

(4) 水文調査及び地表地質踏査

① 現地調査

2022(R4)年11月10日に崩壊状況の確認、地形及び地質調査を、また、2022(R4)年12月1日に水文調査、地形及び地質調査を行った。

② 降雨状況

降り始めの2022(R4)年9月15日0時から9月19日1時の5日間で累加雨量が950mmを超える記録的な降雨が観測された。(図 3.2-3)

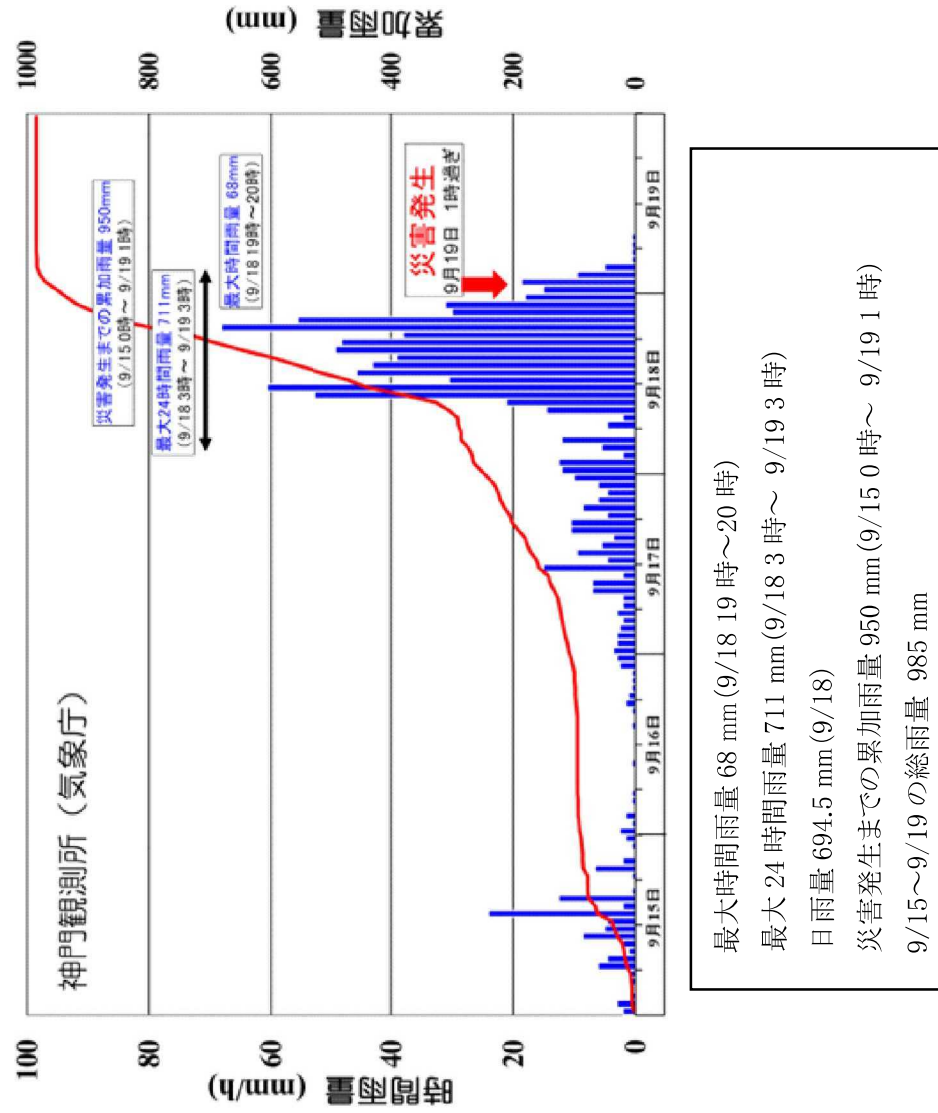


図 3.2-3 降雨状況 (神門観測所)

③ 地形及び地質

当地区は、緩傾斜の地形が一带に広がっており、地質は、主に砂岩泥岩互層が分布し、顕著に破碎された地質が見受けられる。

崩壊した残土処理場の左岸側は、地下水の影響により強風化した褐色を帯びた泥岩の地層が確認された。(図 3.2-4)

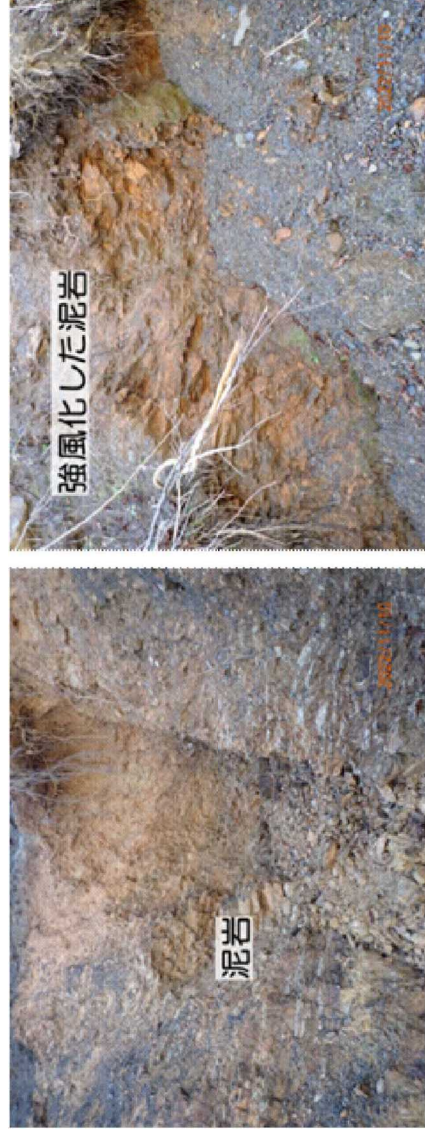


図 3.2-4 残土処理場の崩壊により左岸に現れた地層

④ 崩壊状況

集水面積 0.04km^2 の溪流内の残土処理場の盛土斜面の一部が崩壊し、下端の土羽止擁壁は転倒していた。また、崩壊した土塊は下流へ移動し、さらに下流に設置された谷止工を破壊し、最下流の農地に氾濫していた。

崩壊の原因については、上流からの溪流水が残土処理場表面を侵食した痕跡も、右岸側及び左岸側斜面からの表面水による天端侵食の痕跡も確認されなかったことから、残土処理場は溪流水や表面水による侵食で崩壊したものではないことが分かった。

なお、崩壊した残土処理場の天端には、溪流方向に直角の縦亀裂が発生していたが、今後の降雨による侵食や拡大崩壊を防止するためのブルーシートが被覆されており、二次災害防止対策が施されていた。

⑤ 溪流の流量測定等

⑤-1 水文調査方法

無降雨が継続している条件の中、溪床に基岩が露出している箇所等、溪流水が伏流していない箇所において、流量を計測した。計測方法の概要を図 3.2-5 に示し、当地区における計測状況を図 3.2-6 に示した。



図 3.2-5 渓流水の流量、電気伝導度等の測定方法



図 3.2-6 渓流水の流量、電気伝導度等の測定状況

渓流水の流量測定は、渓流の横断測量から求めた流積 (m^3) と流速計で求めた平均流速 (m/s) を乗じて流量 (m^3/s) を求め、さらに、測定地点における流域面積 (km^2) で流量を除いて比流量 ($m^3/s/km^2$) を算出した。比流量が大きい流域は、地形的流域界より広い水文的流域界に規制された隣接流域からの地下水を集めている可能性がある。

流量測定箇所において、ポータブル電気伝導率計及び pH 計を用いて渓流水の電気伝導率 (EC)、pH、水温を測定し、また、シリカ (SiO_2) 濃度を測定するための採水を行った。電気伝導率 (EC) は、渓流水中の溶存イオンの総量であり、地下水が流動する過程で岩石から溶出するイオンを取り込むことから、多量の地下水が流出している流域は、渓流水の電気伝導率 (EC) が高くなる。

渓流水の電気伝導率 (EC) は、人家、農地、畜産施設等の排水の影響を受けて高い値を示すことがあり、渓流水が人為的な影響を受けている可能性のある箇所では、シリカ (SiO_2) 濃度を活用して影響の有無を判断するの一つの方法である。シリカ (SiO_2) 濃度は地下水が岩石と接触して起こる化学反応によって溶出することから、多量の地下水が流出している渓流水は電気伝導率 (EC) と同様に高くなる傾向がある。シリカ (SiO_2) 濃度の測定は、電気伝導率 (EC) 測定に比べて手順が煩雑であるが、シリカ (SiO_2) は、殆どが鉱物由来であるため、人為的な影響を受けにくいという長所があることから、判定に利用できる。

⑤-2 水文調査結果

第1回目の現地調査時に、地下水が集中したことが残土処理場の崩壊原因であるという仮説を立て、その仮説の検証のため、水文調査を行った。

地下水が集中したことを検証する簡易な方法として、今回、渓流水が伏流していない箇所で図 3.2-6 の流量測定を行い、測定した流量を流域面積で除いて比流量を求めた。この比流量が大きければ、地表の集水区域を越えて、広範囲から地下水が集まってきたことが分かる。

表 3.2-2 は、水文調査結果をまとめたものであり、図 3.2-7 は、調査測点の位置と比流量を CS 立体図に表示したものである。

表 3.2-2 水文調査結果

測点番号	測定年月日時分	緯度	経度	標高 m	流量 l/s	EC ms/cm	pH	水温 ℃	気温 ℃	SiO_2 濃度 mg/l	地形的 流域面積 km ²	比流量 l/s/km ²	比流量 m ³ /s/km ²	備考
1	202212011112	32.40497248	131.33039350	325	0.12	14.7	6.3	11.2	14.1	14	0.015	8	0.008	頁岩の岩盤上で流量測定、伏流なし
2	202212011021	32.40412687	131.32858120	290	0.31	32.4	6.1	14.2	13.3	15	0.040	8	0.008	堆積物上で流量測定、伏流の可能性が有り
3	202212011024	32.40382947	131.32828970	285	-	8.3	6.5	10.7	13.5	-	-	-	-	左室川、流量測点でまず
4	202212011002	32.40414234	131.32762150	279	1.19	23.7	6.1	12.0	12.5	12	0.075	16	0.016	粘土化した古い堆積物上で流量測定、伏流なし
5	202212010943	32.40422096	131.32654330	268	0.64	20.9	5.5	11.1	12.5	11	0.088	7	0.007	堆積物上で流量測定、伏流の可能性が有り

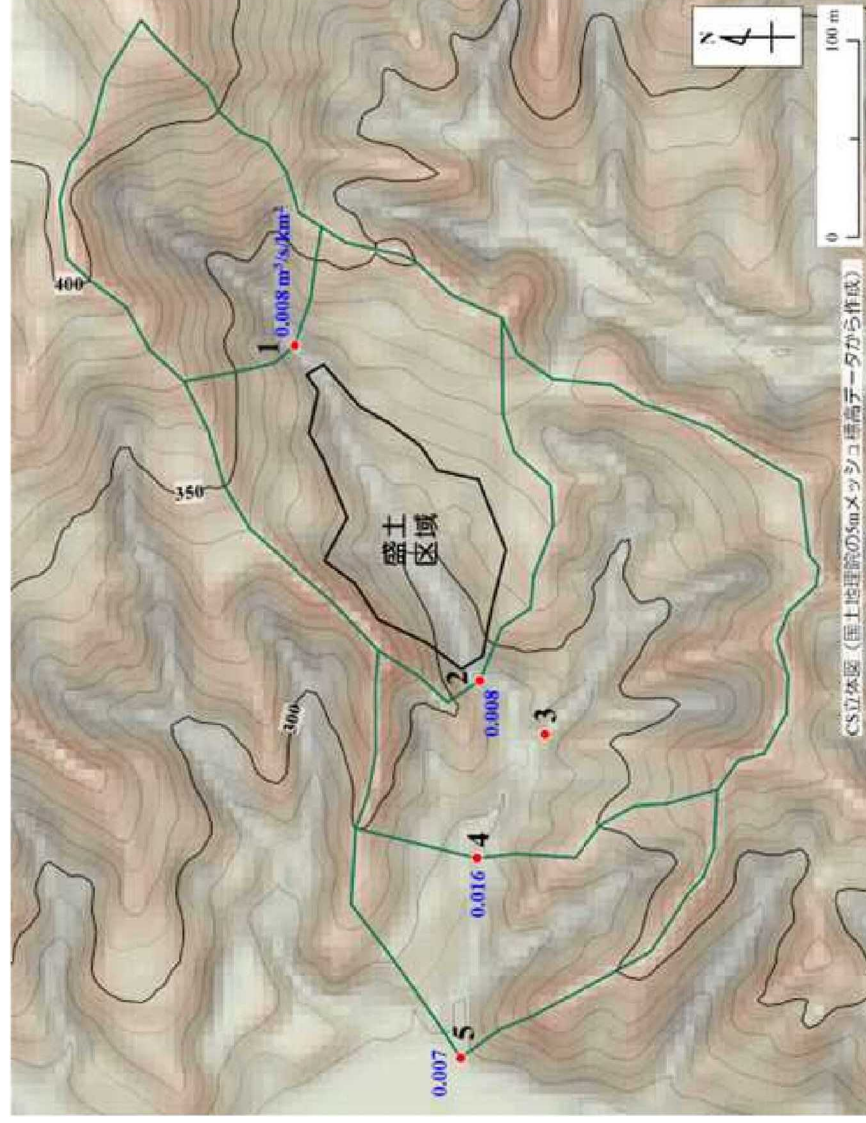


図 3.2-7 溪流の比流量の分布 (図中の1～5は表 3.2-2の測点番号に対応)

溪流水の電気伝導率(EC)が高い値を示しているのは、本流域周辺に人家、農地、果樹園等が分布しており、その排水の影響を受けていると考えられる。このことは、鉱物由来で人為的な影響を受けにくいシリカ(SiO₂)濃度が一般的な値を示していることから判断され、pH値も標準的な値を示している。

測点1と測点4における溪流水は、伏流していない箇所でも流量測定ができたが、それ以外は伏流している可能性がある。測点4の比流量は、上流の測点1より非常に大きいことから、本流域の中流域において、地形的流域界より広い水文的流域界に規制された隣接流域からの地下水が流入している可能性がある。崩壊した残土処理場の左岸側に地下水の影響を受けて強風化した褐色の泥岩が確認されており(図3.2-4)、このことも中流域に地下水が集中していることを示している。

(5) 土質試験

土質試験は、現場密度試験を行った位置で、土質試料を3箇所採取し、土質試験、粒度試験、透水試験及び三軸圧縮試験を行った。(表 3.2-3)

残土処理場の盛土の工学的な材料としての分類は、日本統一土質分類によると、盛土材は「細粒分質砂質礫」に分類され、これは、一般的な盛土材料としては、良質な材料に分類され、締固めも良くできる材料である。一般的に道路土工に使うには良い材料に分類される。

この現場において、特に、留意すべき事項は、盛土の締固め度である。現場密度試験は、中央の測線に沿って、3箇所の地点において行っており、平均値である 87.0%は、最も密な状態になったものを基準として、その締固まり具合の指標である。今回の試験では、最大で 90.5%、最小値で 82.9%で、この結果からも北又江の原地区の盛土の締固め度の状態としては、締まっていたという評価ができる。

透水試験より、透水係数が $1.23 \times 10^{-5} \text{m/s}$ という結果が出ており、これは、砂や礫の透水係数に該当し、土質分類と整合する結果であった。透水性の評価としては、礫或いは砂の細粒分よりも透水性は良いが、きれいな礫よりは透水性は低いという透水性である。

強度定数としては、粘着力(c')=0.9 kN/m²、内部摩擦角(ϕ')=28.4°であった。この残土の締まり具合を把握する必要があり、今回、現場密度試験により、その締固め度を確認した結果、平均値で 87.0%という値であった。

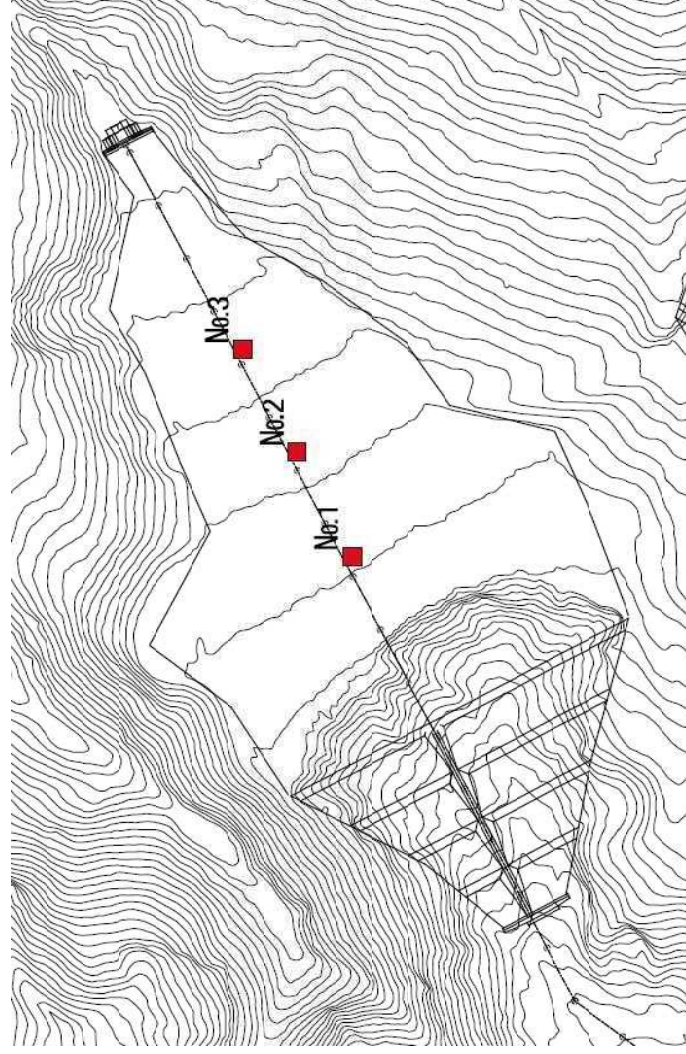


図 3.2-8 現場密度試験の実施位置



土質試験料採取状況



土質試験採取箇所(接写)

表 3.2-3 盛土材の土質試験結果

区分	試験結果
土質分類	細粒分質砂質礫 (GFS) 盛土材料としては良質
透水性	$1.23 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
強度定数	$c' = 0.9 \text{ kN/m}^2$
	$\phi' = 28.4^\circ$
盛土の状態 (締固め度)	$D_c = 87.0\%$ (平均値) 最大値90.5%、最小値82.9% <参考> 管理値：90%以上、下限値：80%

3.3 発生原因の考察

以上の各調査結果を踏まえ、崩壊の発生原因について考察した。

(1) 崩壊の発生メカニズム

溪流の水文調査結果から、残土処理場の上流の測点1と残土処理場の下流の測点4の値を見ると、比流量が約2倍になっており、この溪流の中流域や、盛土をしている付近には地形的流域界を超えて地下水が集中する地下構造を形成していることが同えた。

この地下構造により、広範囲からの地下水が盛土の下に集まり、地下水位が上昇して盛土を崩壊させ、崩壊した土砂が流下し下方の谷止工を破壊したのと思われる。また、雨量との相関関係(図 3.2-3)を見てみると、降雨のピーク時と崩壊発生時間にズレが生じていることも伺うことができた。

よって、崩壊発生メカニズムとしては、今回の豪雨で、地下構造に規制された広範囲からの地下水が盛土箇所に集中し、その盛土内で地下水位が上昇して、残土処理場の下流側の一部が崩壊し盛土下端の土羽止擁壁を転倒させた。その後、崩壊土塊は下流へ移動して直下のコンクリート治山ダムをも破壊し、下流の農地等に氾濫、堆積したものと考えられる。(図 3.3-1)

また、今回の盛土崩壊が降雨の後半で発生したのは、流動に一定の時間を要する地下水が関与したためと考えられる。

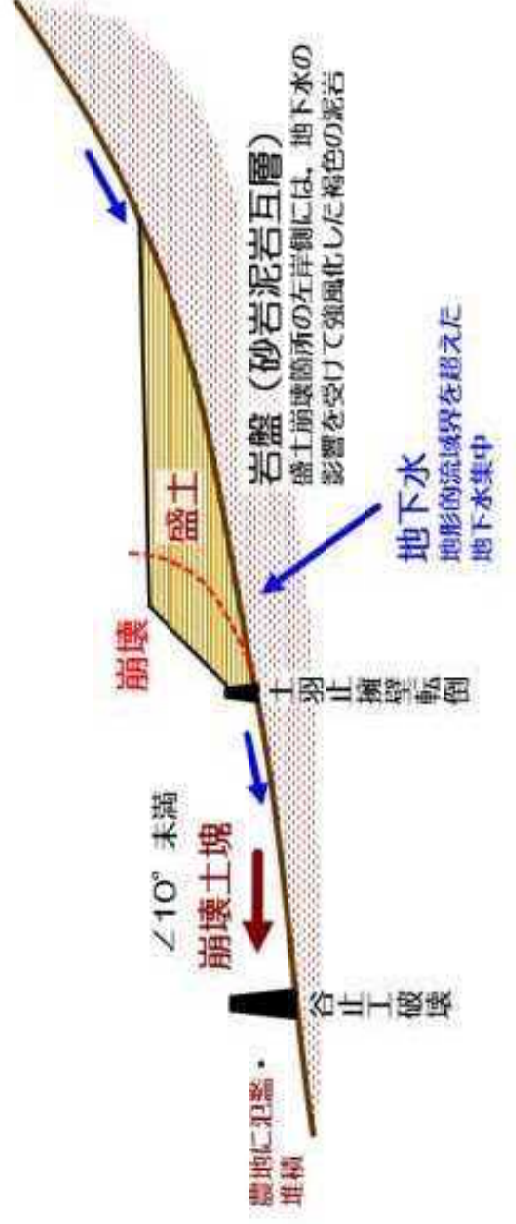


図 3.3-1 崩壊発生メカニズムの模式図

(2) 安定解析による検証

安定解析として、雨が盛土の中に入ってきた時の安定性について、ここでは、残土処理場の中央断面を参考に作成した解析モデルを用いて評価を行った。4段の盛土で各小段に水平方向のドレーンが入り、地山と盛土の間には栗石暗渠を入れて排水を行うこととした。この盛土に雨を降らし、降った雨が全て盛土の中に入っていくという厳しい条件で計算を行った。なお、解析に用いた雨量は南郷神門で観測された雨量データを入力した(図 3.3-2)。委員会において、盛土が崩壊する地下水位の上限はどのようになるかという意見もあり、今回、そのことについても検討を行った。崩壊すべり面を、実際に崩壊したすべり面の位置に揃えて、そこで崩壊するという仮定の下で計算を行い、地下水を上昇させて安全率が1を下回る箇所は何段目かという検討を行った。

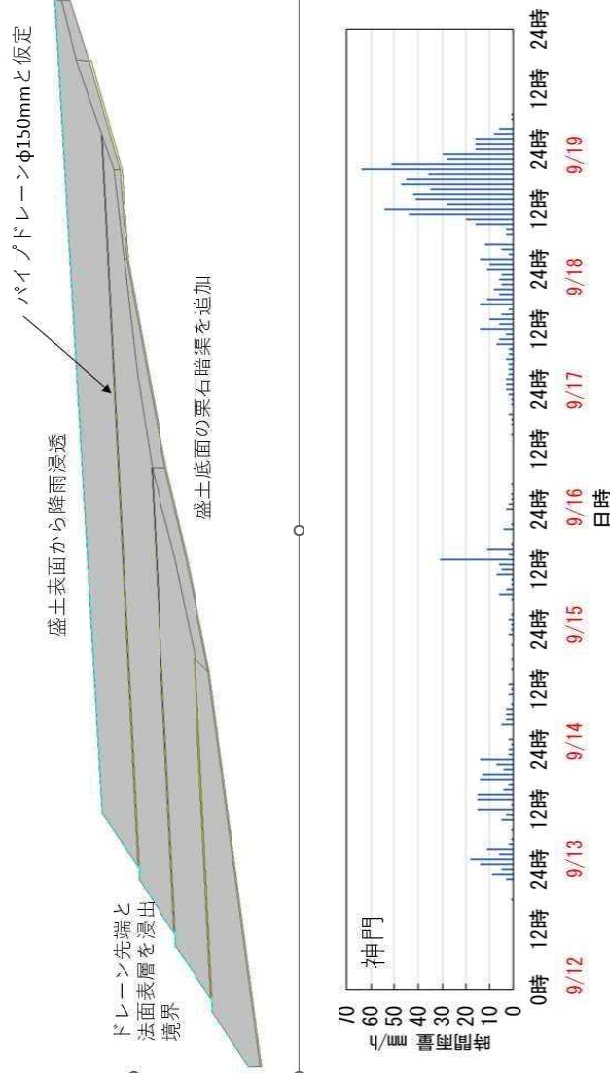
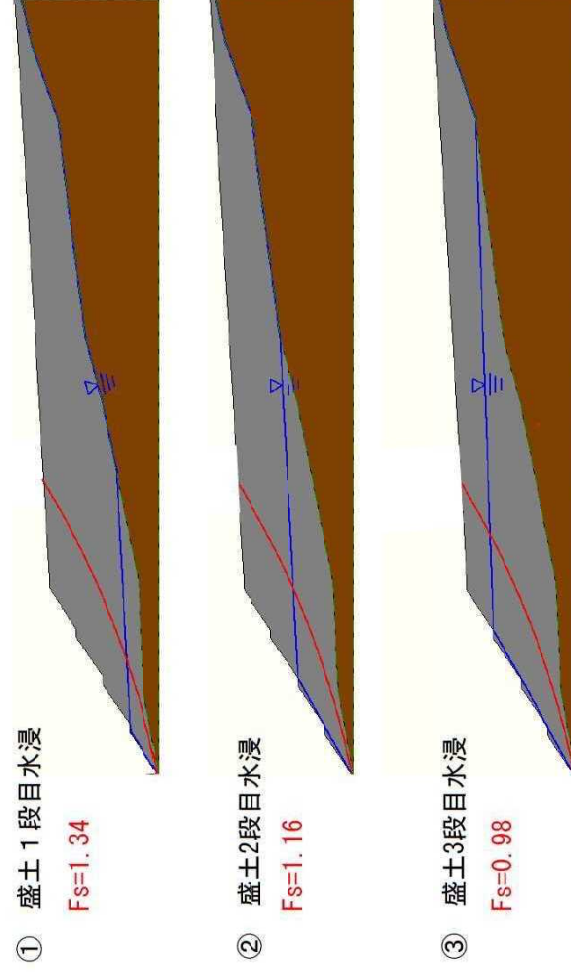


図 3.3-2 解析モデルと入力雨量

計算した結果、地下水位の高さが盛土の1段目から2段目においては安全率が下がるが、崩壊は発生しない。しかし、3段目になると安全率が下がり、崩壊が発生するという結果となり、実際、崩壊するには3段目まで水位が上昇しないと崩壊は発生しないという結果になった。



大規模なすべりが生じるには、盛土3段目付近までが地下水位下となる。

図 3.3-3 崩壊すべり面の安全率が1未満になる地下水位の検討

また、雨を降らせた時に残土処理場内の地下水位がどの程度変化したのかを浸透流解析で計算したところ、結論として、雨水だけでは盛土内の水位は上昇しないという結果が得られた。

条件として、盛土材とドレーン材が布設されており、それぞれ透水係数を与えている。盛土材の透水係数は変わらないが、ドレーン材が配置されたことにより、ドレーン材がどの程度有効なのかを透水係数を変えてパラメトリックに計算した。

一般的な礫材と同程度の透水係数のドレーン材を配置するという条件から、殆どドレーン材が無い状態までの条件を仮定して計算したもので、現時点ではドレーン材の透水係数の評価が難しいため、透水係数をケース1からケース3に当てはめて計算した。(表 3.3-1)ケース1は礫材と同じ透水係数とした場合、ケース2はドレーン材と盛土材の中間の透水係数とした場合、ケース3は盛土材と同じ透水係数とした場合とした。浸透流解析の結果を下図(図 3.3-4)に示しており、最も地下水が上昇した時の水位の水位の比較を行った。

ケース1では、殆ど水位が上昇せず、降った雨は、全て盛土の外に流出するという結果となり、ケース2も殆ど同様の結果となった。なお、ケース3では、盛土法面の法先で少し水位が上昇し、法先の部分で円弧すべりのような崩壊が計算上、発生する結果となった。

しかしながら、法先の部分が崩壊したとしても、実際に起きた大規模な崩壊に繋がらないと評価できる。これらの結果から、当地区の盛土崩壊時の地下水位は、盛土法面の3段目の高さまで到達していたと推定されることから、残土処理場の地表面からの雨水浸透だけでは盛土内水位の上昇に及ぼす影響は小さい。

以上の結果より今回の盛土の崩壊は、盛土内部の地下水位が上昇したことにより引き起こされたが、地下水位上昇は盛土区域からの雨水浸透ではなく、周辺流域からの地下水流入が支配的であったと考えられる。

表 3.3-1 解析条件

地層名	浸透流解析		すべり安定解析			
	飽和透水係数 k (m/s)	比貯留係数 S_s (1/m)	飽和重量 γ_{sat} (kN/m ³)	湿潤重量 γ_t (kN/m ³)	粘着力 c' (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ' (°)
盛土	1.23×10^{-5}	1×10^{-4}	20.8	18.9	0.9	28.4
ドレーン	下記の3ケース	1×10^{-4}	20.8	18.9	0.9	28.4

ドレーンの透水係数を変えた解析ケース

- ・ **ケース1** : $k=1.5 \times 10^{-2}$ m/s (一般的な礫ドレーン材と同様の透水係数)
- ・ **ケース2** : $k=3.40 \times 10^{-3}$ m/s (礫材ドレーンと盛土材の中間の透水係数)
- ・ **ケース3** : $k=1.23 \times 10^{-5}$ m/s (盛土材と同じ。ドレーンなしの状態)

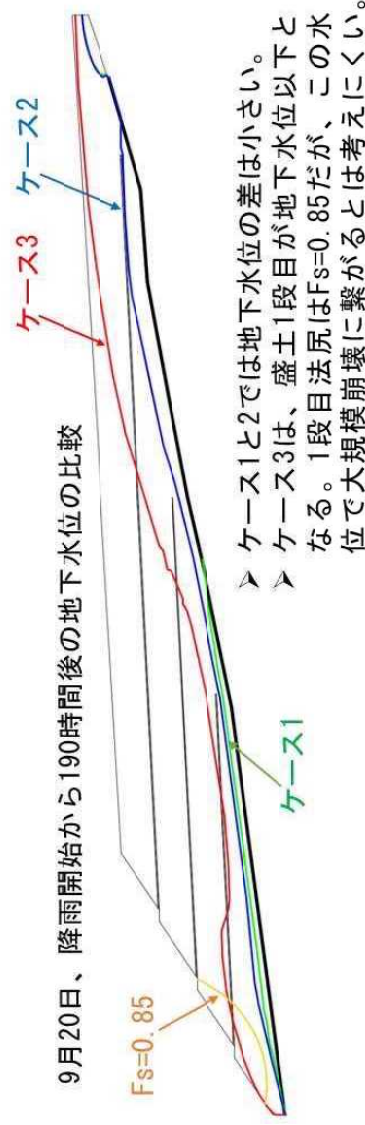


図 3.3-4 浸透流解析結果

(3) 検証結果(総括)

今回の盛土の崩壊は、盛土内部の地下水位が上昇したことにより引き起こされたと考えられる。盛土崩壊箇所には、地形的な流域界を超えて地下水が集中する地下構造があることが推定され、これが崩壊に大きく影響したものと考えられる。このことから、このような地下水の集中が推定される流域の谷頭部は残土処分場の選定を避けるなど注意すべきである。

処分地の地盤特性として、地下水が集中する地下構造であることが把握されていた場合は、詳細な調査を行い、安定性を検討するとともに、その検討結果に基づき、地下水の集中に対処するために必要な排水施設等の対策やより精緻な施工管理が行われることとなる。しかし、当該地の溪流部について、処分地選定の基礎調査段階では、地下水が集中する地下構造を有していることの把握が困難であることも委員会の意見とした。

以上の検証結果を踏まえ、今後は、残土処分場の選定に当たって、必要に応じ詳細な水文・地質調査を実施し、地下構造を適切に把握することが重要である。