- ・ 水みちのような局所的な高透水部を考慮した上で逢初川源頭部の狭い範囲の地下水の流れを再現するには、多数の現地試験データを必要とするが、現実性は無い。よって、3次元浸透流解析モデルによっては実現象を再現しようとしても、現地の地形・地質が複雑で

あり、逢初川源頭部への水の流入という局所的な現象を浸透流解析によって十分な精度で推定することは困難である。

- このため、本報告においては、水文調査（第5章）により、逢初川源頭部への地下水の流向について定性的に確認できたので、このことをもって成果とし、これ以上の浸透流解析は行わない。

(7) 第7章 盛り土が崩壊に至る挙動の再現解析

- より客観性のある原因推定（究明）を行うため、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、盛り土が崩壊に至る挙動を数値解析により再現（シミュレート）する必要がある。
- 今回の盛り土は複数の場所にあった土が搬入されたと推測されるため、盛り土の場所によって土の性状が異なる。また施工時の締固めが弱く、固化材なども使われた。盛り土の土質定数の推定には実際の施工者から得られた施工方法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。また、崩壊土砂はそのほとんどが性状を変えて流下してしまったため、崩壊前の土を元の状態で採取し土質定数を把握することはできない。
- 盛り土は、締固め度が弱く、間隙が大きい（密度が小さい）状態であったと推定される。このことはボーリングや現場密度測定による地盤調査からも明らかになっている。また、逢初川源頭部は地下水が流入しやすい場所であったことから、盛り土の土中の間隙には常時、水が多く含まれており（飽和度が高かった）、さらに直前の降雨で盛り土内への水の流入が増えたものと推定される。
- 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と変形特性を考慮できる解析手法を用いることが望ましい。高度な解析手法が求められることから、地盤工学会中部支部に数値解析手法の選定について助言を依頼した。委員とも協議した結果、崩壊の再現解析にはGEOASIA（以下、「ジオアジア」という）という解析手法を用いることとした。
- 再現解析による盛り土が崩壊に至る挙動は、以下のとおりである。

7月1日の降雨開始後から時間が経過するに従って、多量の地下水が溪流堆積物を通して盛り土へ供給された。これによって、下部盛り土の法尻付近から盛り土上方へ間隙水圧が上昇した。せん断応力（土と土の結びつきをずらそうとする力）が大きい盛り土底部では、間隙水圧の上昇により、土粒子間を結びつける力が弱まり、順次局所的に土のせん断ひずみ（せん断応力によって発生するひずみ）が大きくなった。この状態でさらに地下水が供給されることで間隙水圧がさらに上昇し、盛り土底部では、土の骨格構造が崩れ、土が水をさらに吸い込み急激に軟らかくなる吸水軟化現象が発生した。盛り土底部の吸水軟化によるせん断変形（土と土の結びつきがずれる動き）をきっかけとして、盛り土内では複数箇所でせん断ひずみが大きくなり、すべり面が形成された。このすべり面付近で部分崩落が発生し、結果として盛り土のほぼ全体が崩落した。
- 解析結果が示す盛り土で発生していた現象は次のとおりである。
 - ① 盛り土は地下水の流入量が多い場所に十分な締め固めがなされていない間隙が大きい

状態で造成された。盛り土の透水係数は比較的小さい。

- ② 盛り土内へは、降雨時の表層からの水の浸透と常時の地下水供給があることと、盛り土の透水係数が小さいことから、盛り土は常時、湿潤度が高い状態だった。
 - ③ 透水性が高い溪流堆積物に大量の地下水が流入し、溪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、特に溪流堆積物との層境に位置する盛り土底部で水圧が上昇する。
 - ④ 水圧が高くなると土粒子間を結びつける力が弱まる。特に大きなせん断応力（土と土の結びつきをずらそうとする力）が働いている状態で、土が吸水し、さらに水圧が上昇すると、土は吸水軟化現象により急激に軟らかくなる。
 - ⑤ 本断面では、盛り土の標高差が大きく造成され、場所によっては大きな盛り土厚（深さ）で施工されたため、盛り土の底部、とりわけ盛り土法尻部においては大きなせん断応力が働いていた。
 - ⑥ 水の多くは盛り土底部から供給され、盛り土下部の法尻付近から順に上方へ盛り土が吸水して盛り土内の水圧が上昇した。
 - ⑦ これにより、盛り土底部の吸水軟化によるせん断変形（土と土の結びつきがずれる動き）をきっかけとして、盛り土内ではせん断ひずみ（せん断応力によって発生するひずみ）が大きくなり、すべり面が形成された。
 - ⑧ この場所は計算上、盛り土内の複数箇所が発生している。このすべり面付近で部分崩落が発生し、結果として盛り土のほぼ全体が崩落した。
- ・ 逢初川源頭部で採取した盛り土材料を用いて吸水軟化試験を実施したところ、数値解析によって得られた有効応力経路と高い類似性があることから、数値解析で予想された吸水軟化現象による盛り土の崩壊メカニズムが室内試験によっても示された。

8.2 土石流発生原因の総括

1 逢初川源頭部の地形の特性

逢初川の源頭部の谷部は、岩戸山の崩壊堆積物が堆積している鳴沢川や南側の寺山沢よりも 20～30m 程度溪床の標高が低い。逢初川は、流域面積が狭く、表流水の流入は周囲の谷より相対的に少ないにもかかわらず、周囲の谷よりも相対的に深い谷地形である。このことは、逢初川源頭部では、隣接する鳴沢川の地下水流入も含め、地下水等が集中しやすく、それらによる侵食が徐々に進んできたことを示唆する。

【説明根拠】

- ・ 逢初川源頭部の北西部には岩戸山（標高 734m）があり、崩壊等により下流の鳴沢川付近の広い緩斜面を形成した。
- ・ 既往の地質図によると、崩落地周辺には Sy（湯河原火山等噴出物等）と Sd（山地緩斜面堆積物）が分布している。Sy は空隙の少ない溶岩や変質作用を受けて一部粘土化した溶岩と火砕岩の互層から成り、Sd は丸みのある大きさの不揃いの礫で鳴沢川の現河床より標高の高い場所に緩斜面を形成している。
- ・ 逢初川は、兩岸を高い尾根に挟まれた V 字谷であり、鳴沢川や南側の寺山沢よりも 20～30m 程度溪床の標高が低い。逢初川は流域面積が狭く、表流水の流入は周囲の谷より相対的に少ないにもかかわらず、周囲の谷よりも相対的に深い谷地形であることは、逢初川に地下水等が集中しやすく、侵食が進んできたことを示唆する。
- ・ 木村氏（深田地質研究所）は、論文において、崩落地周辺の基盤の地質構造が、岩戸山の南から南東方向に 16～25° の角度で傾斜するとしており、この地質構造は逢初川源頭部の流域面積に比べて 6 倍もの広さをもつ鳴沢川流域に加え、岩戸山北側のおよそ標高 580m 以上のエリアからの深層地下水が、逢初川源頭部付近に流入する可能性を指摘している。
- ・ また、千木良氏（深田地質研究所）らは、論文において、逢初川上流部には、かつて岩戸山東側斜面から流出した土石流の砂礫や安山岩片（「乱雑堆積物」と呼ぶ）が層となり堆積している。乱雑堆積物層は鳴沢川上流から逢初川方向（南東方向）に向かって低くなっていることが示唆されることから、乱雑堆積物を通して、隣接する鳴沢川の流域から地下水が流入しているものと推定している。

2 盛り土の造成及び状態

逢初川源頭部の盛り土は、通常の宅地造成等で行われる盛土とは異なり、土が十分に締め固められておらず、緩い状態で土が下部から上部へ積み上げられただけのものだった。盛土の高さ（最下端から最上端までの標高差）が 15m を超えるときは特別の対策が必要となる。しかし、本現場では、標高差 50m 以上にわたり、特別の対策がとられることなく盛り土がされた。

【説明根拠】

- ・ 逢初川源頭部には 2007 年 4 月に熱海市へ「静岡県土採取等規制条例」に基づく土の採取等計画届出書が提出され、その後、届出内容とは異なる内容で、標高差が高く、高さが 15m

を超える盛り土が不適切な工法（排水対策が不十分、盛り土が締め固められていない、十分な土留がないなど）で造成された。

- ・ 1967年データには植生などの影響で相当な誤差はあるものの、1967年と2019年の地形データを比較すると、逢初川・鳴沢川ともに厚さが10mを超える盛り土が確認できる。
- ・ 2002～2005年の空中写真からは、鳴沢川周辺の造成が行われ、鳴沢川の自然流路は埋め立てられた。2009～2012年の空中写真では逢初川最上流から崩落箇所付近にかけての埋め立てが確認できる。
- ・ 2012年の空中写真時点で、主な盛り土は完了しているが、2017年の空中写真では崩落した私道上部への小規模な盛り土が新たに確認できる。その後2017～2019年にかけては、顕著な地形改変・変化は確認できない。
- ・ 崩落地内の地山は褐色の礫混り砂質シルト等からなる斜面堆積物（Dt）及び変質した溶岩からなる。一方で盛り土は左岸側崩落地では色調等から碎石主体、黒色、褐色の大きく3つに分けられる。
- ・ 崩落地内には瓦礫や県外自治体指定の家庭用ゴミ袋のほか、電柱や立木が立ったまま埋められている。
- ・ ボーリングの結果から、盛り土層の厚さは、ボーリングNo.3では地表から11.95m、No.4では14.40m、No.5では9.35mまで確認され、木片のほかプラスチック片やレンガ片を混入している。

【以下は盛り土施工関係者へのヒアリング】

- ・ 2009年3月以前は、上部から土砂を谷に落とし込むだけの状態でぐちゃぐちゃであった。
- ・ 盛り土の転圧は重機で踏んだ程度で締め固め管理をしていたとは言えない。
- ・ 持ち込まれた土砂の受け入れを拒否したことはなく多様な土砂で盛り土が形成されていると考えられる。
- ・ 持ち込まれた土砂に対して、現場の担当者の感覚で固化材を入れていた。なお固化材はセメント系の「タフロック3E」を使用した。
- ・ 2012年には沈砂池はなく、木製の縦排水路も壊れていた。
- ・ 斜面の小段の法尻側には365日水が染み出しており、場所によっては水たまりもあった。全体がぐしゃぐしゃであり、排水不良であった。

3 降雨の状況

2021年6月30日の降り始めから盛り土崩落直前（7月3日午前10時）までの降雨量は461mmであった。72時間雨量は盛り土造成後で最大で、20年に1度発生する程度の雨であった。また、土壌雨量指数（降った雨による土砂災害危険度の高まりを把握する指標で、直列3段タンクモデルで計算）についても、盛り土造成後以降で最大を確認し、特に深い地下水を表現する3段目のタンク値が最も高い値であることが分かった。

【説明根拠】

- ・ 2021年6月30日の降り始めから盛り土崩落直前（7月3日午前10時）までの降雨量は461mmであった。72時間雨量は盛り土造成後で最大で、20年に1度は発生する程度の雨で

あった。

- ・ 降った雨による土砂災害危険度の高まりを把握する指標である「土壌雨量指数」を直列3段タンクモデルにより計算した。災害発生時の指数は、盛り土の造成がほぼ完了したと確認できる2012年12月以降で最大値となり、また地下水を表現しているタンクモデル3段目のタンク値が最も高い値となっていることから、6月28日以降の断続的な降雨により、逢初川や鳴沢川流域から流入した地下水により地中水分量が非常に高まった状態となっていたといえる。

4 土石流の状況

土石流は10時28分頃に谷出口で目撃された第1波から複数回発生した。流下した土砂は住宅を流失させるとともに、道路上を河道として流れ、東海道新幹線、東海道本線のガード下を通過し、国道135号の上下部を流れ、伊豆山港等の海岸まで到達した。

【説明根拠】

- ・ 災害前（2020年1月）と災害後（2021年7月）に取得された3次元点群地形データに基づく地形差分解析によると、源頭部の崩落土砂量は約55,500 m³、そのうち約7,500 m³が途中の砂防堰堤に捕捉され、約48,000 m³が砂防堰堤下流の市街地方面に氾濫流下したと推定される。
- ・ 逢初川は、途中から道路と兼用した暗渠構造となっているが、暗渠部では上流から流下してきた土砂が道路上を河道のように流れ、東海道新幹線、東海道本線のガードを通過し、国道135号の上下部を流れ、海岸の伊豆山港等にまで到達した。
- ・ 流下痕跡は左岸側と右岸側で高さが異なる。高いところでは局所的に溪床から20m程度の位置に流下痕跡があるが、河道の屈曲による流向変化と慣性力による乗り上げと考えられる。
- ・ 流下痕跡は下流側に比べて上流側が低くなる逆勾配や水平部が形成されていないことから大きな河道閉塞の痕跡は見られないが、河床のどこかでの一時的な土砂の堆積と水の貯留、その後の流水による堆積土砂の崩落が発生した可能性はある。
- ・ 映像から判断すると、第1波は10時28分頃、住宅街の上部に達し、一旦停止した。10時55分に住宅街に達した土石流（第2波）は、水分量が非常に大きかったように見える。水分量が大きかったことから、第1波により、一時的な河道内の土砂堆積やそれに伴う水の貯留が形成されていた可能性は否定できないが、一時的な河道内の土砂堆積が形成されていたか否かについて、推定は困難である。

【現地撮影映像等からの流下実態把握】

- ・ 8時30分から住宅地上部の谷出口に濁水が流下していた。
- ・ 10時28分頃、粘性度の高い土石流が「爆発するような勢い」で谷出口に到達し、住宅等を流失させた。その後少なくとも3回の段波が確認され、10時42分時点では土石流の先頭部は市道付近で停止している（第1波）。
- ・ 10時53分に逢初川左岸側崩落が発生し（水道管破断記録より推定）、10時55分に最大規模の段波（第2波）が市道に到達し、多くの人家を破壊した。

- ・ 10時59分、市道付近で再び土石流の流下が確認された（第3波）。第2波の堆積土砂が再移動したように見える。
- ・ 11時15分、新幹線横過部上流で、瓦礫と土砂が上流から極めてゆっくりと押し出された後、それに覆いかぶさるように明瞭な段波が流下し（第4波）、次いですぐ後にさらに大規模な段波が流下した（第5波）。
- ・ 12時10分、国道135号逢初橋に流速1m/s程度のゆっくりとした流れが流下（第6波）。この流れは道路下にある河道でなく、道路上を流下してきた。
- ・ 13時47分より後の時刻で、逢初橋付近の人家が後ろからゆっくり押されるように倒壊したことから、第6波と同様の高粘性の流れが流下したと考えられる（第7波）。

5 盛り土崩落現象の推定

5-1 盛り土への水の流入状況

熱画像カメラによる湧水点調査で80地点以上の湧水点が崩落地内で確認されたことに加え、鳴沢川と逢初川の尾根部のボーリングNo.1とNo.2で鳴沢川流域から逢初川に向かう地下水の流れが確認できたことや盛り土内のボーリングNo.3で高透水層の溪流堆積物が確認されたことから、逢初川へは逢初川流域に加えて鳴沢川流域からの地下水の流入があった。

【説明根拠】

- ・ 湧水点調査の結果、崩落地内には82箇所の湧水点があることが判明し、そのうち約70%にあたる57箇所が逢初川左岸側に分布しており、このことは北側の鳴沢川流域からの地下水が相対的に標高の低い逢初川に流入している可能性を示唆している。
- ・ 崩落地内の湧水量は年間を通じて枯れることはなく、盛り土と地山の境界である溪流堆積物層からの流出と推定される逢初川本川の湧水点では、2022年7月に約30L/分を記録するなど全湧水点で最も多い湧水量が確認できる。
- ・ 崩落地左岸側湧水点における電気伝導度の値が比較的大きいことは、鳴沢川から逢初川まで尾根の岩盤層をゆっくりと通って浸みだした湧水であると考えられ、電気伝導度からも鳴沢川流域から地下水が流入していると推定される。
- ・ 電気探査の結果からは、逢初川本川を結ぶ測線において、降雨の多少にかかわらず低比抵抗部が確認されたことから、逢初川本川には恒常的な地下水の分布が示唆される。
- ・ 鳴沢川と逢初川の境界尾根部の測線における低比抵抗部は、測線上のボーリングNo.1及びNo.2の地下水検層で地下水流動層と判断した位置と整合していることから、鳴沢川流域から逢初川流域に向かう地下水の分布と考えられる。
- ・ 逢初川左岸側尾根上に位置するボーリングNo.1とNo.2では、崩落地内の湧水点に相当する深度において、鳴沢川流域から逢初川に向かう地下水の流れが認められた。一方で、盛り土内のボーリング孔では、盛り土内に顕著な流れは認められなかったものの、盛り土底面付近では孔内掘削中に掘削水が全て逸水するほどの極めて透水性の高い層が存在したことから、崩落した盛り土へは、以下の二つの地下水供給ルートが考えられる。
 - ① 逢初川流域の上部に降った雨が地下浸透し、逢初川流域上部の盛り土前の溪床部や地

中の水みち等を通して流下し、湧水するルート（逢初川流域からの地下水流入）

② 鳴沢川流域から、尾根の地中を通して①よりも時間をかけて逢初川流域へ流入し、湧水するルート（鳴沢川流域からの地下水流入）

- ・ 崩落地内の流量観測では、無降雨時にも大きく変動しない連続した流量が確認されたことから、逢初川には常に地下水が供給されていることが示唆される。（基底流量が存在）
- ・ 鳴沢川側から流入する地下水は、逢初川本川から流入する地下水と異なり、降雨後数日して流量が増加する現象も見られることから、鳴沢川流域からの地下水が流入している可能性がある。
- ・ 逢初川本川の地下水は、早い段階で流出の総量が逢初川流域上部の降雨の総量を上回り、上回る総量も多いことから、逢初川本川の地下水は地形上の流域よりも広い集水面積を持つことに加え、集水した水を速やかに盛り土内へ流入させるルートがある可能性が示唆される。

5-2 盛り土が崩壊に至る挙動の再現解析

地下水が流入しやすい場所に締め固め度が弱く間隙が大きい状態で造成された盛り土が水の流入により崩壊に至る挙動を数値解析により再現するため、飽和度や応力の違いによる土の強度変化と変形特性を考慮できる解析手法であるジオアジアを用いて崩壊の再現解析を行った。

再現解析による盛り土が崩壊に至る挙動は、以下のとおりである。

7月1日の降雨開始後から時間が経過するに従って、多量の地下水が溪流堆積物を通して盛り土へ供給された。これによって、下部盛り土の法尻付近から盛り土上方へ間隙水圧が上昇した。せん断応力（土と土の結びつきをずらそうとする力）が大きい盛り土底部では、間隙水圧の上昇により、土粒子間を結びつける力が弱まり、順次局所的に土のせん断ひずみ（せん断応力によって発生するひずみ）が大きくなった。この状態でさらに地下水が供給されることで間隙水圧がさらに上昇し、盛り土底部では、土の骨格構造が崩れ、土が水をさらに吸い込み急激に軟らかくなる吸水軟化現象が発生した。盛り土底部の吸水軟化によるせん断変形（土と土の結びつきがずれる動き）をきっかけとして、盛り土内では複数箇所でせん断ひずみが大きくなり、すべり面が形成された。このすべり面付近で部分崩落が発生し、結果として盛り土のほぼ全体が崩落した。

盛り土材料を使用した室内土質試験によって、再現解析で示された間隙水圧とせん断応力の増大によって土が吸水軟化に至る挙動が視覚的にもわかる形で裏付けられた。

【説明根拠】

- ・ 盛り土は、締め固め度が弱く、間隙が大きい（密度が小さい）状態であったと推定される。このことはボーリングや現場密度測定による地盤調査からも明らかになっている。また、逢初川源頭部は地下水が流入しやすい場所であったことから、盛り土の土中の間隙には常時、水が多く含まれており（飽和度が高かった）、さらに直前の降雨で盛り土内への水の流入が増えたものと推定される。
- ・ 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と変形特性を考慮できる解析手法を用いることが望ましい。高度な解析手法が求められることから、地盤工学会中部支部に数値解析手法の選定について助言を依頼した。委員とも協議した結果、崩壊の再現解析には GEOASIA（以下、「ジオアジア」という）という解析手法を用いることとした。

- 再現解析による盛り土が崩壊に至る挙動は、以下のとおりである。

7月1日の降雨開始後から時間が経過するに従って、多量の地下水が溪流堆積物を通して盛り土へ供給された。これによって、下部盛り土の法尻付近から盛り土上方へ間隙水圧が上昇した。せん断応力（土と土の結びつきをずらそうとする力）が大きい盛り土底部では、間隙水圧の上昇により、土粒子間を結びつける力が弱まり、順次局所的に土のせん断ひずみ（せん断応力によって発生するひずみ）が大きくなった。この状態でさらに地下水が供給されることで間隙水圧がさらに上昇し、盛り土底部では、土の骨格構造が崩れ、土が水をさらに吸い込み急激に軟らかくなる吸水軟化現象が発生した。盛り土底部の吸水軟化によるせん断変形（土と土の結びつきがずれる動き）をきっかけとして、盛り土内では複数箇所でせん断ひずみが大きくなり、すべり面が形成された。このすべり面付近で部分崩落が発生し、結果として盛り土のほぼ全体が崩落した。
- 解析結果が示す盛り土で発生していた現象は次のとおりである。
 - ① 盛り土は地下水の流入量が多い場所に十分な締め固めがなされていない間隙が大きい状態で造成された。盛り土の透水係数は比較的小さい。
 - ② 盛り土内へは、降雨時の表層からの水の浸透と常時の地下水供給があることと、盛り土の透水係数が小さいことから、盛り土は常時、湿潤度が高い状態だった。
 - ③ 透水性が高い溪流堆積物に大量の地下水が流入し、溪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、特に溪流堆積物との層境に位置する盛り土底部で水圧が上昇する。
 - ④ 水圧が高くなると土粒子間を結びつける力が弱まる。特に大きなせん断応力（土と土の結びつきをずらそうとする力）が働いている状態で、土が吸水し、さらに水圧が上昇すると、土は吸水軟化現象により急激に軟らかくなる。
 - ⑤ 本断面では、盛り土の標高差が大きく造成され、場所によっては大きな盛り土厚（深さ）で施工されたため、盛り土の底部、とりわけ盛り土法尻部においては大きなせん断応力が働いていた。
 - ⑥ 水の多くは盛り土底部から供給され、盛り土下部の法尻付近から順に上方へ盛り土が吸水して盛り土内の水圧が上昇した。
 - ⑦ これにより、盛り土底部の吸水軟化によるせん断変形（土と土の結びつきがずれる動き）をきっかけとして、盛り土内ではせん断ひずみ（せん断応力によって発生するひずみ）が大きくなり、すべり面が形成された。
 - ⑧ この場所は計算上、盛り土内の複数箇所が発生している。このすべり面付近で部分崩落が発生し、結果として盛り土のほぼ全体が崩落した。
- 逢初川源頭部で採取した盛り土材料を用いて吸水軟化試験を実施したところ、数値解析によって得られた有効応力経路と高い類似性があることから、数値解析で予想された吸水軟化現象による盛り土の崩壊メカニズムが室内試験によっても示された。

6 まとめ

- ・逢初川源頭部は、周囲の地形・地質条件から、鳴沢川流域を含む周辺から地下水が流入しやすい場所だった。このため、源頭部は雨が降らなくとも水の流れ（基底流量）があった。かつ、溪床に非常に水を通しやすい溪流堆積物の層があった。
- ・その上に、県土採取等規制条例の届出内容とは異なる内容で、標高差が高く、高さが15mを超える盛り土が不適切な工法（排水対策が不十分、盛り土が締め固められていない、十分な土留がないなど）で造成された。
- ・盛り土へは、常時の地下水供給があり、盛り土の土の透水係数が小さいことから、盛り土は常に湿潤度（飽和度）が高い（土中の間隙の多くが水で満たされている）状態だった。
- ・盛り土造成後から2021年6月29日までの間、時間雨量63mmの降雨や2日間雨量292mm等の雨があったが、盛り土は崩落しなかった。
- ・2021年6月30日の降り始めから盛り土崩落直前（7月3日午前10時）までの降雨量は461mmであった。72時間雨量は盛り土造成後で最大で、20年に1度は発生する程度の雨であった。
- ・崩落発生時には、逢初川流域及び鳴沢川流域からの地下水の基底流量に加えて、6月30日からの大雨が上流域を含む広域で地下浸透した結果、逢初川の地中部を通して比較的早く盛り土底面に湧出する地下水と、鳴沢川の地下水がやや時間が経ってから盛り土底面に湧出してくる地下水の両方が増加したことにより、盛り土底面への地下水の供給量が増えた。
- ・これらのことを考慮して盛り土が崩壊に至る挙動の再現解析を行った。
- ・解析方法は、不飽和土の強度変化と変形特性を考慮できる解析手法であるジオアジアを用いた。
- ・再現解析による盛り土が崩壊に至る挙動は、以下のとおりである。

7月1日の降雨開始後から時間が経過するに従って、多量の地下水が溪流堆積物を通して盛り土へ供給された。これによって、下部盛り土の法尻付近から盛り土上方へ間隙水圧が上昇した。せん断応力（土と土の結びつきをずらそうとする力）が大きい盛り土底部では、間隙水圧の上昇により、土粒子間を結びつける力が弱まり、順次局所的に土のせん断ひずみ（せん断応力によって発生するひずみ）が大きくなった。この状態でさらに地下水が供給されることで間隙水圧がさらに上昇し、盛り土底部では、土の骨格構造が崩れ、土が水をさらに吸い込み急激に軟らかくなる吸水軟化現象が発生した。盛り土底部の吸水軟化によるせん断変形（土と土の結びつきがずれる動き）をきっかけとして、盛り土内では複数箇所でせん断ひずみが大きくなり、すべり面が形成された。このすべり面付近で部分崩落が発生し、結果として盛り土のほぼ全体が崩落した。
- ・盛り土材料を使用した室内土質試験によって、再現解析で示された間隙水圧とせん断応力の増大によって土が吸水軟化に至る挙動が視覚的にもわかる形で裏付けられた。