

第5章 地質・水文調査

5.1 水文観測

5.1.1 流量観測

崩落地内において、常時流水がある箇所には三角堰を設け、流量を連続観測した。また、比較のために崩落地外でも同様に連続観測を実施した。観測は図 5-1 に示す 6 箇所（崩落地内 4 箇所、崩落地外 2 箇所）で実施した。また、R-1～R-5 の関係を図 5-2 に示す。

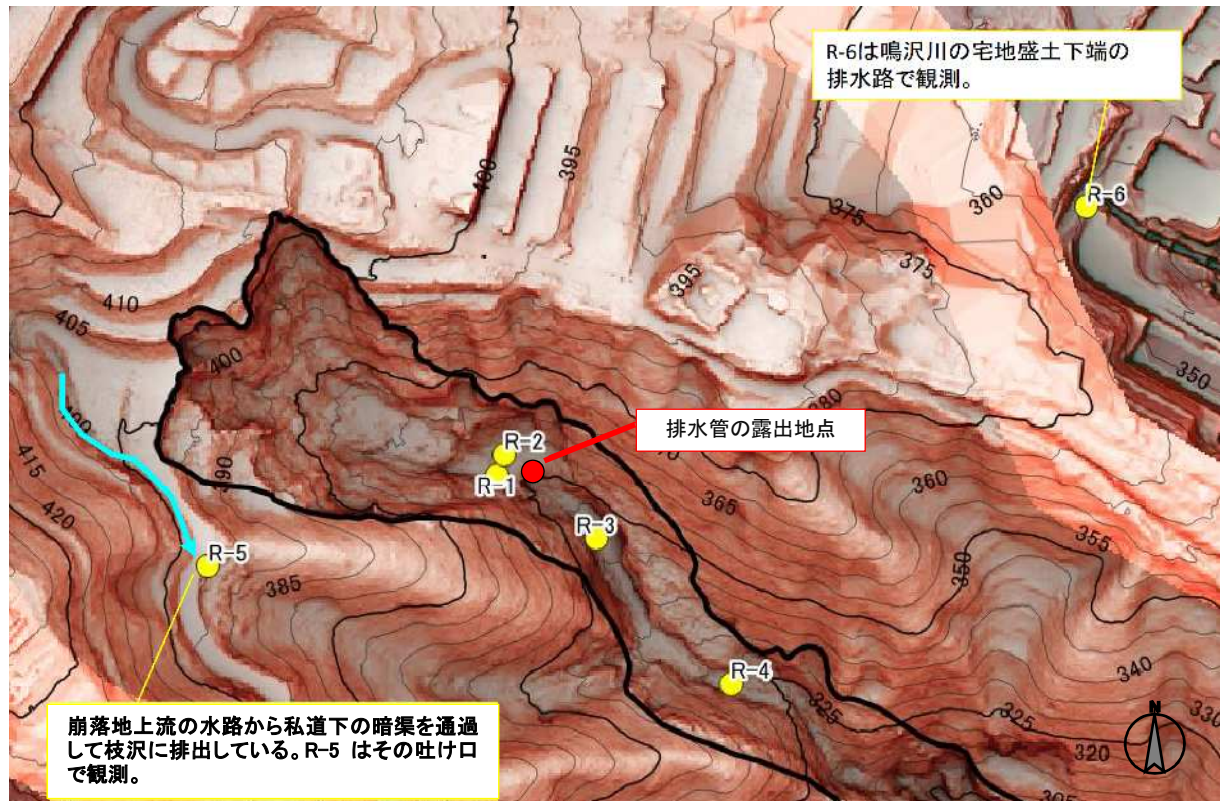


図 5-1 流量観測位置図

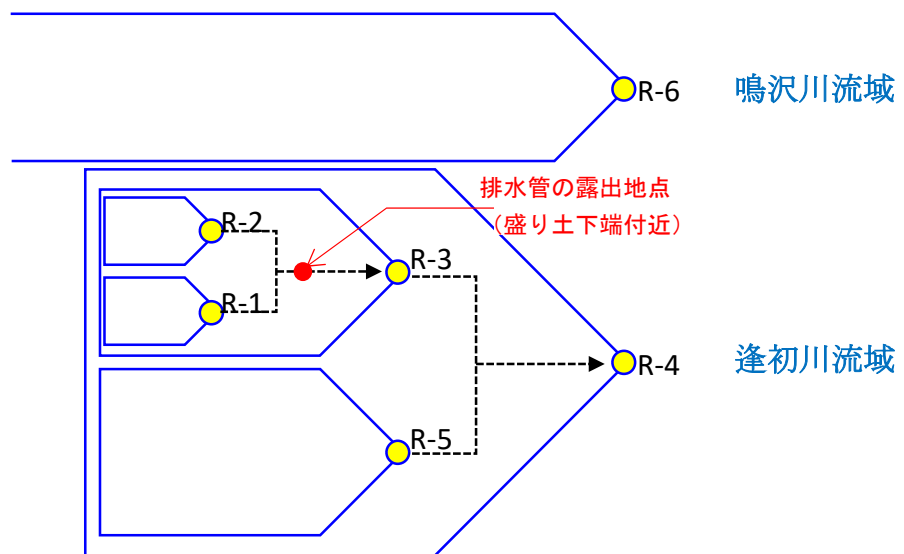


図 5-2 観測箇所 (R-1～R-6) の上下流の関係

5.1.2 湧水量観測

崩落地内において、湧水が認められる箇所で湧水量を観測した。観測項目は、湧水量の他、電気伝導度（EC）である。電気伝導度は、地下水中の電解質の濃度の影響をより強く受けると値が高くなる。

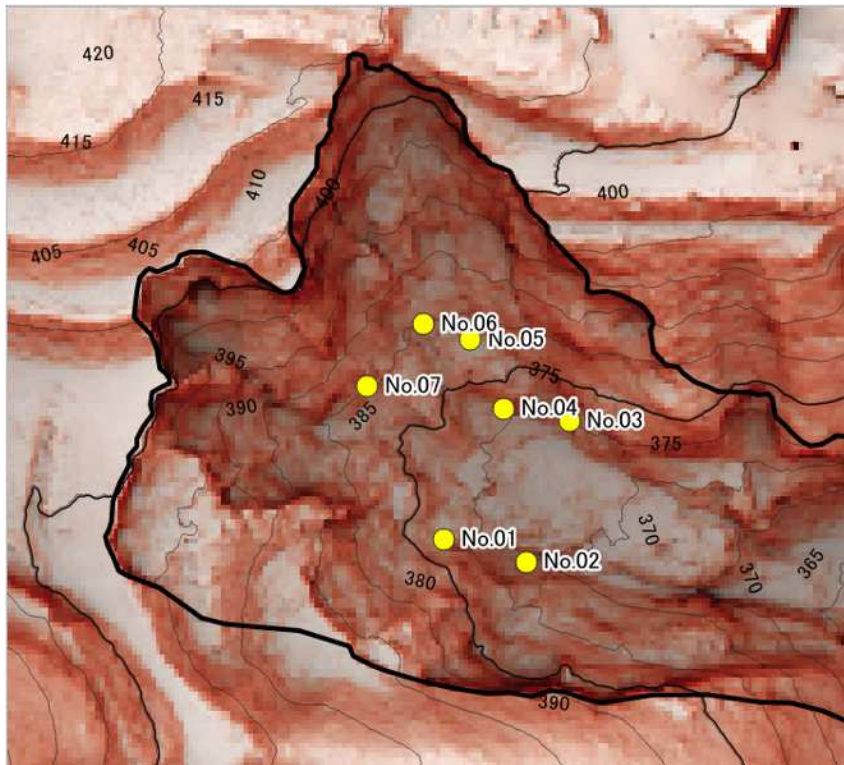
観測は図 5-3 に示す 7 箇所で、降雨後を含む計 5 回（2021 年 10 月 11 日、10 月 21 日、10 月 26 日、11 月 10 日、2022 年 7 月 21 日）実施し、電気伝導度（EC）については、簡易 EC 計により現地湧水を直接計測した。（2022 年 7 月 21 日は湧水点 No.1 のみ観測）

5.1.3 観測結果

湧水量観測の結果、湧水点 No. 1、No. 2、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。なお、湧水点 No. 3 は地山（崖錐堆積物）、またはそれと崩土との境界に該当する。

また、2022 年 7 月 21 日には、円礫を主体とする堆積物（溪流堆積物）の層から約 30L/分の流量が逢初川本川からの湧水と考えられる湧水点 No. 1 で観測された。

電気伝導度について 10 月 11 日と 11 月 10 日の結果より、湧水点 No. 1（造成前の溪床部に該当）は、値は小さく、逢初川流域からの湧水と考えられる。一方、No. 4 は値が比較的大きく、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る。電気伝導度からも地下水の流入が鳴沢川から流入していることが推定される。



【観測位置の概要】

- No.1: 崩土と地山の境界
- No.2: 崩土と地山の境界
- No.3: 地山(崖錐堆積物)
- No.4: 地山内(露岩下部)
- No.5: 崩土上部(湿地状)
- No.6: 地山(崖錐堆積物)
- No.7: 崩土と地山の境界



【観測状況】

図 5-3 湧水量等観測位置図

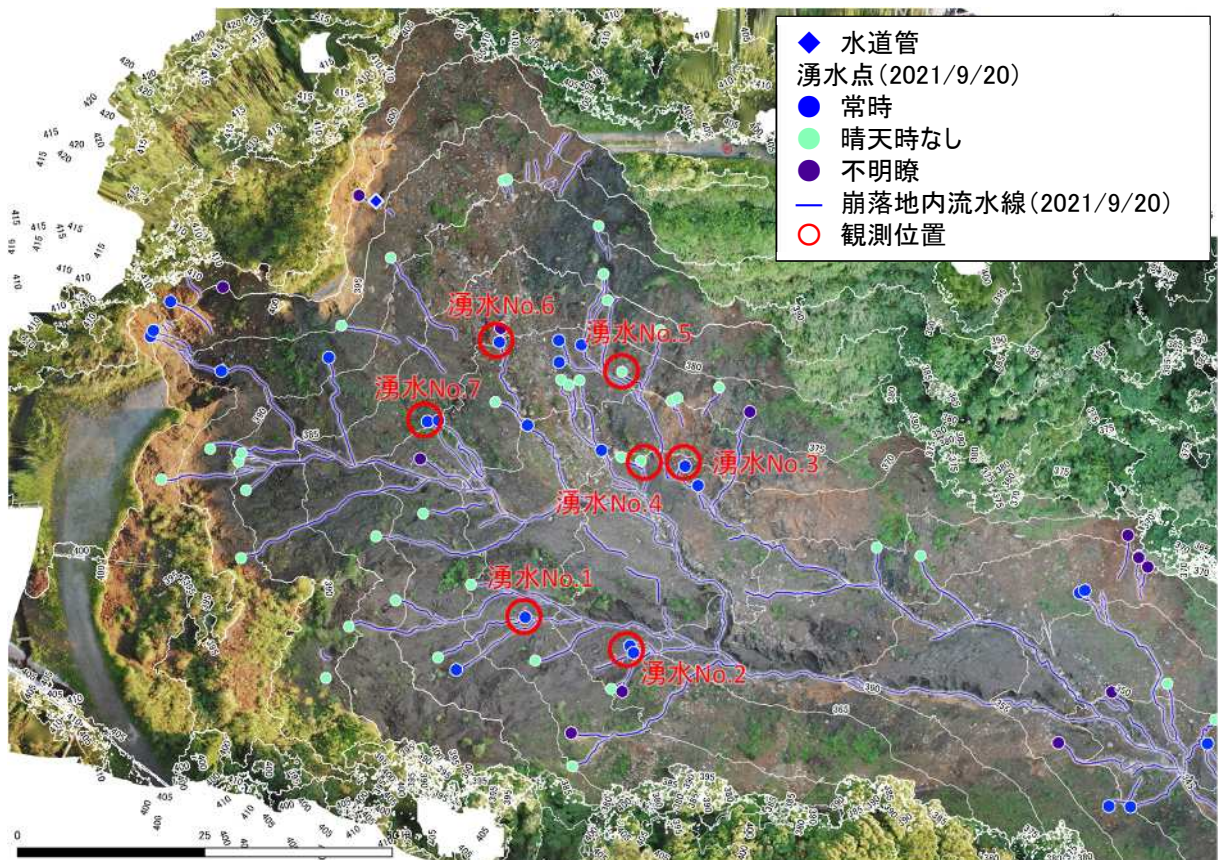


図 5-4 熱赤外面像による湧水点調査結果と観測位置

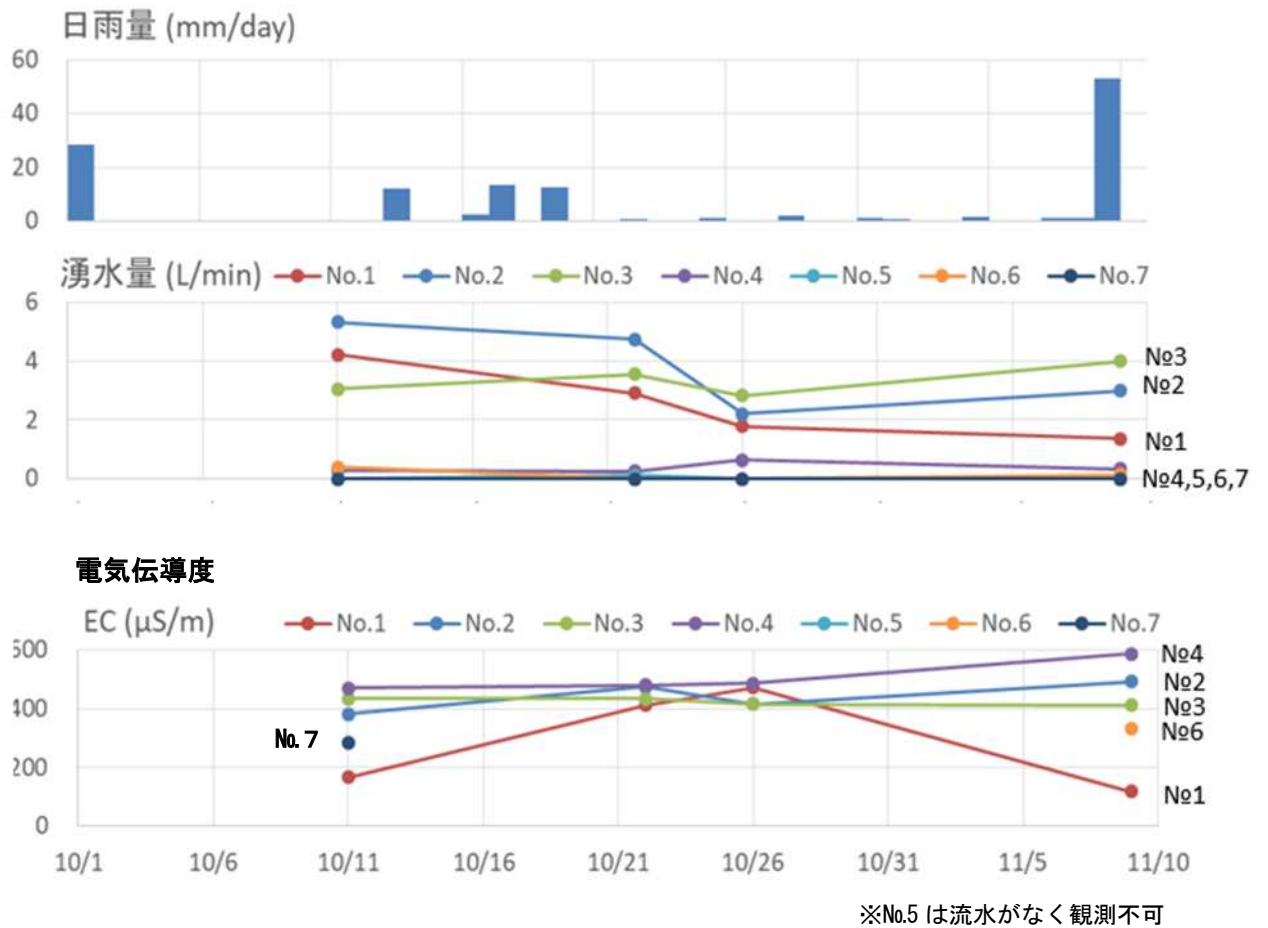


図 5-5 湧水量・電気伝導度の観測結果

5.2 地質調査

5.2.1 調査位置及び内容

崩落地及びその周辺の地質状況を把握するため、ボーリング調査を実施した。また、ボーリング孔を用いて、地下水位、地下水の流向・流速を計測した。ボーリング位置図を図 5-6 に、計測・試験内容を表 5-1 に示す。なお、ボーリング位置図には、あわせて地質断面位置も示す。

逢初川は周辺の谷部と比較して溪床が低い傾向にあり、逢初川流域の北側からの地下水の供給が考えられる。よって、地質構造とあわせて、地下水流入状況を把握するため、ボーリング No. 1 及び No. 2 は、逢初川流域と鳴沢川流域の境界尾根部に配置した。ボーリング No. 3 及び No. 4 は、崩落していない盛り土で、盛り土の構成や強度、透水性等の物性把握を目的として配置した。ボーリング No. 5 は、No. 1 と No. 3 及び No. 4 の地層の連続性と地下水の流向を把握するために配置した。

地質断面図の A 断面はボーリング No. 1～No. 2 上の境界尾根部を通る直線、B 断面はボーリング No. 5～No. 3～No. 4 を通る直線の測線である。C 断面はボーリング No. 1～No. 5～No. 3～No. 4 から崩落面を通り逢初川方向に抜ける測線、D 断面はボーリング No. 2 から逢初川左岸側の崩落面を通り逢初川に抜ける測線である。

原位置試験・計測は、現場透水試験、地下水位観測、地下水検層、流向流速測定を実施した。

現場透水試験は孔内の水位から透水係数を求めるもので、No. 4 を除くボーリング孔で実施した。現場透水試験には非定常法と定常法があり、非定常法は水位を低下または上昇させて平衡状態に戻るまでの水位変化を測定して透水係数を求めるに対して、定常法は水位を一定に保ちながら、そのときの流量を測定して透水係数を求める。

地下水検層は、すべてのボーリング孔で実施した。地下水検層は、孔内の水に電解質の物質を投入・攪拌し、孔内水の電気抵抗を測定するものである。地下水が流入・流出する層では電解質が希釈され、電気抵抗は大きくなる。これを利用して地下水の流動を把握する。

表 5-1 ボーリング位置及び計測・試験内容

No.	現場透水試験	地下水位観測	地下水検層	流向流速測定
1	非定常法：7 箇所	実施	実施	流動層：2 箇所 非流動層：1 箇所
2	非定常法：11 箇所	実施	実施	流動層：2 箇所 非流動層：1 箇所
3	定常法：1 箇所 非定常法：6 箇所	実施	実施	流動層：2 箇所 非流動層：1 箇所
4	—	—	実施	流動層：1 箇所 非流動層：1 箇所
5	定常法：1 箇所 非定常法：7 箇所	実施	実施	流動層：1 箇所 非流動層：1 箇所

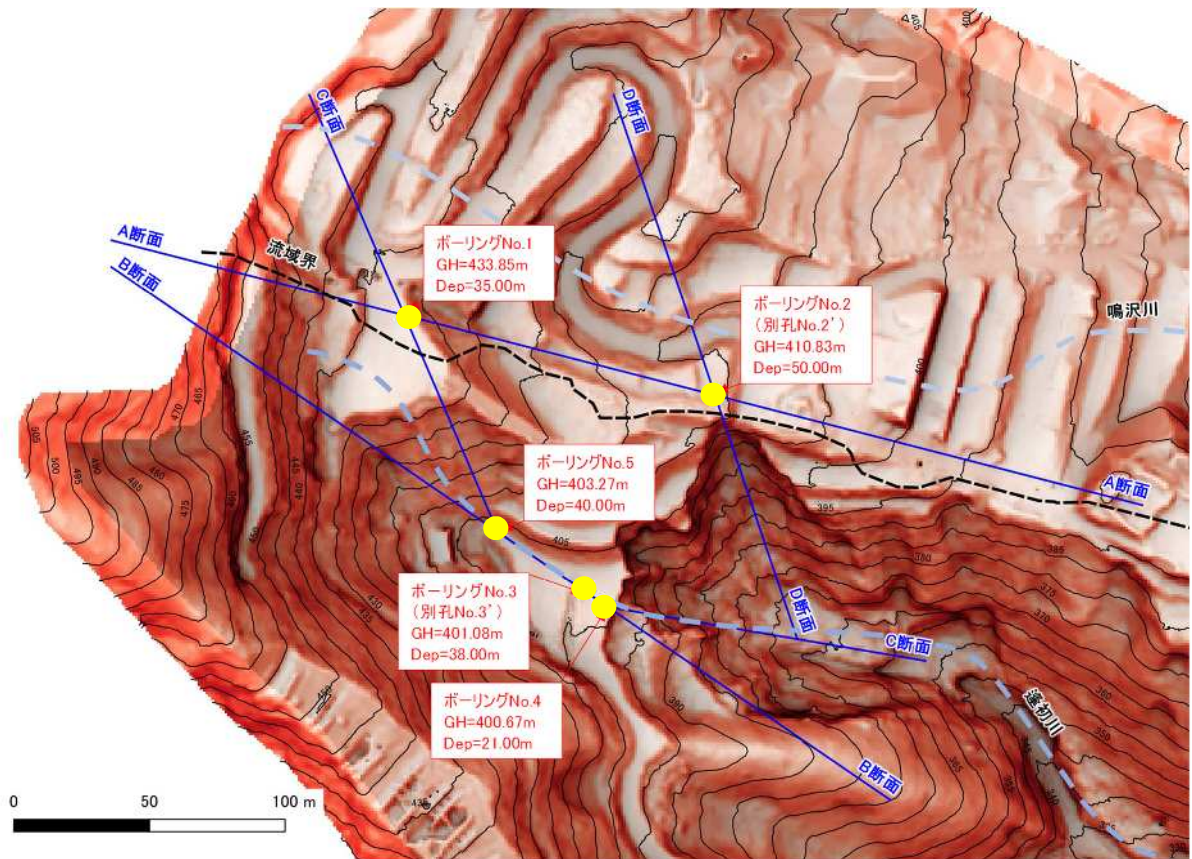


図 5-6 ボーリング位置図

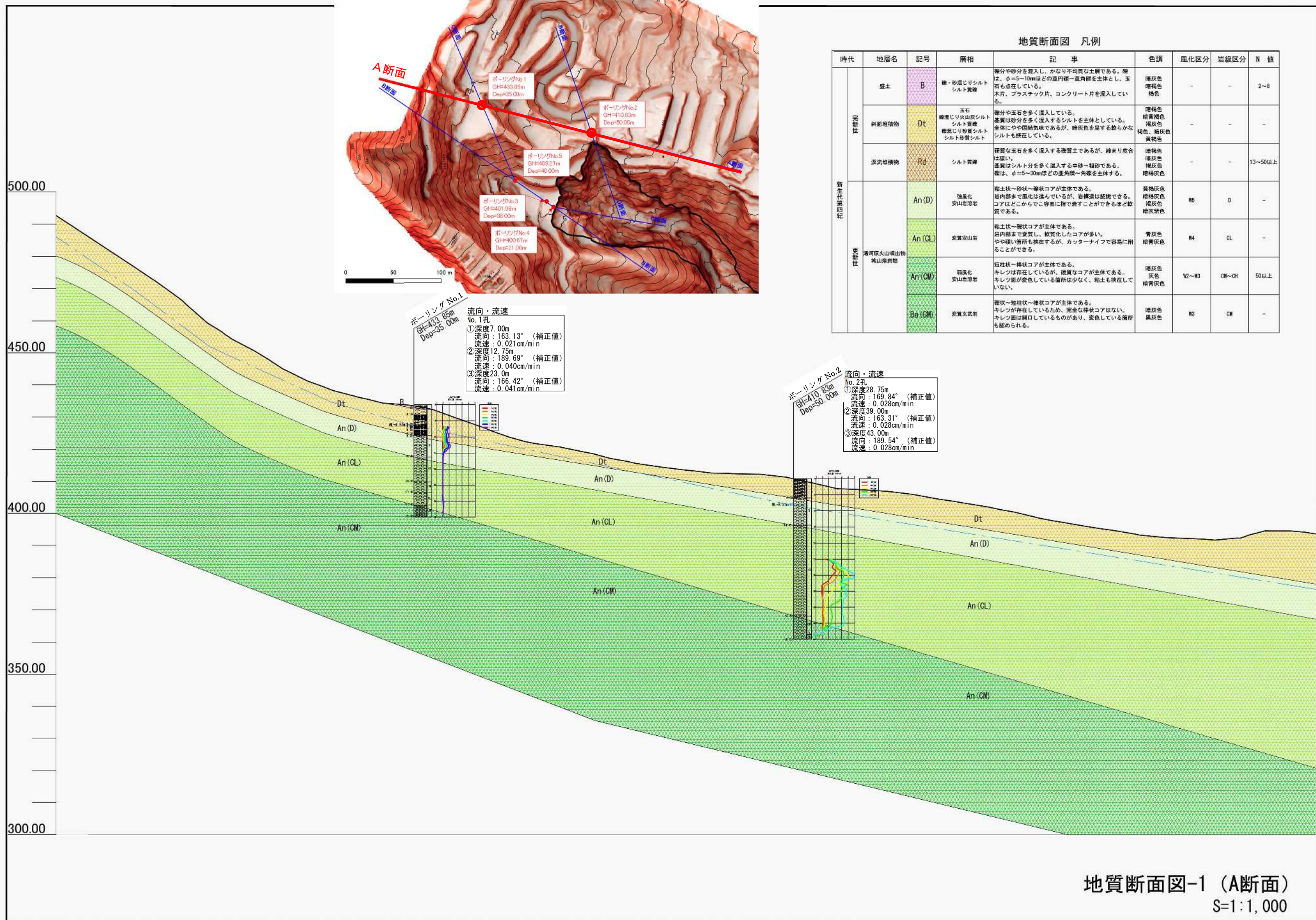
5.2.2 調査結果

次頁より地質断面図を示す。

崩落していない盛り土の他、私道より上部に斜面堆積物、下部の谷部に溪床堆積物が分布しており、その下部に基盤となる岩盤層が存在する。

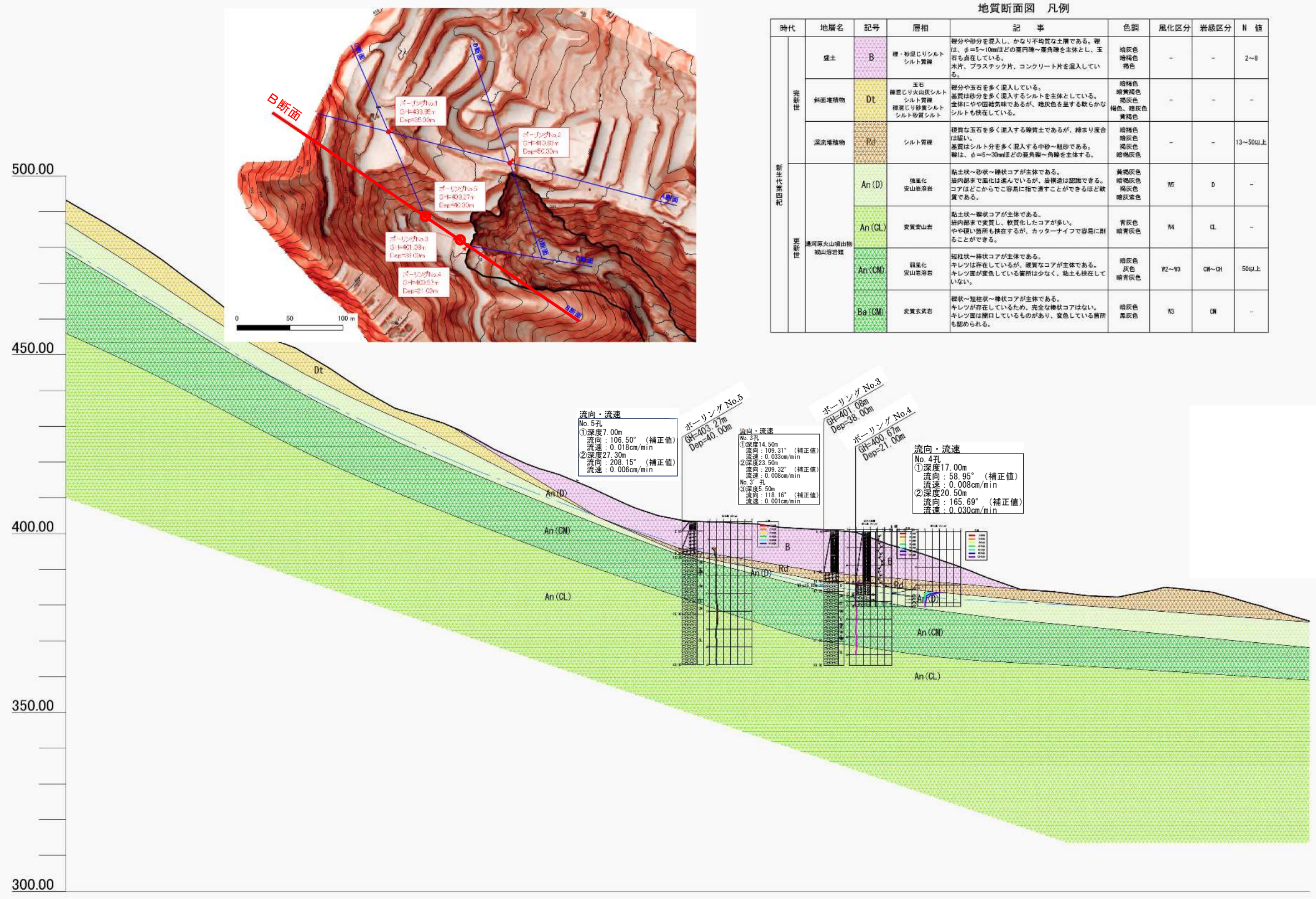
盛り土層は、ボーリング No. 3 では地表から 11.95m、No. 4 では 14.40m、No. 5 では 9.35m 下まで確認された。採取したコアからは、盛り土層内において履歴や材料の違いを示すような明瞭な境界は見られない。

盛り土部の透水係数は、 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-9} (\text{m/s})$ であるが、盛り土部以外の透水係数は、 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-9} (\text{m/s})$ であり、ボーリング No. 3 における溪流堆積物では $1.0 \times 10^{-3} (\text{m/s})$ 程度の透水性の高い地下水層が確認された。



地質断面図-1 (A断面)
S=1:1,000

図 5-7 地質断面図 (A断面)

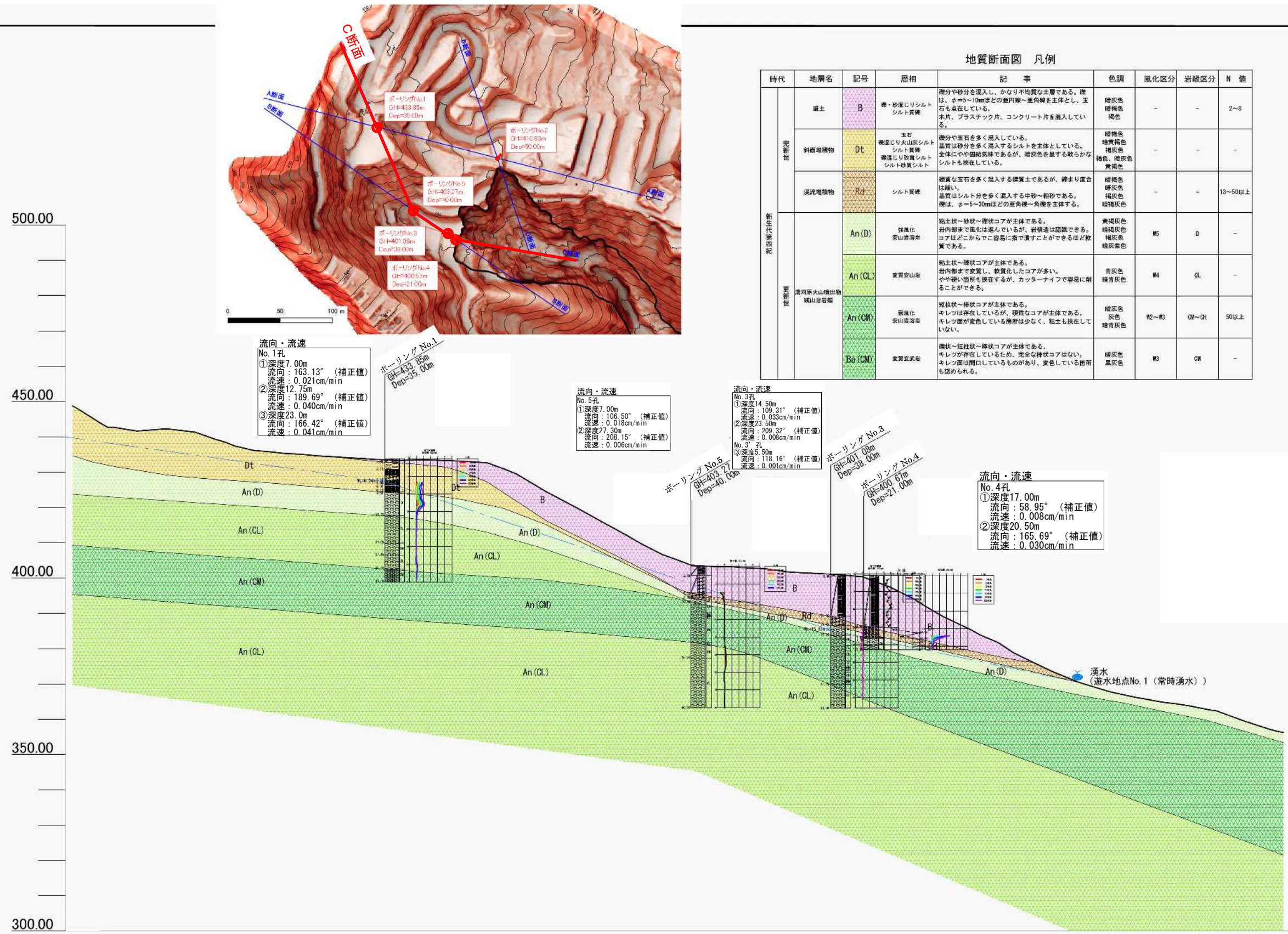


地質断面図 凡例

時代	地層名	記号	層相	記事	色調	風化区分	岩級区分	N 値
第四紀	盛土	B	砂・砂礫入りシルト シルト質礫	礫分や砂分を混入し、かなり不均質な土層である。礫は、φ=5~10mmほどの重円礫~重角礫を主体とし、玉石も点在している。 木片、プラスチック片、コンクリート片を混入している。	暗灰色 暗褐色 褐色	-	-	2~8
	斜面堆積物	Dt	玉石 礫入り火山灰シルト シルト質礫	礫分や玉石を多く混入している。 基質は砂分を多く混入するシルトを主体としている。 全体にやや固結気味であるが、暗灰色を呈する数らかなシルトも挟んでいる。	暗褐色 暗褐色 暗灰色 褐色 暗褐色	-	-	-
	深流堆積物	Rd	シルト質礫	礫質な玉石を多く混入する礫質土であるが、礫より割合は少ない。 基質はシルト分を多く混入する中砂~粗砂である。 礫は、φ=5~30mmほどの重角礫~角礫を主体とする。	暗褐色 暗褐色 暗灰色 暗褐色	-	-	13~50以上
新第三紀 和歌山層群		An(D)	強風化 安山岩岩屑	粘土状~砂状~礫状コアが主体である。 層内部まで風化は進んでいるが、層構造は認識できる。 コアほどこからでこ容易に指で潰すことができるほど軟弱である。	黄褐色 暗褐色 暗褐色 暗灰色	W5	D	-
		An(CL)	変質安山岩	粘土状~礫状コアが主体である。 層内部まで変質し、軟化したコアが多い。 やや深い箇所も挟んでいるが、カッターナイフで容易に削ることができる。	青灰色 暗青灰色	W4	CL	-
		An(CM)	弱風化 安山岩岩屑	短柱状~棒状コアが主体である。 キレン面が存在しているが、硬質なコアが主体である。 キレン面が変色している箇所は少なく、粘土も挟んでいる。	暗灰色 灰色 暗灰色	W2~W3	CM~CH	50以上
		Ba(CM)	変質玄武岩	棒状~短柱状~礫状コアが主体である。 キレン面が存在しているため、安全な棒状コアはない。 キレン面は開口しているものがあり、変色している箇所も認められる。	暗灰色 黒灰色	W3	CM	-

地質断面図-2 (B断面)
S=1:1,000

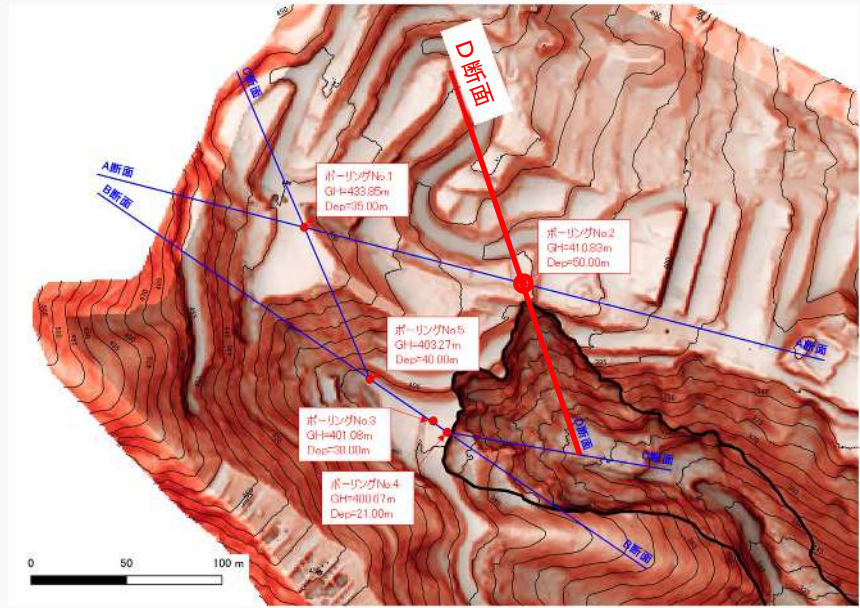
図 5-8 地質断面図 (B断面)



地質断面図-3 (C断面)
S=1:1,000

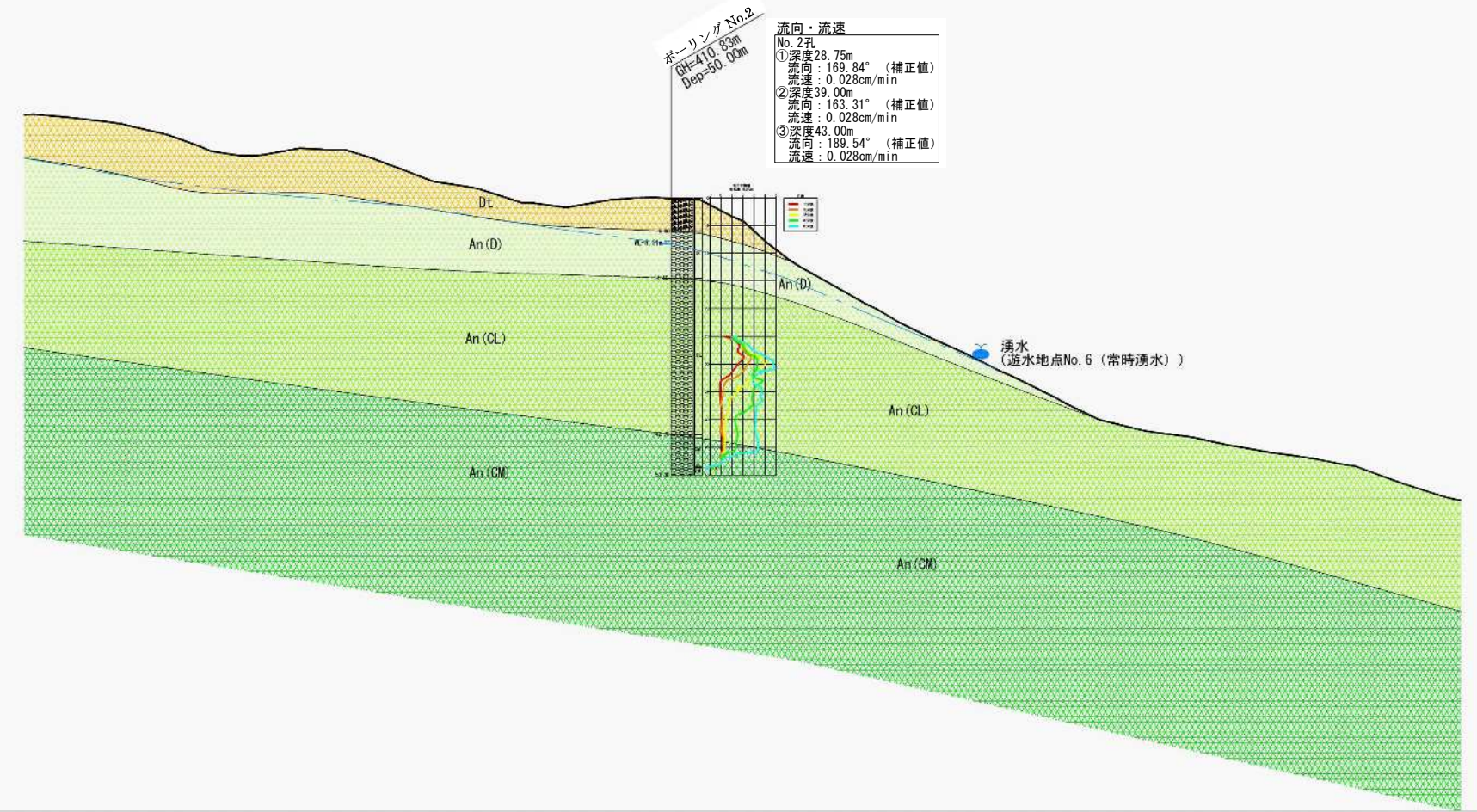
図 5-9 地質断面図 (C断面)

500.00
450.00
400.00
350.00
300.00



地質断面図 凡例

時代	地層名	記号	層相	記事	色調	風化区分	岩級区分	N 値
完新世	礫土	B	礫・砂混じりシルト シルト質礫	礫分や砂分を混入し、かなり不均質な土層である。礫は、φ=5~10mmほどの産円礫~産角礫を主体とし、玉石も点在している。木片、プラスチック片、コンクリート片を混入している。	暗灰色 暗緑色 褐色	-	-	2~8
	斜面堆積物	Dt	玉石 礫混じり火山灰シルト シルト質礫 礫混じり砂質シルト シルト質砂礫	礫分や玉石を多く混入している。基質は砂分を多く混入するシルトを主体としている。全体にやや固結気味であるが、暗灰色を呈する軟らかなシルトも挟んでいる。	暗褐色 暗黄褐色 暗灰色 褐色 暗褐色	-	-	-
	渓流堆積物	Rd	シルト質礫	硬質な玉石を多く混入する礫質土であるが、礫まり成色は低い。基質はシルト分を多く混入する中砂~粗砂である。礫は、φ=5~30mmほどの産角礫~角礫を主体とする。	暗褐色 暗灰色 暗褐色	-	-	13~50以上
中生代第四紀	湯河原火山噴出物 礫山溶岩類	An (D)	塊状 安山岩溶岩	粘土状~砂状~礫状コアが主体である。岩内部まで風化は進んでいるが、岩構造は認識できる。コアはどこからどこまで容易に指で潰すことができる。	黄褐色 暗褐色 暗灰色 暗灰色	W5	D	-
		An (CL)	塊状 安山岩	粘土状~礫状コアが主体である。岩内部まで変質し、軟化したコアが多い。やや硬い箇所も挟んでいるが、カッターナイフで容易に削ることができる。	青灰色 暗青灰色	W4	CL	-
		An (CM)	塊状 安山岩溶岩	短柱状~棒状コアが主体である。キレツが存在しているが、硬質なコアが主体である。キレツ面が変色している箇所は少なく、粘土も挟んでいる。	暗灰色 灰色 暗青灰色	W2~W3	CM~CH	50以上
		Ba (CM)	塊状 安山岩	棒状~短柱状~棒状コアが主体である。キレツが存在しているため、完全な棒状コアはない。キレツ面は開口しているものがあり、変色している箇所も認められる。	暗灰色 黒灰色	W3	CM	-



地質断面図-4 (D断面)
S=1:1,000

図 5-10 地質断面図 (D断面)

5.3 電気探査

5.3.1 調査位置及び内容

電気探査は、地表面に打ち込んだ電極から地下に電気を流し、その応答から地盤の電気的な性質（比抵抗）を測定するものである。測定した比抵抗から、地質分布や風化・変質の程度等の地質状況の他、地下水の状況を把握することができる。地下水によって地中の水分量が多くなると、比抵抗値は低い値を示す。

地下水分布の把握を目的として、崩落地の周辺及び源頭部を対象として電気探査を実施した。測線位置を図 5-11 に示す。測線①は逢初川流域と鳴沢川流域の境界尾根部に配置した。測線②及び測線③は、逢初川と鳴沢川の境界尾根部と両者の谷部を横断する測線である。測線④はボーリング No. 1～No. 5～No. 3～No. 4 へと抜ける測線である。

なお、測定は 11 月 12 日～14 日（一次調査）、12 月 14 日～16 日（二次調査）の 2 回実施した（図 5-12）。11 月 9 日には日雨量 53mm のまとまった降雨があり、一次調査はその降雨後の調査となる。二次調査では調査当日の 12 月 14 日に日雨量 2mm の小雨があったが、それまでは無降雨が数日間続いた。12 月 7 日～8 日にかけて 11.5mm の降雨が観測されているが、一次調査と比較して、降雨の影響は小さいと考えられる。

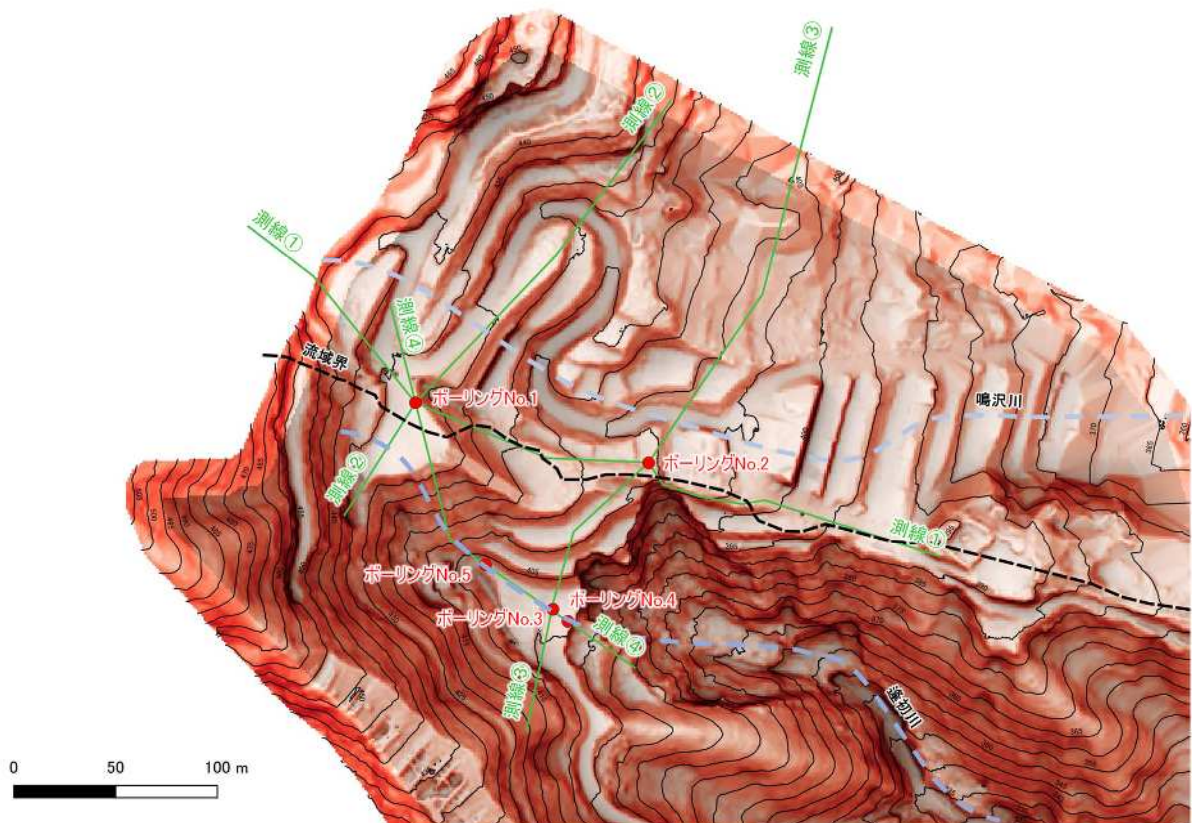


図 5-11 電気探査測線位置図

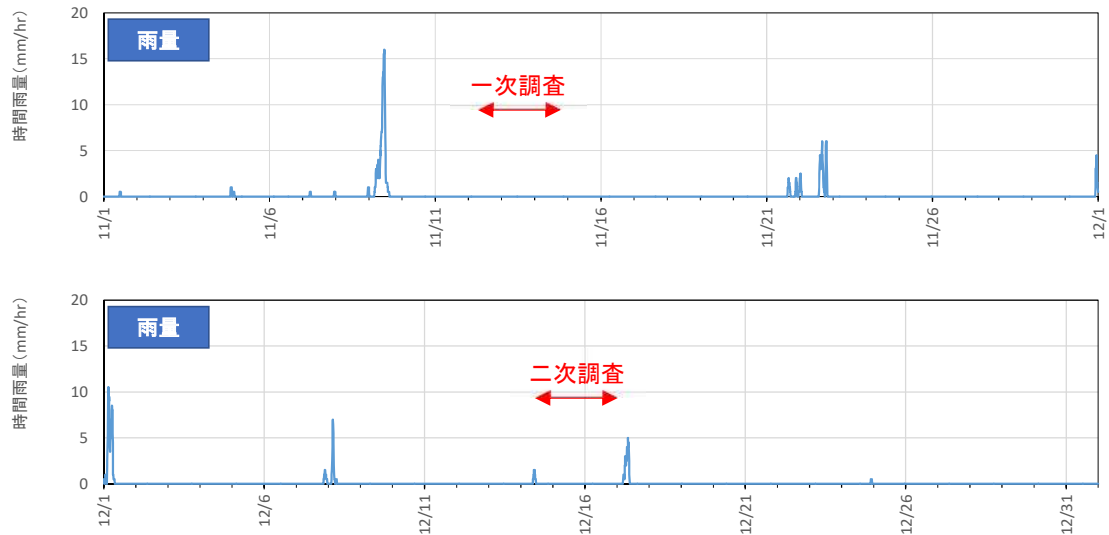


図 5-12 降雨量 (2021 年 11 月～12 月)

5.3.2 調査結果

前述したように、一次調査と二次調査では、事前の降雨状況が異なる。降雨による比抵抗値の変化を把握するため、両者の差分解析を行った。差分解析の結果は、二次調査結果の一次調査結果に対する比抵抗値の変化率を示している。比抵抗値変化率が負値、つまり一次調査の比抵抗値が二次調査よりも低い箇所は、一次調査の事前の降雨によって比抵抗値が低くなったと推測することができる。

各測線の一次調査及び二次調査、差分解析の結果を図 5-13～図 5-16 に示す。図にはボーリング位置と逢初川、鳴沢川の位置を示す。

表 5-2 調査結果・考察

測線	調査結果	考察
<p>① 【図 5-13】</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ボーリング No. 1 の深度 10～40m、No. 2 の深度 20m 以深の位置で低比抵抗部が見られる。差分解析の結果、No. 1 及び No. 2 の下部において一次調査と二次調査で差は見られない。 ● 差分解析の結果、No. 1 と No. 2 の間の深度 5～15m 程度の位置で、比抵抗値が低下している部分が見られる。また、No. 1 より 30～50m 上部でも地表面より以深で比抵抗値が低下している。 	<p>【ボーリング位置における考察】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ボーリング No. 1 の地下水検層では、深度 7～15m で電解質の希釈が認められる。これは、No. 1 の位置に見られる低比抵抗部の深度と整合しているため、地下水の分布と考えられる。差分解析の結果、当該位置の比抵抗値の変化率が小さいことから、降雨による影響は小さく、恒常的な地下水の分布と考えられる。
<p>② 【図 5-14】</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ボーリング No. 1 の深度 10m 以深に低比抵抗部が見られる。差分解析の結果、No. 1 の下部において一次調査と二次調査で差は見られない。 ● 鳴沢川から左岸側（北側）に 30～70m 離れた位置で低比抵抗部が見られる（深度は 15m 以深）。 	<ul style="list-style-type: none"> ● ボーリング No. 2 の地下水検層では深度 28m 以深で電解質の希釈が認められることから、No. 2 の低比抵抗部は地下水の分布と考えられる。差分解析の結果、当該位置の比抵抗値の変化率が小さいことから、降雨による影響は小さく、恒常的な地下水の分布と考えられる。
<p>③ 【図 5-15】</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ボーリング No. 2 の位置で、深度 10m 以深に低比抵抗部が見られる。差分解析の結果、No. 2 の下部において一次調査と二次調査で差は見られない。 ● ボーリング No. 3 の位置で、地表面から深度 8m 程度まで低比抵抗部が見られる。これは盛り土層に該当する。差分解析の結果、No. 3 の下部において一次調査と二次調査で差は見られない。 ● 逢初川から右岸側（南側）に 10～50m 離れた位置で、地表面付近から以深に低比抵抗部が見られる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● ボーリング No. 3 の位置の地下水検層は地表面から深度 7m 程度で電解質の希釈が認められることから、No. 3 の位置における低比抵抗部は地下水の分布と考えられる。差分解析の結果、当該位置の比抵抗値の変化率が小さいことから、降雨による影響は小さく、恒常的な地下水の分布と考えられる。 ● ボーリング No. 4 及び No. 5 の下部は、比抵抗値のコンター線が密なため、地下水検層との比較はしない。 <p>【測線における考察】</p>
<p>④ 【図 5-16】</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ボーリング No. 1～No. 5 の位置で低比抵抗部が見られる。差分解析の結果、No. 1～No. 5 の下部において一次調査と二次調査で差はあまり見られない。 ● 差分解析の結果、No. 1 付近の上部、深度 5～15m 程度の位置で比抵抗値が低下している。 ● ボーリング No. 3 の位置で、地表面から深度 8m 程度まで低比抵抗部が見られる。これは盛り土層に該当する。差分解析の結果、No. 3 の下部において一次調査と二次調査で差は見られない。 ● ボーリング No. 4 より下流側（東側）で、低比抵抗部が見られる（深度は概ね 5m 以深）。差分解析の結果、No. 4 より下流側において一次調査と二次調査で差は見られない。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 尾根部となる測線①の浅部において地下水の分布が示唆された。測線①の差分解析結果において、ボーリング No. 1 と No. 2 の間の比抵抗値が低下している部分は、降雨により生じた地下水の分布と考えられる。ボーリング No. 1 の上部にある比抵抗値の低下部分も、降雨により生じた地下水の分布と考えられる。 ● 測線③で確認された逢初川の右岸側（南側）の低比抵抗部は、測線④の No. 1～No. 5 の下部及び No. 4 の下流側（東側）の低比抵抗部と連続している可能性がある。

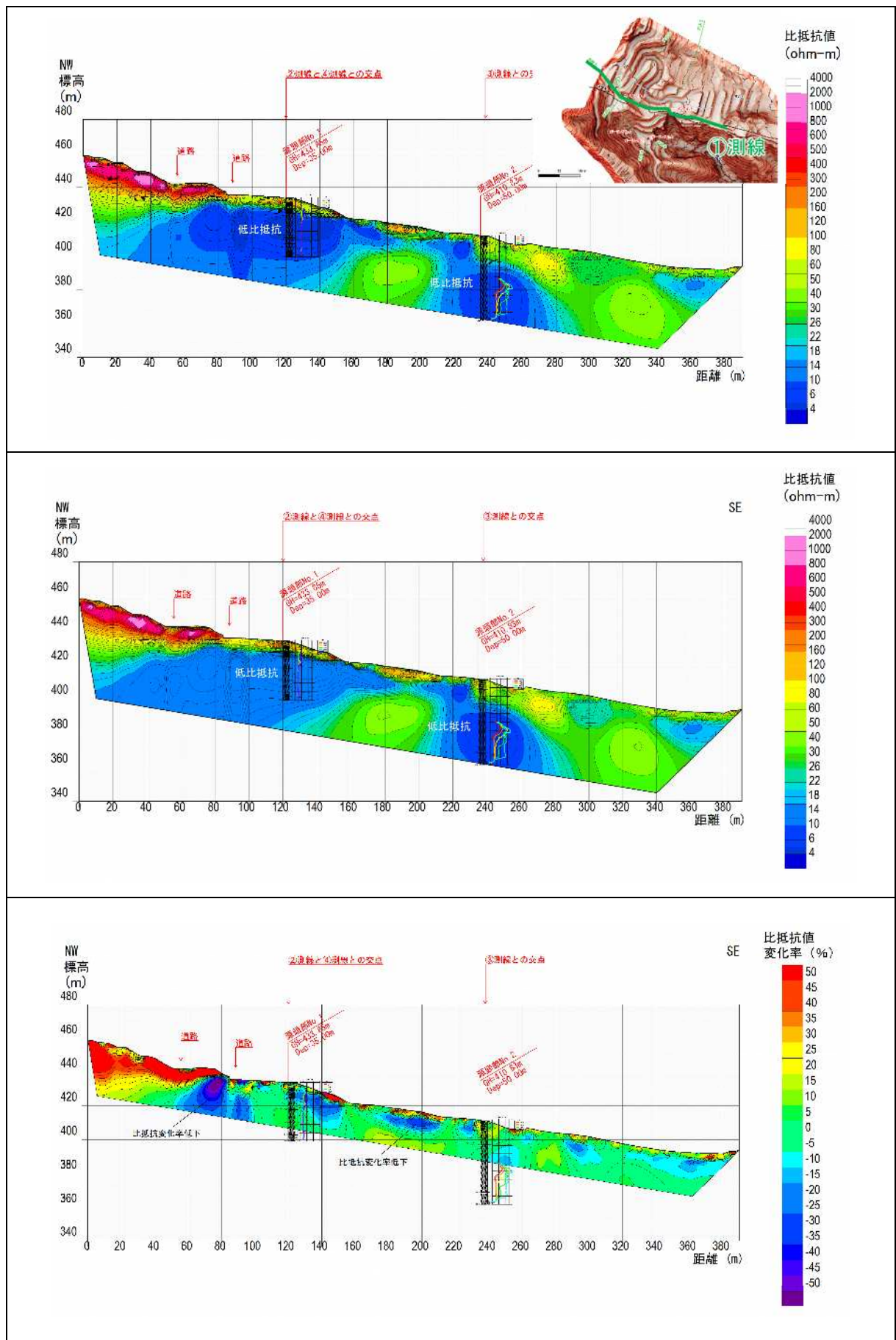


図 5-13 電気探査結果図 (①測線) (上段：一次調査、中段：二次調査、下段：差分解析)

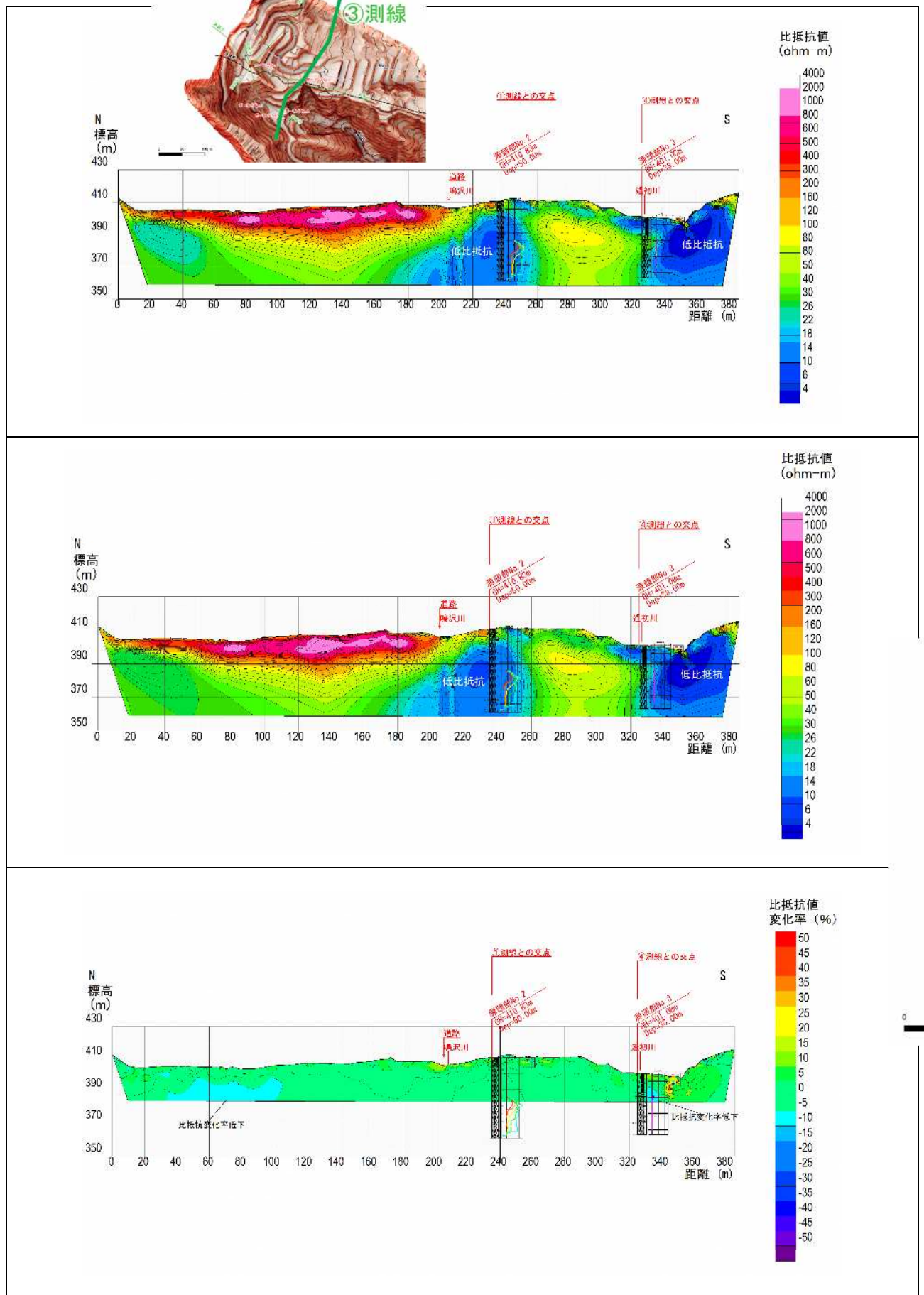


図 5-15 電気探査結果図 (③測線) (上段：一次調査、中段：二次調査、下段：差分解析)

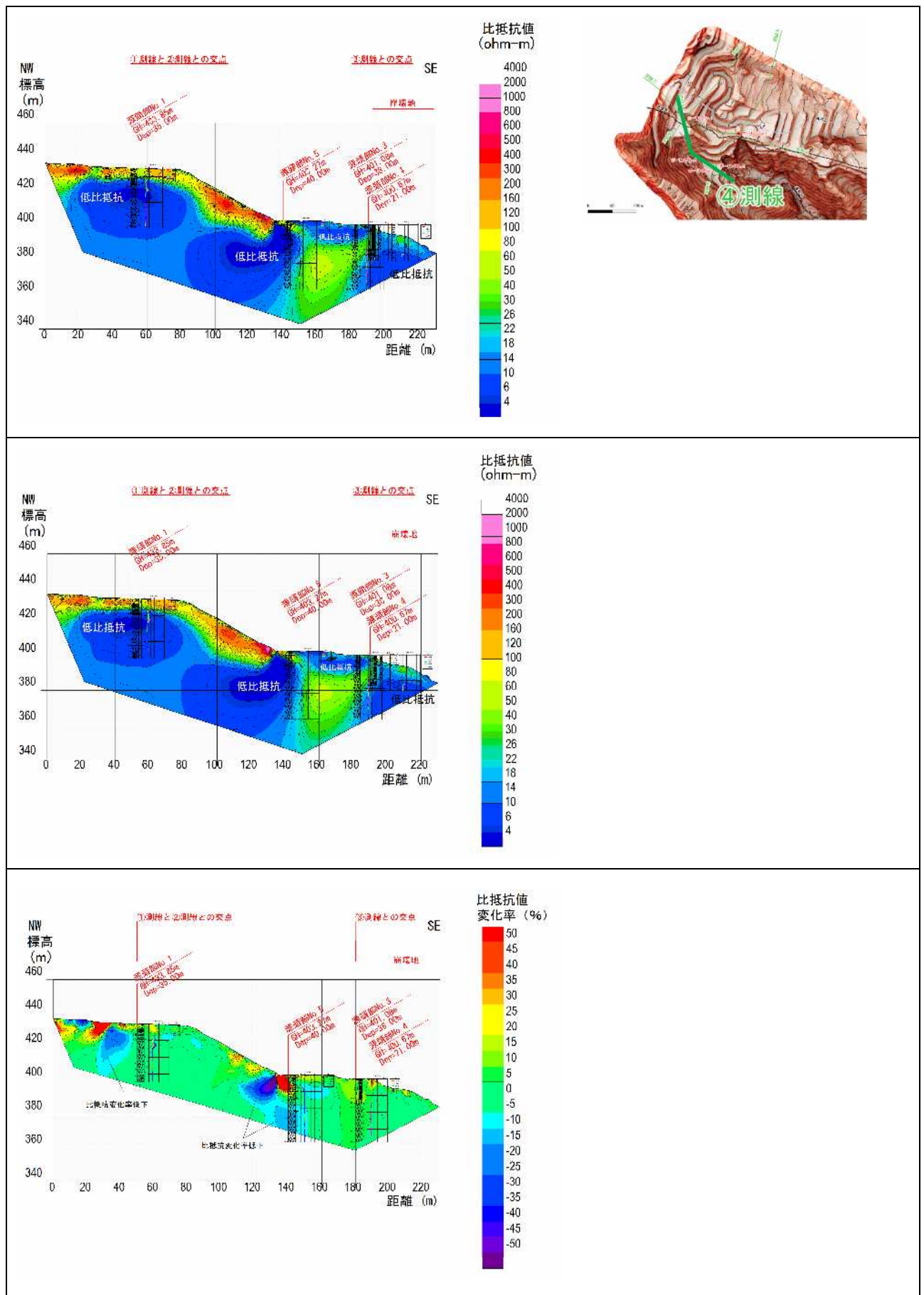


図 5-16 電気探査結果図 (④測線) (上段：一次調査、中段：二次調査、下段：差分解析)

調査結果について、尾根部となる測線①において、ボーリング No. 1 付近の深度 10～40m、ボーリング No. 2 付近の深度 20m 以深で恒常的な低比抵抗部が見られた。これらは地下水検層の結果と整合しており、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。また、浅部（地表面から深度 15m 程度）において、降雨により発現したと考えられる低比抵抗部が複数確認された。

ボーリング No. 1 から逢初川へと向かう測線④でも、ボーリング No. 1～No. 5 の斜面下部で恒常的な地下水の分布が示唆された。また、低比抵抗部は、ボーリング No. 4 の東側にも確認された。交差する測線③では、ボーリング No. 3 の南側に低比抵抗部が確認された。

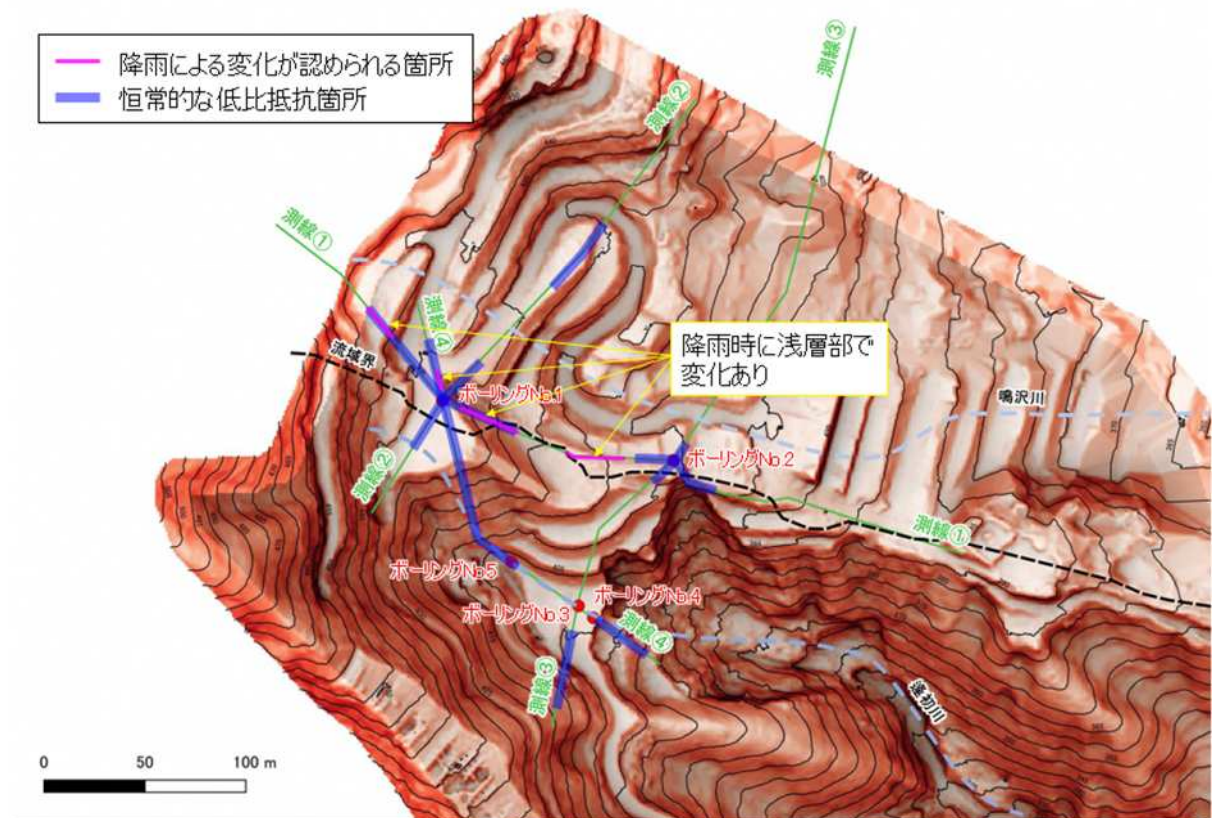


図 5-17 電気探査結果概要図

5.4 土質試験

崩落した盛り土及び地山の土質特性を把握するため、室内土質試験を実施した。室内土質試験の実施一覧を表 5-3 に、試料採取位置を表 5-3 に示す。

ボーリング No. 3 において盛り土層から 4 試料を採取した。また、ボーリング No. 1、No. 2、No. 3 より斜面堆積物及び強風化・変質岩盤に該当する層のボーリングコアを用いて試験を実施した。さらに、崩落していない盛り土部では崖面の上部と下部で試料採取（ブロックサンプリング）している。

表 5-3 室内土質試験の実施数量

地層名	試験項目	ボーリング					崩落していない盛り土
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	
盛り土層	現場密度試験 (砂置換法)						2
	土の三軸圧縮試験 (CUB)			4			8
	不飽和土の 三軸圧縮試験 (CU)						4
	保水性試験						2
	土の湿潤密度試験			4			
	土粒子の密度試験			2			2
	土の含水比試験			2			2
	土の粒度試験 (フルイ+沈降)			2			2
	土の液性限界試験			2			2
	土の塑性限界試験			2			2
斜面堆積物	土の三軸圧縮試験 (CUB)	1					
強風化・ 変質岩盤	土の三軸圧縮試験 (CUB)		2	1			

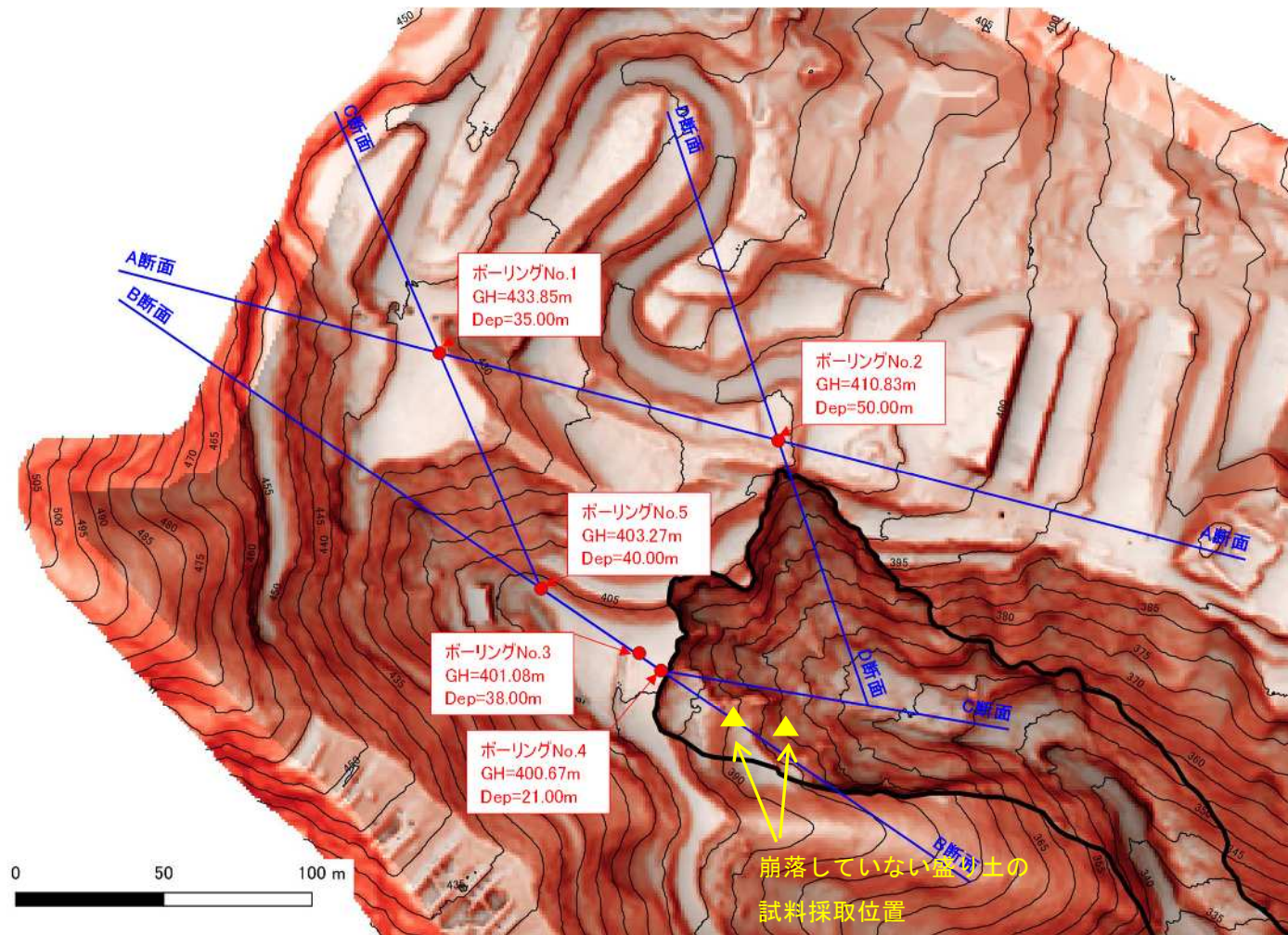


図 5-18 土質試験資料採取位置図

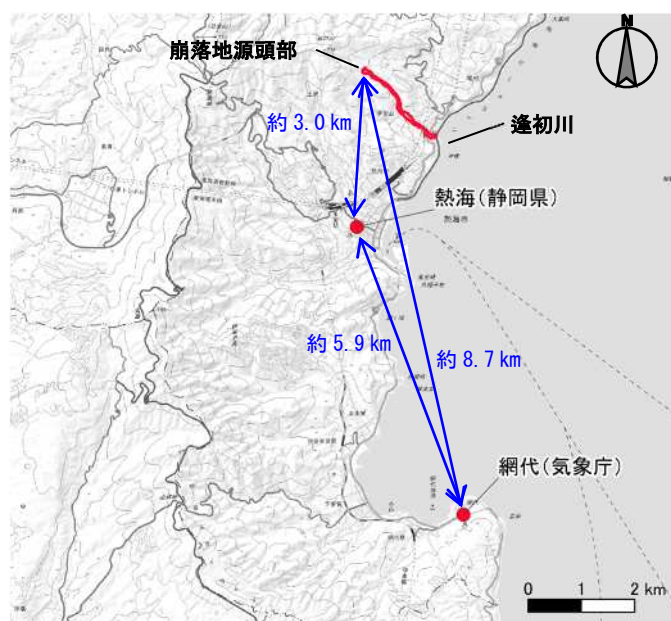
5.5 災害発生時の降雨規模の評価

5.5.1 使用する雨量データの検証

第1章でも示したとおり、災害発生時の降雨は、1時間雨量としては既往最大に及ばないものの、長時間雨量では既往の降雨を上回る降雨であったことが確認されている。そこで、水文統計手法に基づき降雨の確率規模を評価し、災害発生時の降雨確率規模を把握することとした。

一般に確率評価が可能な再現期間は、「使用した雨量観測期間の2倍程度」とされるのに対し、逢初川に最も近い熱海雨量観測所（静岡県）は、観測期間が1985年以降の35年間となる。今回の災害は、既往最大を記録する降雨であることから、より長い期間の雨量データが必要であると考え、1937年以降85年間の降雨データが使用できる網代観測所（気象庁）の雨量データを使用した。網代観測所（気象庁）は、熱海雨量観測所（静岡県）より南に約5.9kmの位置にあり、網代湾の南側に位置しており、距離的に最も近くかつ長期の降雨観測が実施されている観測地点である。

近年の降雨データ（2009年～2019年）で、両観測所について3日間雨量及び時間雨量を比較した結果、高い相関が得られたことから、確率評価結果にはより長い観測データのある網代地点を採用した。



出典：地理院タイルに雨量観測地点、土砂移動範囲を加筆した。

図 5-19 雨量観測地点位置図

表 5-4 雨量観測所諸元

	網代	熱海
設置者	気象庁	静岡県
観測期間	1937年～	1985年～
標高	65 m	19 m

表 5-5 災害発生時の雨量の比較

	網代 (気象庁)	熱海 (熱海)
最大時間雨量	27 mm 7月3日 9:00~10:00	24 mm 7月3日 9:00~10:00
最大24時間雨量	183 mm 7月2日 11:00~7月3日 11:00	260 mm 7月2日 8:00~7月3日 8:00
日雨量	140 mm 7月3日	235 mm 7月2日
2日間雨量	301 mm 7月2日~7月3日	394 mm 7月2日~7月3日
3日間雨量	411.5 mm 7月1日~3日	491 mm 7月1日~3日

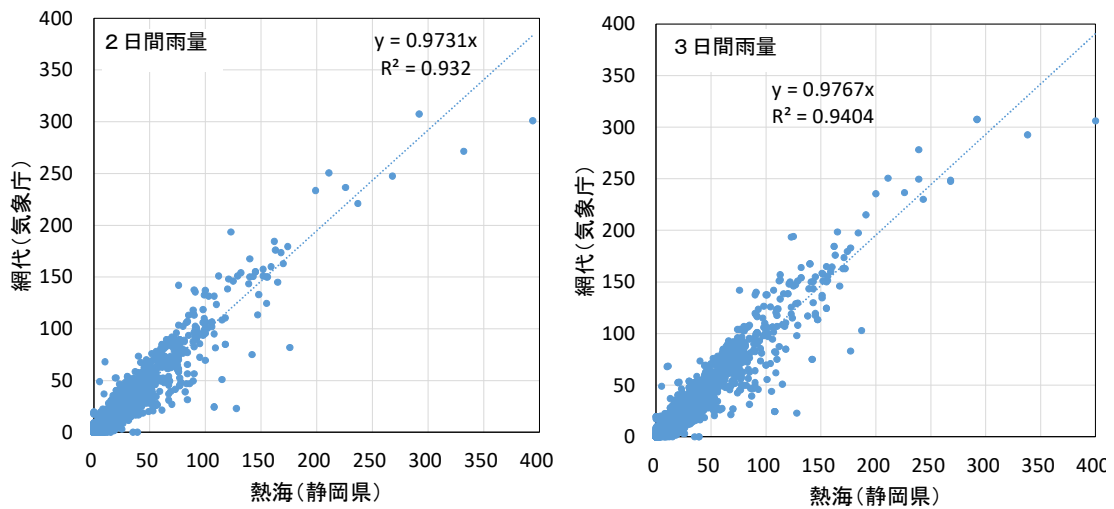


図 5-20 網代 (気象庁) 及び熱海 (静岡県) の降雨量の相関

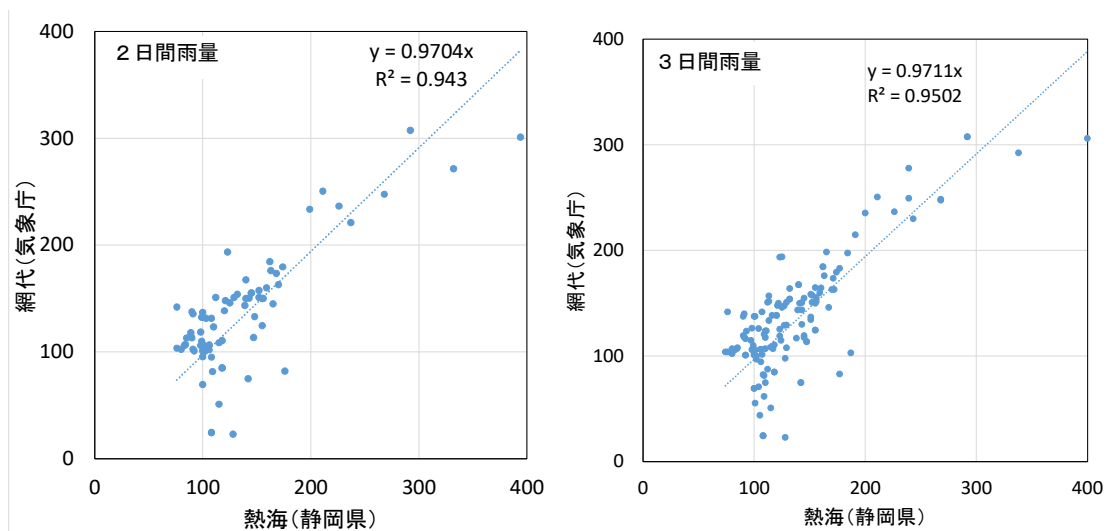


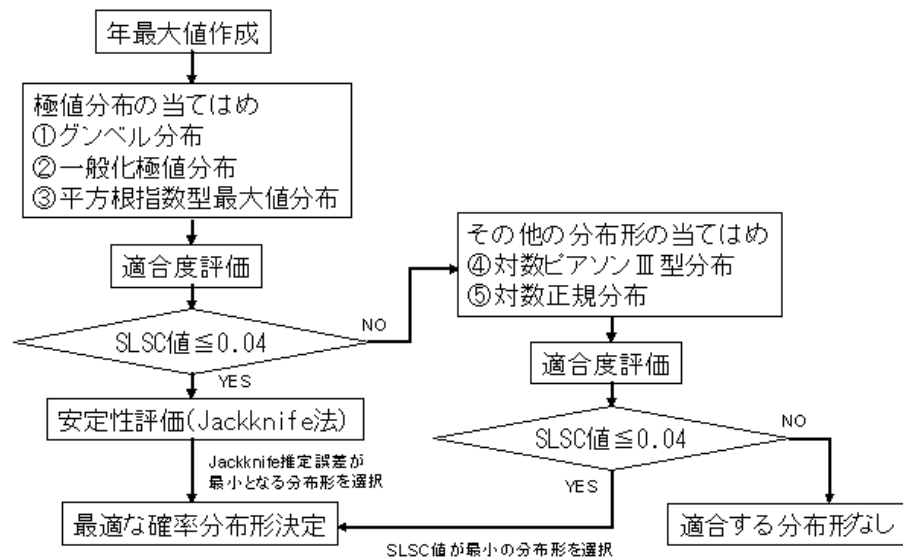
図 5-21 網代 (気象庁) 及び熱海 (静岡県) の降雨量の相関 (日雨量 100mm 以上の降雨を抽出)

5.5.2 確率評価結果

確率評価手法は、「中小河川計画の手引き」（国土技術研究センター）に従い、毎年の年最大雨量を用いて Jackknife 法¹により評価した。

その結果、1937 年以降 2020 年までの 84 年間の確率評価結果によると、災害発生時の降雨確率規模は、1 時間雨量で 2 年確率未滿、日雨量で 2～3 年で、3 日間雨量で 50～80 年となった。また、盛り土造成後から災害発生前までの間で既往最大であった 2014 年、2016 年と比較しても、災害発生時の 3 日間雨量 411.5mm は規模の大きい降雨であったといえる。ただし、3 日間雨量が 400mm を超える降雨は、1961 年、1982 年、2003 年に記録されている。

（注）近似する確率分布は、極値分布の 3 種類の分布で、SLSC²が 0.04 以下となる分布があれば、その中でジャックナイフ推定誤差の最も小さな分布を採用する（ここでは 100 年確率の推定誤差で評価）。3 種類の分布の SLSC が全て 0.04 より大きい場合は、残りの 2 種類の分布のうち、SLSC が 0.04 以下で小さい方を採用する。



出典：気象庁ホームページ

図 5-22 確率評価手法のながれ

¹ 標本となる観測値を 1 つずつ抜き取った場合の反復計算を実施し、統計処理における偏りを減少させる方法
² 「観測値をプロットングポジション公式で並べた場合」と、「確率分布から推定した場合」との確率降水量の差を指標化したもの。プロットングポジション公式とは、経験的に求められた公式で、観測値の個数・順位と再現期間との関係を数式化したもの。

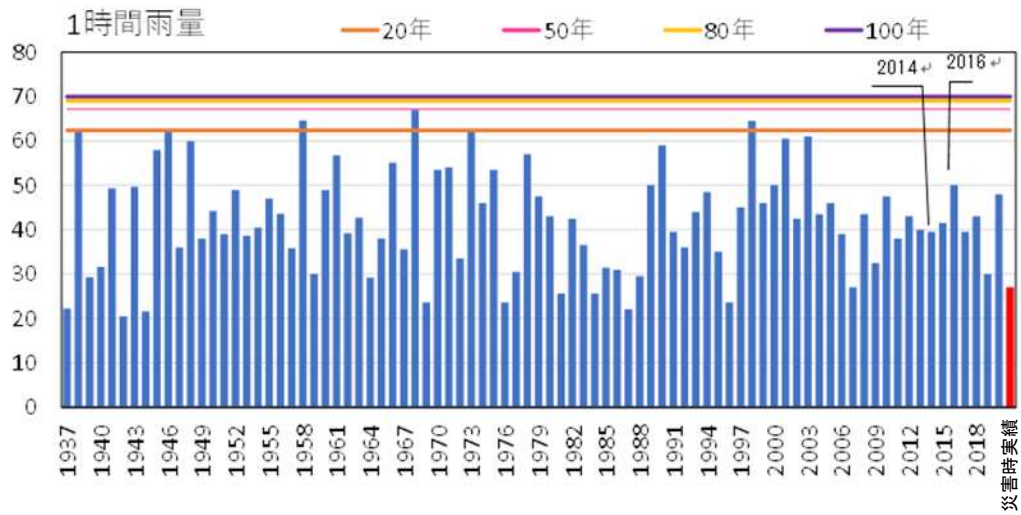


図 5-23 年最大値と確率評価結果の比較（時間雨量）

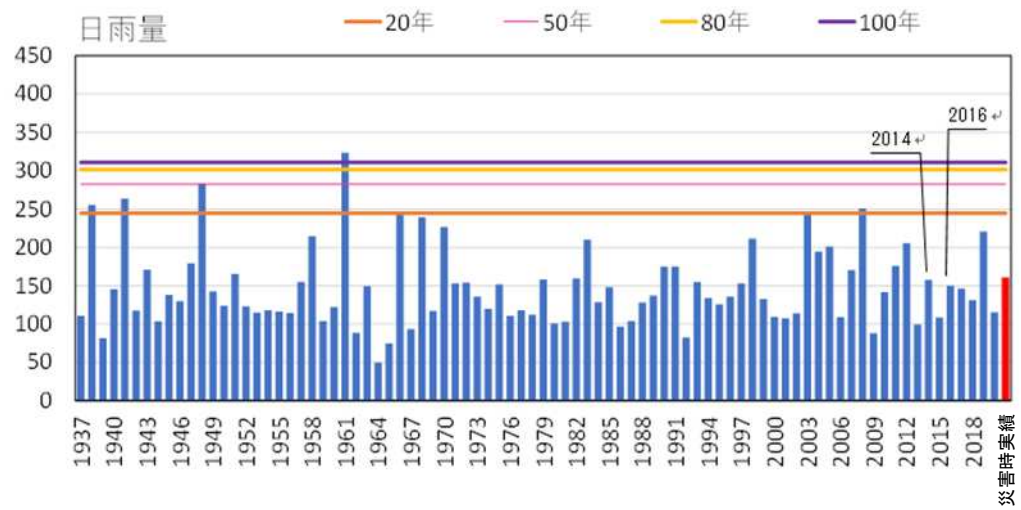


図 5-24 年最大値と確率評価結果との比較（日雨量）

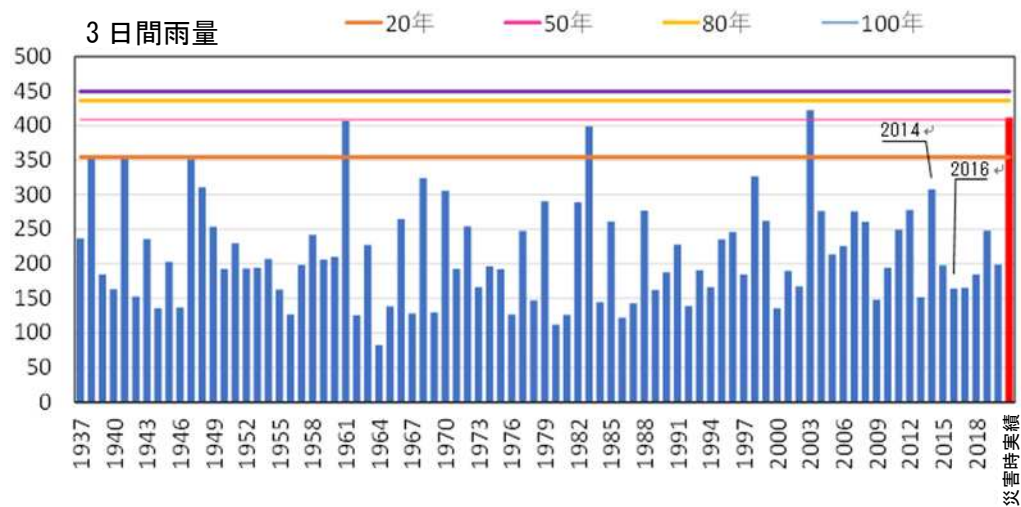


図 5-25 年最大値と確率評価結果との比較（3日間雨量）

5.6 地下水上昇からみた降雨の評価

崩落・土石流の発生を支配する地下水への影響を評価するため、土壌雨量指数³により災害発生時の降雨を評価した。土壌雨量指数は、気象庁で採用されている降雨指標であり、Ishihara・Kobatake (1979) の直列3段タンクモデル⁴により計算された地下水の指標である。タンクのパラメータは、気象庁が比較検証の上、全国一律のパラメータが採用されている。

空中写真により盛り土の造成がほぼ完了したと確認できる2012年12月以降の熱海雨量観測所（静岡県）で観測された時間雨量データをもとに、土壌雨量指数を算出した。その結果、72時間雨量と同様に土壌雨量指数としても既往最大であることが分かった。それとともに、6月25日以降に着目してみると、7月3日以降急激に土壌雨量指数が増加し、またその中でも流出の遅い地下水を表現しているといわれる3段目のタンク値が上昇し、土壌雨量指数を構成する1～3段のタンク値で最も高い値となっている。このことは、災害発生当時の6月28日以降の断続的な降雨に続き7月1日以降時間10mmを超える降雨が継続したことにより、流出の遅い地下水により地中の水分量が非常に高まった状態を引き起こす降雨の時間変化であったといえる。なお、計算初期値を2012年12月1日1時のすべてのタンク値を0mmとして計算しているが、2016年1月1日、2021年6月1日を初期値として計算した結果と比較してほとんど差が認められないことを確認している。

表 5.6 土壌雨量指数の算出に用いるタンクモデルのパラメータ

	一段目	二段目	三段目
流出孔の高さ (mm)	$L_1=15$ $L_2=60$	$L_3=15$	$L_4=15$
流出係数 (1/hr)	$\alpha_1=0.1$ $\alpha_2=0.15$	$\alpha_3=0.05$	$\alpha_4=0.01$
浸透係数 (1/hr)	$\beta_1=0.12$	$\beta_2=0.05$	$\beta_3=0.01$

α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 : 各流出孔の流出係数
 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 : 各流出孔の高さ
 S_1 、 S_2 、 S_3 : 各タンクの貯留高
 β_1 、 β_2 、 β_3 : 各タンクの浸透流出孔の浸透係数
 q_1 、 q_2 、 q_3 : 各タンクの側面孔からの流出量

出典：気象庁ホームページ

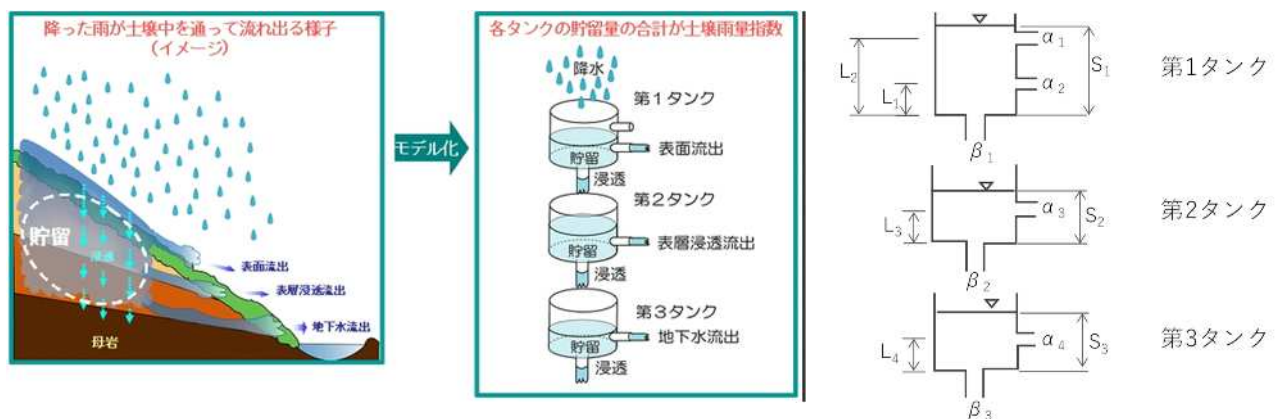


図 5-26 タンクモデルイメージ（出典：気象庁ホームページ）

³ 降った雨による土砂災害危険度の高まりを把握するための指標。土壌雨量指数そのものは相対的な土砂災害危険度を示した指標があるが、過去の降雨時と比較することで、土砂災害発生の危険度を比較することができる。三段のタンクの水位（図 5-26 における S_1 、 S_2 、 S_3 ）の総和で示す。

⁴ 雨が土壤中を流れて流れる様子を孔の開いたタンクによりモデル化し、地下水をタンクの貯留量、地下水・表流水などの流出量をタンクからの流出として表現できる。

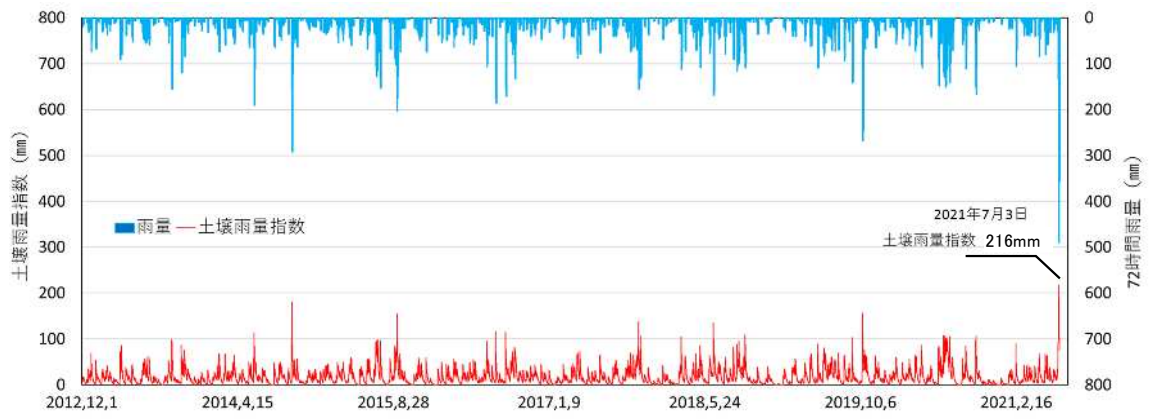


図 5-27 2012 年以降の 72 時間雨量及び土壌雨量指数の変化

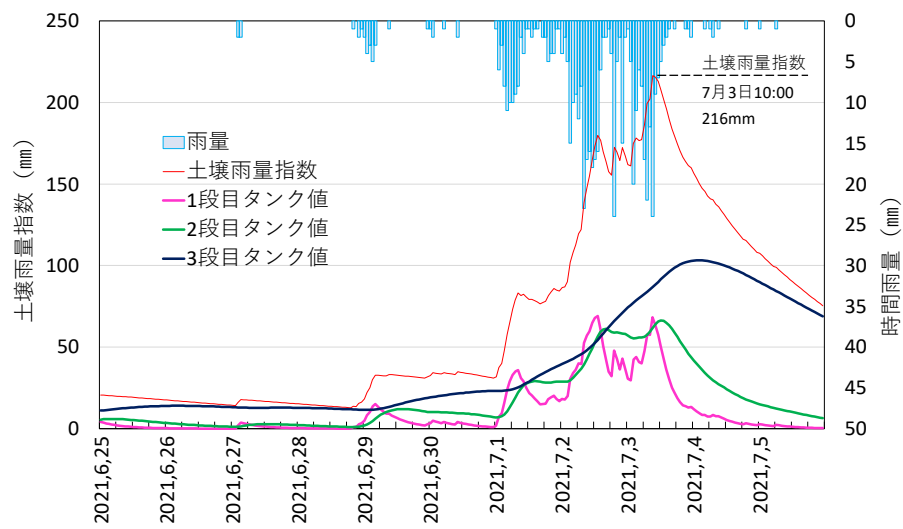


図 5-28 2021 年 6 月 25 日以降の時間雨量及び土壌雨量指数の変化

5.7 降雨の特異性

崩落地に最も近い熱海雨量観測所（静岡県）の雨量観測データ及び雨量観測期間が長く、熱海雨量観測所（静岡県）の雨量データとも相関のある網代観測所（気象庁）の観測データをもとに、崩落発生時の降雨特性について、既往の降雨履歴との比較を中心に検討した。

その結果、災害発生時の降雨は、時間雨量としては特筆するものではないが、特に3日間雨量（およそ72時間雨量に対応）は、確率規模50年～80年確率規模に相当し、盛り土完成（2012年頃）以降、最大値を記録した（図5-25）。なお、参考として熱海雨量観測所の3日間雨量では、観測開始の1985年以来の最大を記録している（図5-29）。

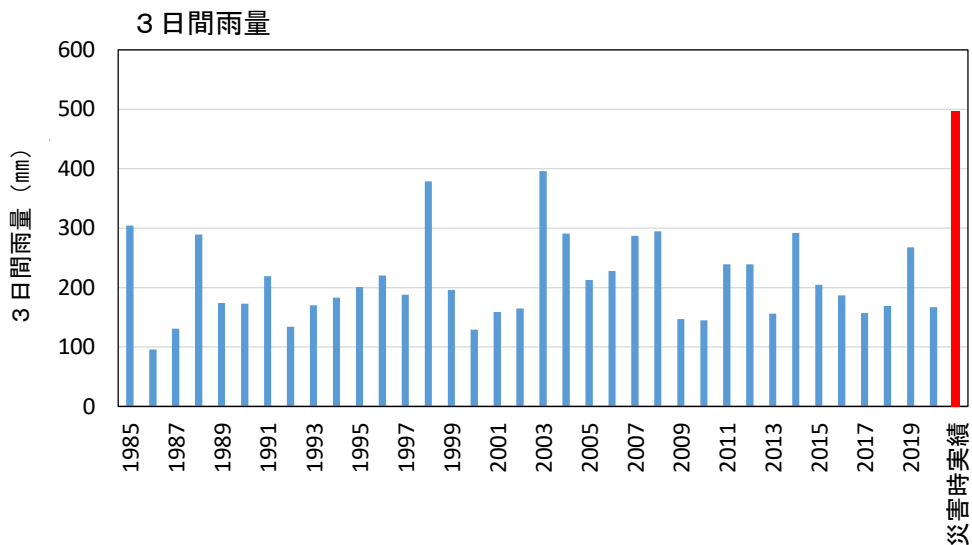


図 5-29 3日間雨量年最大値（熱海雨量観測所（静岡県）1985年～）

この降雨について、土中の水分量の指標となり土砂災害警戒情報の基準にも使用されている土壌雨量指数及びその算出根拠となるタンク値の時間変化を確認すると、より流出の遅い3段タンクが急激に上昇過程にある中で土壌雨量指数がピークを迎えていることが分かった。（図5-28）。

従って、崩落発生誘因となる降雨の特性として以下のことが言える。

- ・災害発生時の3日間降雨は、盛り土造成後で最大の雨量であった。
- ・崩落発生時（7月3日10時）は、降雨波形として、3段のタンクで仮定する3種類の異なる流出時間をもつ地下水の指標値がいずれも上昇傾向を示す状態であった。

これらから、崩落した盛り土には、非常に大量の地下水が供給されたと考えることができる。

5-8 表流水関係の論文

5.8.1 論文

地形改変前地形と地形改変後における地表水の流出特性について、解析ソフト（AFREL-SR）を使用して比較検討を行った研究「中野晋・蔣景彩・上月康則（2022.1）：熱海市土石流災害に関する雨水流出過程からの考察」（発表先：土木学会四国支部自然災害フォーラム）においては、崩落前に逢初川の左岸側の源頭部から崩落地へ多量の地表水が流入されたとの計算結果が報告された。



図 5-30 地形改変前地形の累積通水量を表す図
(中野晋ら（2022.1）発表を一部加工)

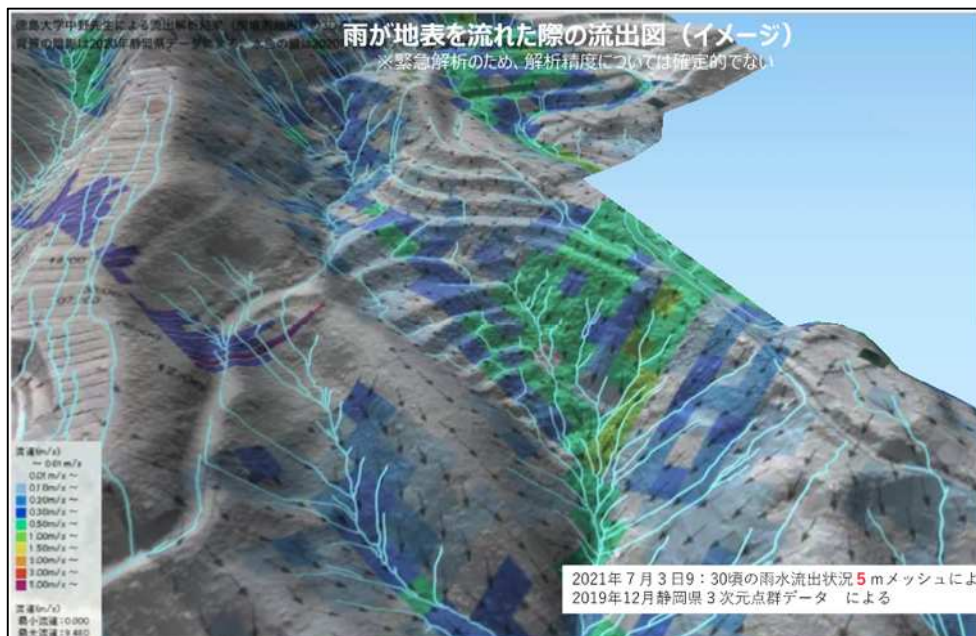


図 5-31 3次元点群データを用いた流出図
(第1回逢初川土石流の発生原因調査検証委員会資料)

その後、「中野晋・蔣景彩・上月康則（2022.6）：逢初川上流部での地形改変と土石流発生との関連性」（発表先：河川技術論文集、第28巻）では、地形改変による集水域の変化により盛り土

末端部では地形改変前の4倍に達する表流水が通過した可能性があることが明らかとなり、分水嶺付近における地形改変にはこうした問題が生じる可能性があることに留意して調査、計画作成することが重要であると報告された。



図 5-32 最大浸水深分布（土砂崩壊前地形）
（中野晋ら（2022. 6）発表）

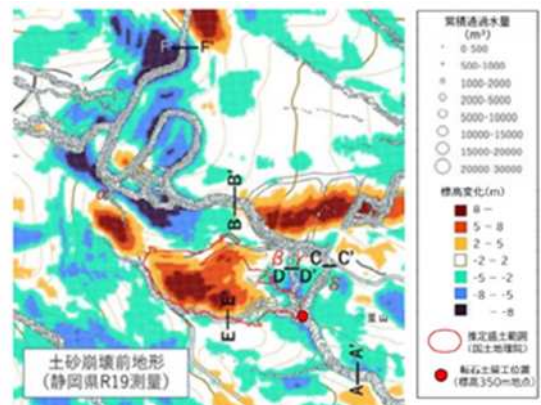


図 5-33 累積通過水量の計算結果
（土砂崩壊前地形）（中野晋ら（2022. 6）発表）

5. 8. 2 県の見解

中野氏らの通過水量はC-C' 断面は0.08m³/s、D-D' 断面は0.05m³/s（図5-33）であり、そうであれば流水痕が確認できるはずである。崩落発生後の県の現地踏査においては、崩落地左岸側尾根部に明確な流水痕は視認されてなかった。中野氏の見解のような表流水が集中して流入した可能性は低いと考える。

しかし、中野氏らによる分水嶺付近における地形改変の指摘については、今後の開発計画において大変重要な視点である。

5-9 地質・水文調査の総括

5.9.1 ボーリング孔で得られた流向・流速

ボーリング孔で得られた流向・流速を図 5-34 に示す。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、崩壊地内の湧水点に相当する深度（図 5-35）において、北に隣接する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 No. 3 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程の極めて透水性の高い層が存在した。

図 5-34 に示した測線 A-A'（盛り土前地形の逢初川溪床を結んだ線）及び測線 B-B'（左岸側崩落地の中心を結んだ線）に対して、1967 年、2019 年及び 2021 年の地形データから断面図を描いたのが図 5-35 である。図 5-35 には、ボーリングによる地質区分と流向・流速、地下水検層による塩水希釈範囲及び崩落後の湧水地点を重ねて示した。

図 5-35 より、No. 3 の盛り土底面付近の高透水層は逢初川の溪流堆積物であり、ここを流下する地下水が盛り土末端部付近の地山露出地点で湧水となって流出していると推定される。また、No. 3 ほど流速は速くないが、No. 2 の基岩内の地下水流動層も、崩落地下部の湧水地点に一致している。これらより、崩落した盛り土へは少なくとも以下の二つの地下水供給ルートがあったと考えられる。

- 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）

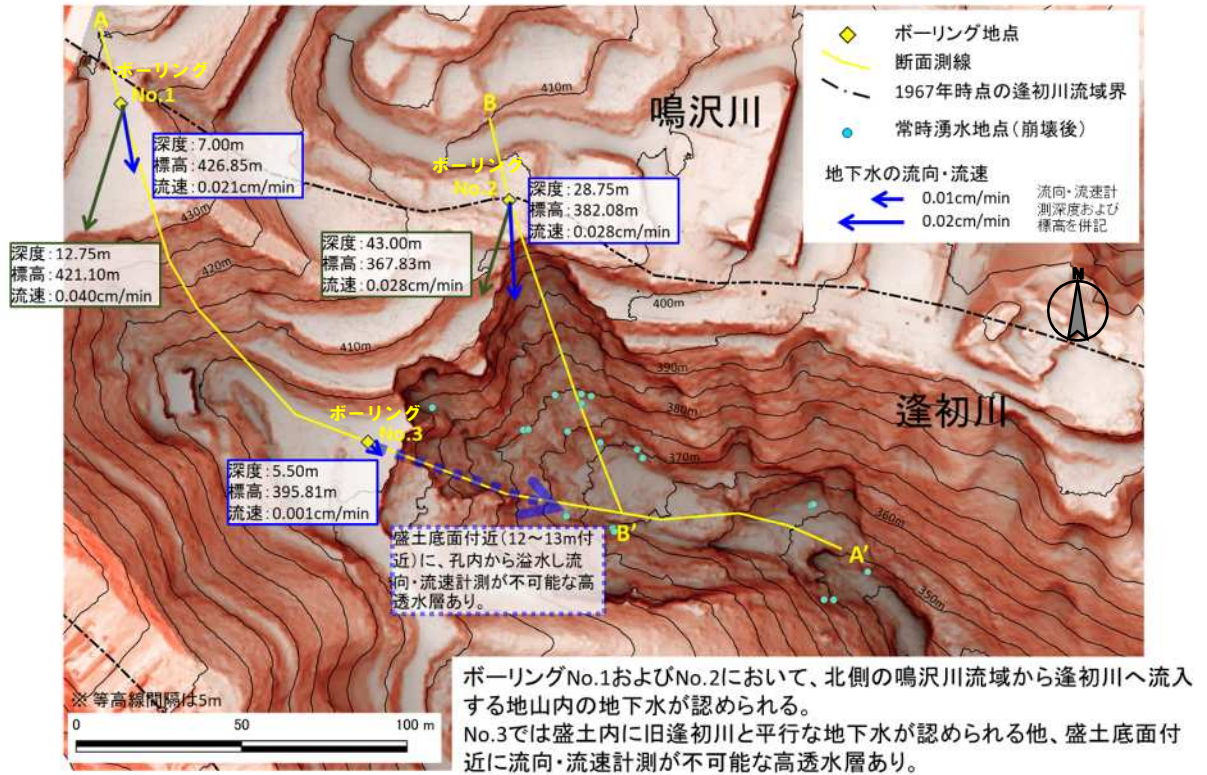


図 5-34 ボーリング孔における流向・流速計測結果

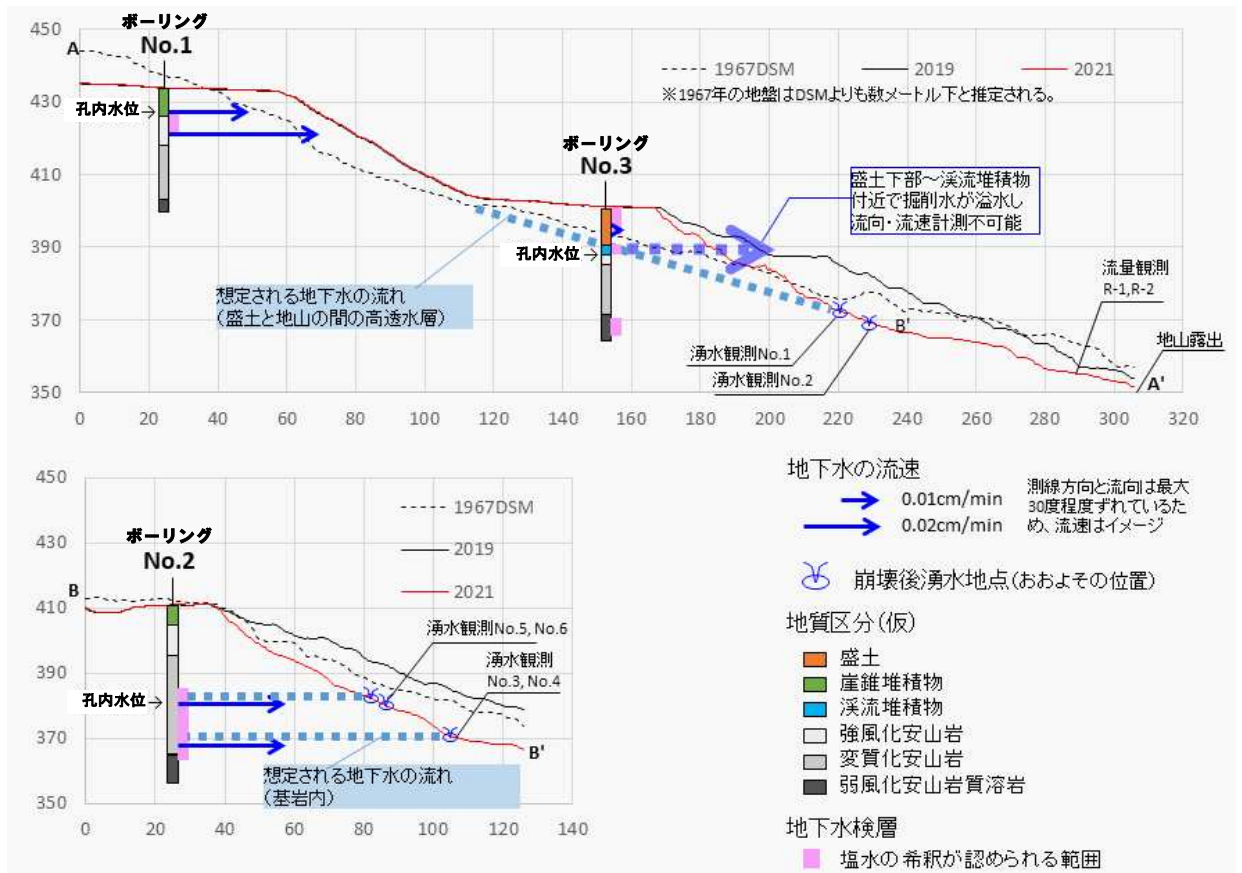


図 5-35 測線 A-A'および測線 B-B'の断面図

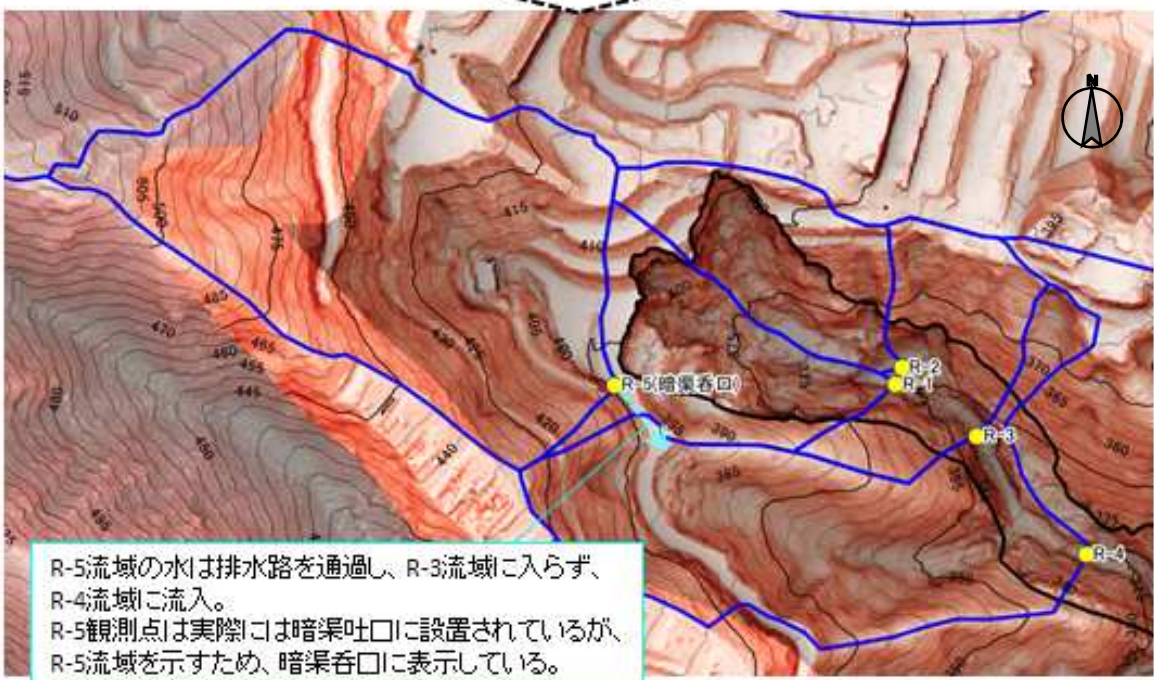
5.9.2 三角堰による流量観測

次に、崩落地内における三角堰による流量観測の位置図を図 5-36 に示し、集水面積及び上下流関係を図 5-37 に示す。

各観測点における流量時系列（図 5-39）より下記のことが分かる。

ただし 11 月 29 日～12 月 4 日の期間は三角堰への土砂堆積により正常に観測できていないためグレーで網掛けしている。

- ・ R-1、R-2、R-3、R-4 は無降雨時にも、大きく変動しない連続した流量が確認できる。これは逢初川には常に地下水が供給されていることを示唆する。（基底流量が存在）
- ・ R-5 は無降雨期間では流量はゼロであるが、降雨後すぐの流出が見られる。R-5 は排水溝の流入であり、主として地表流として流下している流量を観測していると考えられる。
- ・ 一方、表 5-7 で R-5 の流出の総量と降雨の総量を比較すると、集水面積に降った雨の総量（4,380m³）に比べて R-5 への流出量（297m³：約 7%）が小さいことから、降雨の大部分は地中に浸透していることが伺える。
- ・ R-6 は広い集水面積を持っているが、それに対して観測流量が極めて少ない。
- ・ R-6 は元の鳴沢川の埋立てにより暗渠となった部分の出口にある。周辺の埋立てにより、元の鳴沢川に設置された暗渠への降雨流入量が減少し、主に道路の側溝などからの排水が流量になっていると考えられる。
- ・ 広い集水面積を持つ鳴沢川の上流域に降った雨は、元は鳴沢川にその一部が流下するが、鳴沢川の上流が埋め立てられたことにより、森林内で地下浸透し、地下水として流下するようになった。これにより、鳴沢川上流域の水の流れが変わり、地下水量が増え、その一部がより標高の低い逢初川に流れやすくなったことも考えられる。



※R-5の暗渠は災害発生後に、上流域からの表面流を崩壊地内に流出させないために設置した。

図 5-36 三角堰による流量観測点の位置図

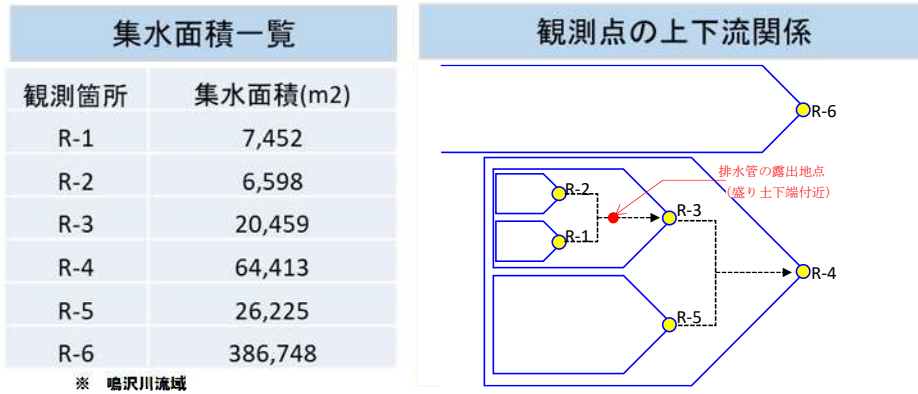


図 5-37 流量観測点の集水面積と上下流関係

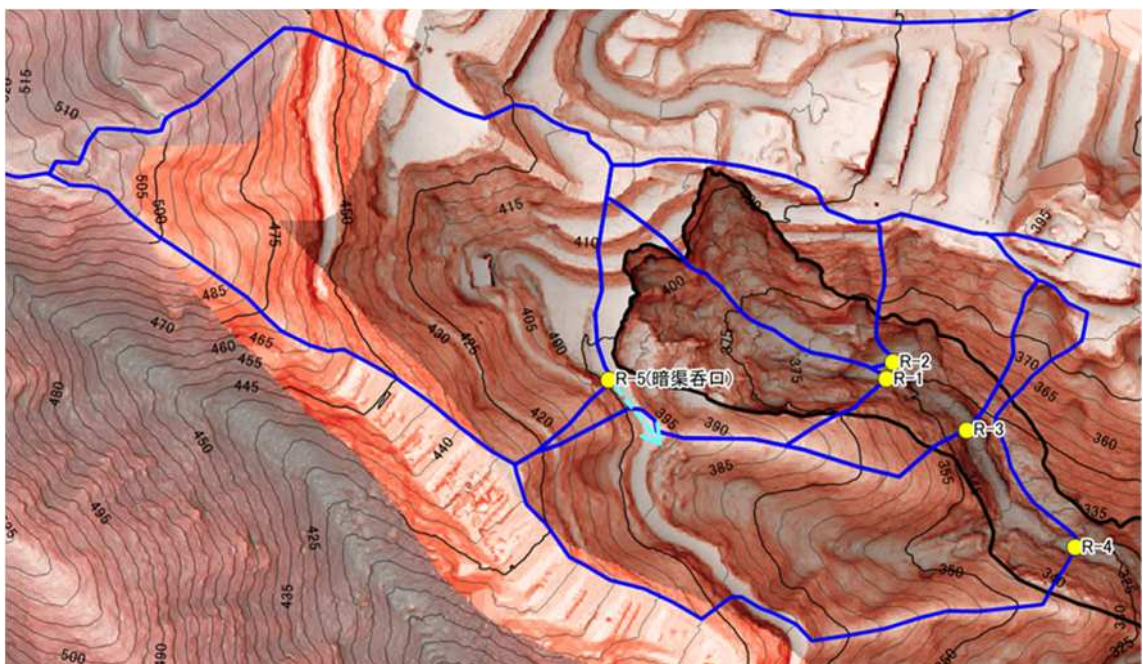


図 5-38 流量観測点位置図

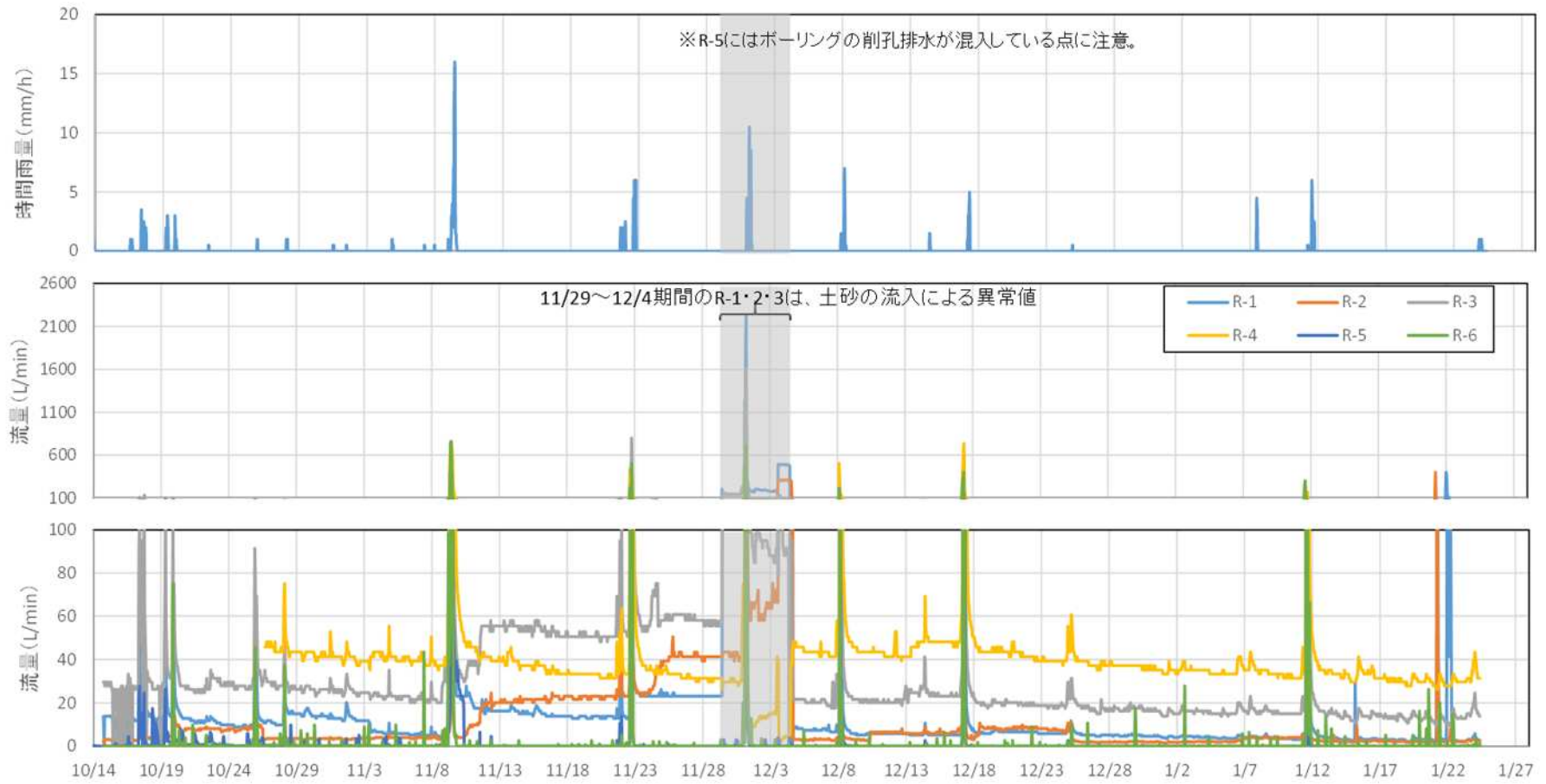


図 5-39 流量観測結果

次に、崩落地下端付近に位置する R-1、R-2、R-3 に注目する。図 5-40 の中段には R-1、R-2、R-3 の各地点の流量に加えて R-1 と R-2 を合計した流量を示す。

また同じく下段には、それらの総量（10 月 14 日からの累積値）と、それぞれの集水域内に降った雨の総量（10 月 14 日からの累積値）を示す。この図からは流量の観測期間は短いが下記の傾向が伺える。

- R-1 と R-2 の合計（赤線）よりも R-3 の流量が大きいことから、R-2～R-3 間（排水管露出地点がある）で新たに地下水が浸み出していることに加え、R-3 から R-1+R-2 を引いたものが R-1 の流量変化と近似している。
- R-3 の流量は、R-1 と同様に逢初川右岸側からの流入量が多いことを示している可能性がある。
- R-1 と R-2 を比較すると、R-1 は降雨後なだらかに流量が低減することが多い。これに対して R-2 は、降雨後数日して流量が増加する（11 月 10～12 日や 11 月 24 日～26 日）変化を見せる。このことから、逢初川の源頭部の左岸側からの流入する地下水は岩盤層をゆっくりと浸み出した地下水の流入する可能性が伺える。
- 流出の総量と降雨の総量（降雨強度（mm/s）×集水面積×期間）を比較するといずれの観測点においても、流出（実線）が降雨量（破線）を上回っている。これは流域外からの地下水流入の可能性を示唆する。
- R-1、R-2、R-3 は降雨後、流出の総量が降雨の総量を上回るが、R-1 は R-2 や R-3 に比べて降雨後比較的早い段階で上回り、また R-2 に比べて上回る総量も多い。これは R-1 が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を示唆している。
- 11 月 10 日頃から降雨後の No.2 ボーリングの水位低下に合わせて、R-2 の流量が増加している。まとまった降雨後には地下水流動が活性化して鳴沢川からの地下水の流入量が増加する可能性があることが示唆される。

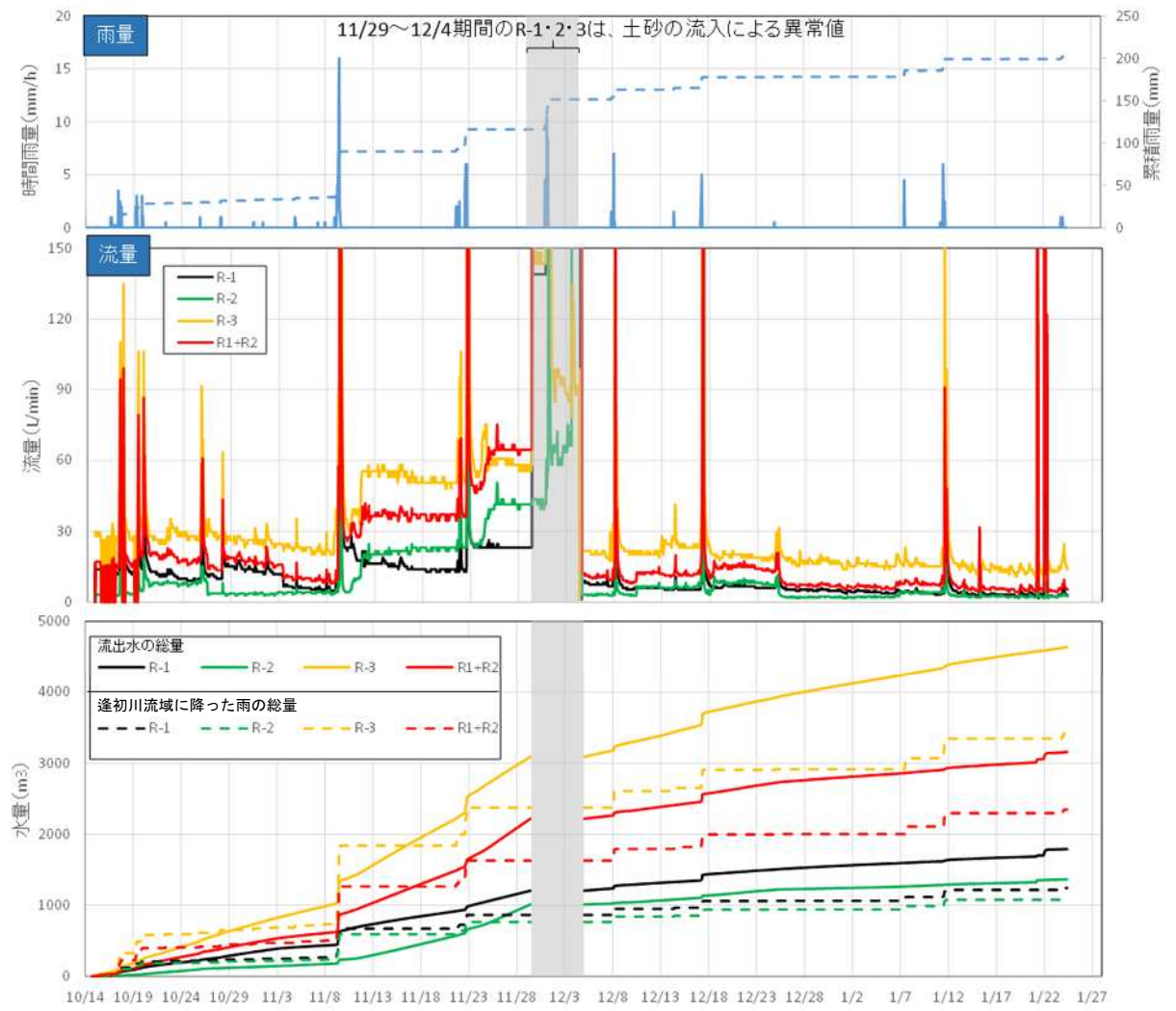


図 5-40 R-1、R-2、R-3 の流量比較

R-4、R-5、R-6 についても同様のグラフを作成した。流出の総量と降雨の総量を比較すると、R-1、R-2、R-3 とは逆にいずれの観測点においても降雨量（破線）が流出量（実線）を上回っており、特に R-5 と R-6 でその傾向が著しい。これは集水域内に降った雨の大部分が集水面積内で表面流にならず、地中へ浸透したり、蒸発散で失われていることを意味する。

ここで蒸発散量については特定が難しいが、森林地域では 10 月～1 月に 0.5～2mm/day 程度との報告があり⁵、図 5-41 の期間にこれを適用すると 51～204mm となる。図 5-41 の累積雨量が 200mm 弱であるので蒸発散量の影響はかなり大きい可能性があり、雨の総量と流出の総量の差が全て地中に浸透し表面流出していなかったと考えるのは適切ではない。

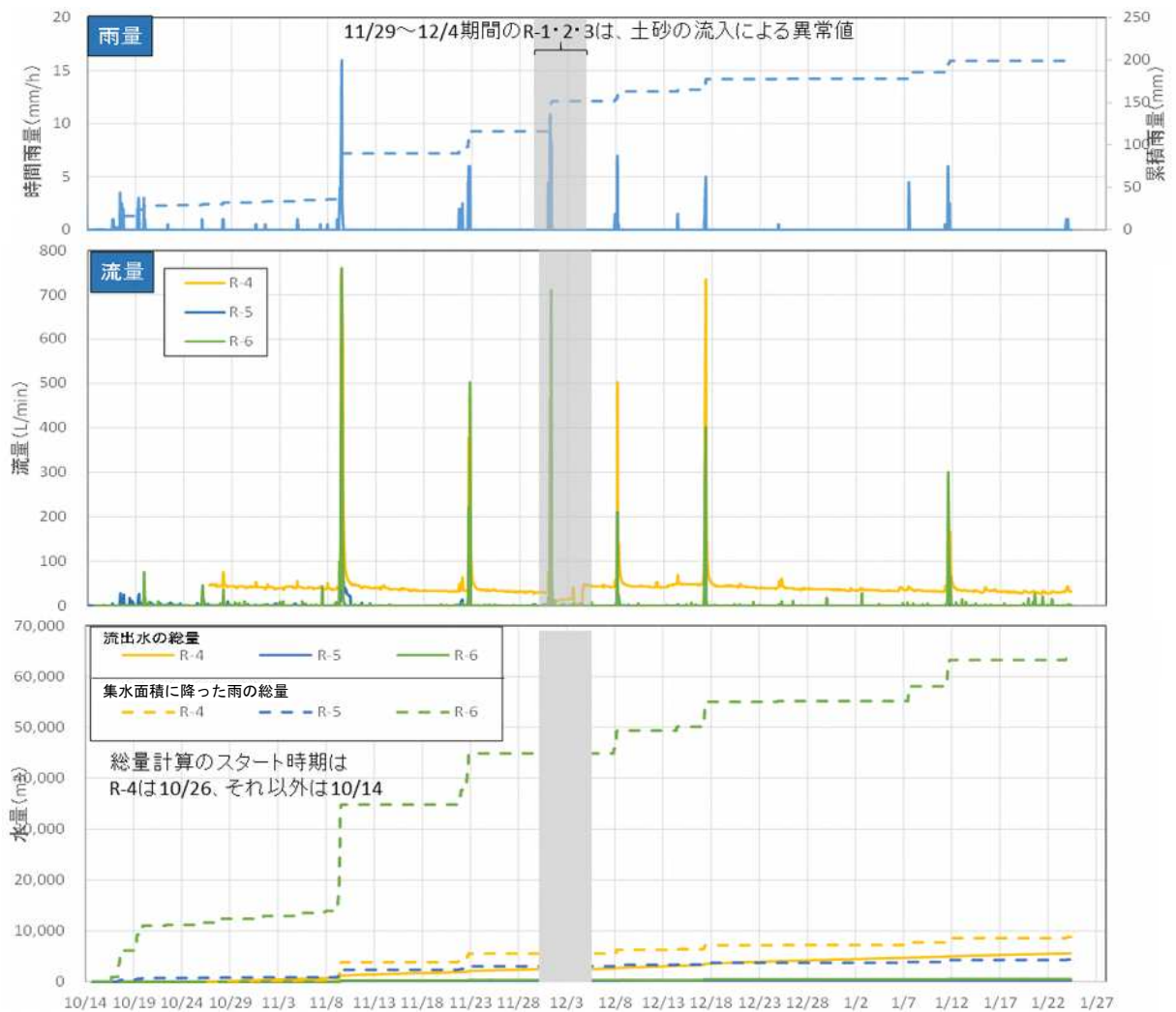


図 5-41 R-4、R-5、R-6 の流量比較

⁵ 鈴木雅一（1991）：森林からの蒸発散、水文・水資源学会誌、Vol. 4, No. 2, p. 9-22 の 図-2 からの読み取り。

流出の総量と、それぞれの集水域内に降った雨の総量の比較を表 5-7 に示す。ただし流出量・雨量とも 11 月 29 日～12 月 4 日の観測値は除外して算出したものである。

ここでは降雨による水量のうち、どれだけの割合が観測点に流出したかを「流出率」として最右欄に示した。前述のグラフで見たように、R-1、R-2、R-3 は流出の総量が雨の総量を上回っているため流出率が 100%を超えていることから、集水域外からの地下水流入が推測される。一方、R-5 は流出率 7%、R-6 は 1%とわずかであることから、地中への浸透や蒸発散による消失が大きいと思われる。

R-1 と R-2 を合計した流出の総量は 3,156m³であるのに対して、R-3 からの流出は 4,641m³であり、その差は 1,485m³である。つまり、R-1 および R-2 での流量の半分程度に相当する量が、それより下流の R-3 までの間で湧出していることになる。

表 5-7 流出と降雨の総量の比較

	流出水の 総量 ① (m ³)	総雨量 ② (mm)	集水面積 ③ (m ²)	流域内に降った 雨の総量 ④=②×③/1000 (m ³)	流出率 ①/④ (%)	参考 ①/③ (m ³ /m ²)
R-1	1,791	167	7,452	1,244	144%	0.240
R-2	1,365	167	6,598	1,102	124%	0.207
R-3	4,641	167	20,459	3,417	136%	0.227
R-4	5,607	137	64,413	8,825	64%	-
R-5	297	167	26,225	4,380	7%	0.011
R-6	591	167	386,748	64,587	1%	0.002
R-1+ R-2	3,156	167	14,050	2,346	134%	0.22
R3- (R-1+ R-2)	1,485	167	6,409	1,070	139%	0.23

流出水および雨量の集計期間は

R-1, 2, 3, 5, 6 は10/14～1/24

R-4は 10/26～1/24

ただしいずれも11/29～12/4は除外している。

5.9.3 盛り土への地下水流入状況のまとめ

以上で得られた各種調査結果より、盛り土への地下水流入状況についてまとめる。

- ① 盛り土前の地形を図 5-42 に示す。V字谷をなす逢初川に対し、鳴沢川には岩戸山からの崩壊土砂が厚く堆積しているため水面が高く、その結果、逢初川源頭部の溪床は鳴沢川より 20m～30m 程度低い位置にある。
- ② 崩落後のボーリング No. 1 と No. 2 では、地中を通して鳴沢川流域から逢初川流域へ向かう地下水の流れが確認されている。また、電気探査等においても、両河川の流域方向（尾根）の下部の地中に水分量が高い領域があることが確認された。
- ③ この地下水の流出先は、逢初川の源頭部の谷地形であると考えられる。一般に、地下水が地表に出やすいところに谷頭部が形成されることから、これらの地下水の流れは盛り土前から存在したと考えられる。
- ④ このように、もともと逢初川は鳴沢川から地下水が流入しやすい環境であったと考えられる。鳴沢川よりも逢初川が極端に深い谷地形になっているのは、鳴沢川が岩戸山堆積物で覆われている一方、逢初川では地下水が流入して谷で地表に流出することにより、より侵食が進みやすかったためと考えられる。
- ⑤ この傾向は、開発によって鳴沢川の上流部が埋め立てられたことにより、より強まった（鳴沢川流域から逢初川流域への地下水流入量が増した）と考えられる。

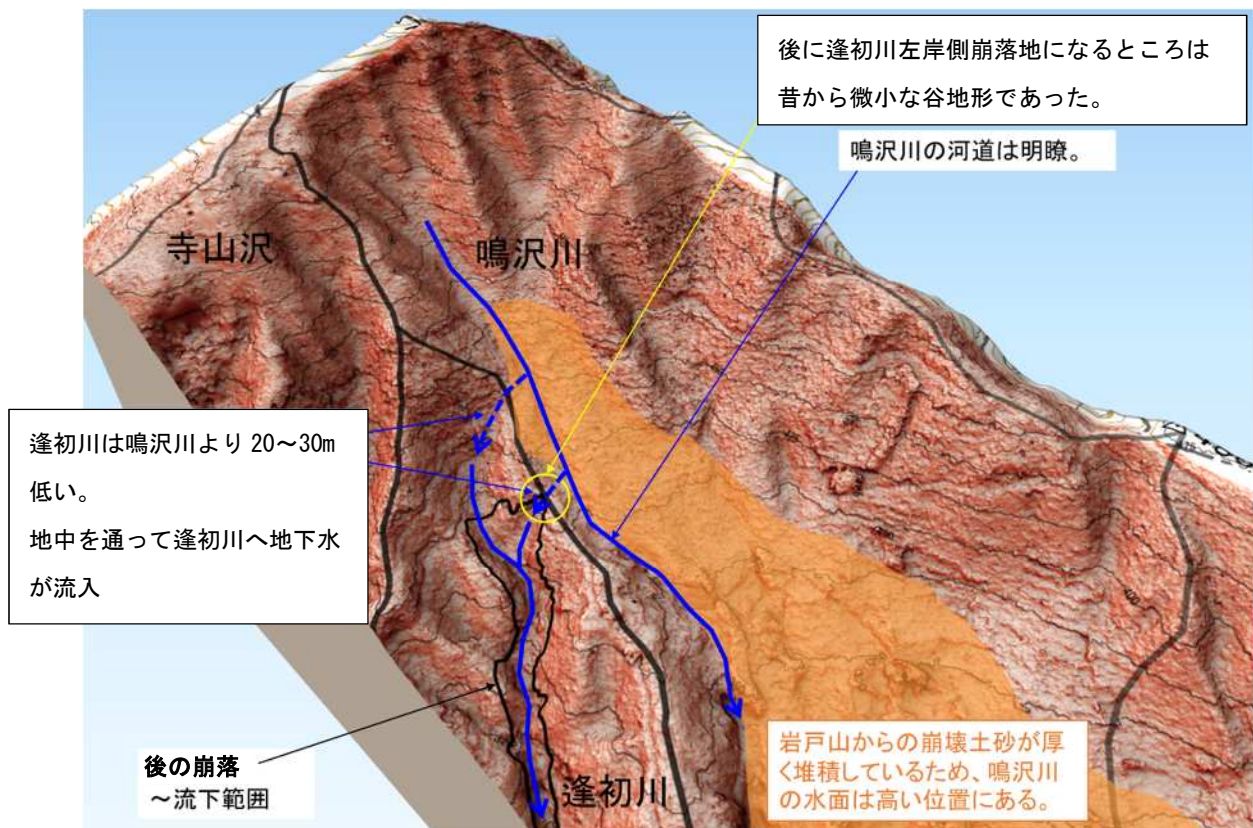


図 5-42 盛り土前の地形と、推察される水の流れ（背景は 1967 年 DSM による鳥瞰図）

図 5-43 に、盛り土後の地形を示す。鳴沢川の河道は宅地盛土や道路盛土によって埋没し、河道位置も分からないようになった。

- ⑥ 一方で逢初川には、今回の崩落源となった谷埋め盛り土が形成された。5.7.2 で述べたように、鳴沢川は周辺の埋立てにより、地下水の流れが変わり、より標高の低い逢初川に流れやすくなり、鳴沢川流域から逢初川流域への地下水の流入が増した可能性が考えられる。また、崩落源の上部にも谷埋め盛り土が形成され、これにより、逢初川上部の溪流が埋没し、以前は沢水となって流下していた水（逢初川流域の降水による表流水及び鳴沢川流域からの地下水の一部の湧出水）が、私道（標高 400m）上部においても盛り土内を流れるようになったと考えられる。
- ⑦ このことは、主に逢初川流域からの地下水が湧き出すと考えられる湧水点No.1 において、2022 年 7 月に左岸側の湧水点では見られないような非常に大きな湧水量（約 30L/分）が観測されたことから推察できる（図 5-3、P2-8 写真⑩）。

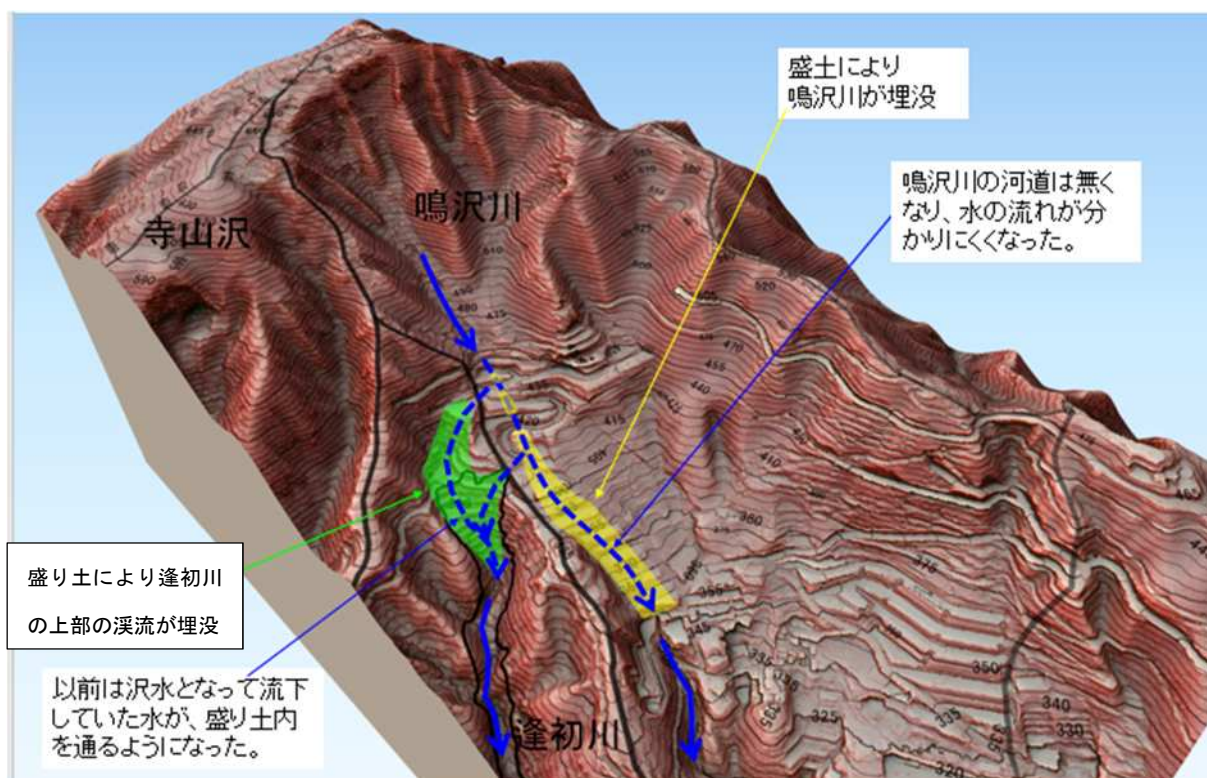


図 5-43 盛り土後の地形と、推察される水の流れ（背景は 2019 年 DEM による鳥瞰図）

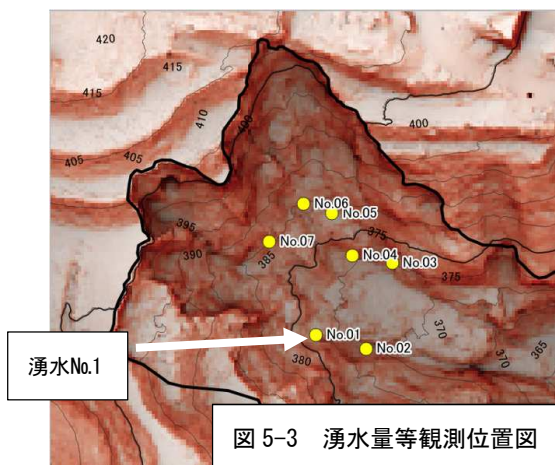


図 5-3 湧水量等観測位置図

⑧ 図 5-44 に、崩落後の地形と、ボーリング孔で観測された地下水流向及び熱赤外面像調査で得られた湧水点の位置を示す。ボーリング No. 1 で観測された地下水の流れは、盛り土前には逢初川源頭部の谷頭部付近で湧出していたと思われるが、私道下の谷埋め盛り土の後は、盛り土底部や盛り土内に流入するようになったと考えられる。

(注) ボーリング No. 3 では盛り土底部で流向流速計測ができない程の著しい逸水があったことから、盛り土底面に極めて高透水の層があることが分かっている。ボーリング No. 2 で観測された地下水の流れは、左岸側崩落地に向かっている。これらの地下水の流れが、崩落面に見られる湧水点の高さと対応している。図の赤枠部は盛り土の崩落部である。赤枠内の湧水点すなわち地下水の出口を盛り土が覆っていた形となっていたことから、盛り土内へ地下水が流入しやすい状態であったと推定される。

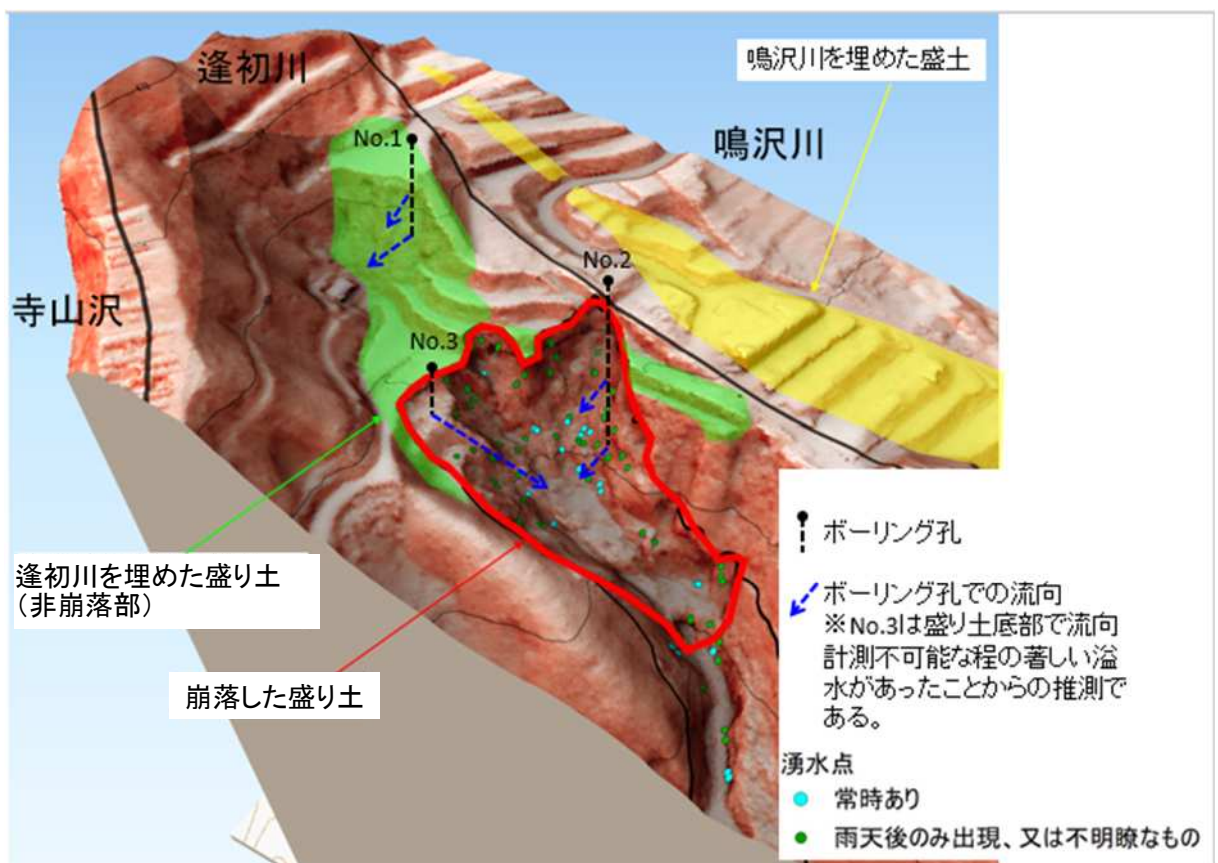


図 5-44 崩落後の地形と地下水の流向及び湧水位置（背景は 2021 年崩落後 DEM による鳥瞰図）