急勾配軽石層が広がるシラス地帯の地形改変と土石流発生の構造

TOPOGRAPHIC MODIFICATION AND OCCURRENCE MECHANISM OF DEBRIS FLOWS IN SHIRASU REGIONS FEATURING STEEP PUMICE LAYERS

上野 敏孝
Toshitaka UENO

株式会社郷土開発（〒890-0034 鹿児島市田上 4 丁目 5 番 17 号）
E-mail: t.ueno356@gmail.com

***Key Words**: shirasu,debris flow,topographic alteration,groundwater,piping*

1，はじめに

「上下に重なりながら地上と地下で流域面積に数倍の差がある」との知見を基に，少雨で狭小域に断続した土石流の究明に当たった．その機構と地形改変（以下，改変）のあり方との関係を考えた．

その対象は，鹿児島市五ヶ別府町の台地の南端（字菖蒲口）の，南北 100m幅，東西約 300m幅の狭い地域である。**図-1** に示すとおり，30 年を超える長年月土砂崩壊が反復、散見されてきた．

筆者は，延べ 8 回中の 5 回目に起きた崩壊の復旧工事と再発防止を土地所有者から受託した．「小さいエリアで長年崩壊が繰り返された」経過を聴いた上で，かつて 2 渓流の埋立てを含む改変と崩壊の関係を考察した．5 回目の復旧完了の翌年，工事した土地と渓流（堰堤群 5 基）との間の第三者の土地でも崩壊（6 回目）が起き，考察の対象にこれも加えた．

この現象の考察に当たっては，鹿児島大学下川悦郎元教授，同地頭薗隆元教授（以下，下川ら又は地頭薗ら）の鹿児島市松元町等における調査報告「シラス地域の水文地形とシラス斜面崖錘部の崩壊」[1]において，地形的分水界と地下水分水界が大きくずれているとの知見を参照した。そのずれの規模は，6.0 倍から 2.5 倍に上るとの知見に転換を迫られた．

以下，引用文以外には，地形的流域を地上水文，水文的流域を地下水文と言い換えることとする．

1999 年に起きた福岡県宮若市（旧若宮町）の山地崩壊（以下，若宮災害）でも，地上の分水界と乖離した状況で土石流が多発した，との報告もある．

これらは，鹿児島大学上田通夫元教授（以下，上田）が，1976 年のこととして「シラスの力学的性状の解明と防災技術の研究」[2]に，「原良団地のシラ



図-1 崩壊発生順と位置関係 Ⓐ（がけ崩れ 反復)→Ⓑ(崩土 反復)→©(土石流）→Ⓓ(土石流)→Ⓓ(崩土 反復)．流向が北及び 1988 年以前の資料不足の改変域は除いた．



図-2　Ⓒ土石流　○がパイピング

ス地山に掘った臨時貯水池の水が，約 300m離れた山麓に噴出した．事件はこの前後 2，3 回あり・・・（中略）・・・紫原の流出率調査資料で，20 ㎜の雨は流出ゼロであった（以降略）」と記していた問題にも遡る．

筆者は，「地上と地下の水文が乖離して動いていて，相似形でもない」の知見を基に，狭い流域での崩壊群への改変の影響を探り，急勾配の降下軽石層（以下，軽石層）との関係をマクロ的に見直すこととする．

初めに，上述の諸要素が水供給の連鎖機構を増長させたのではないかと言う観点から，地下水文の変容を推考していくこととする．一方、シラス地帯を外れるが，若宮災害に携わった山部鉄朗技術士（以下，山部）が「土砂災害と地下水について」[3)]で報告している，地上の分水界と乖離した状況で土石流が多発した共通性も参考に，改変や地層データから考察した内容とリスク対策のあり方を考察する．

２，事例の概要と地形及び地上水文

土砂崩壊の背景を述べ，地下水の関与を述べる．

(1) 位置関係と概要

本ケースの立地（以下，対象地）と土砂崩壊の場所を**図－１**においてⒶ，Ⓑ，Ⓒ，Ⓓで示す．

崩壊の発生順はⒶ→Ⓑ→Ⓑ→Ⓒ→Ⓓ→Ⓓである．

取上げる対象は隣接する二つの渓流域を跨ぐ，集水面積が合計約９haに上る地勢にある．その地域は 1993 年の鹿児島豪雨災害後，市街地にあった一部の施設群の移転先として改変が重ねられてきた．

崩壊は，**図-2** に示す顕著な土石流２件を入れ，過去 30 数年間で 8 回（7 個所）が数えられる．

改変域は，**図-1** において縞模様を施した東（青色）と西（赤色）に分かれる．東は砂防指定地内の行為（盛土）として 1990 年前後に改変され，西は 1997 年までに改変されている．**図-1** には，土砂崩壊要因の一つと考えられる軽石層（×印の部分で地層確認．ほかは想像）の分布を黄色付けして添える．

(2) 地下水文を左右する地上水文の関与

各対象地の改変状況を列挙し，それらの内容が土砂崩壊に影響する可能性を次項で考察する．

改変の履歴として渓流埋立てと大規模切盛土がある．その内容は，Ⓒ地点およびⒹ地点で，一次支川の中流部から合流点付近までが埋立てられたことと，Ⓒ，Ⓓの両上流域で 1990 年前後に，次の切盛土があった（標高は四捨五入処理でｍの位まで表示）．

Ⓒの上流については，標高 172ｍから同 153ｍへ切土
同 120ｍから同 130ｍへ盛土

Ⓓの上流については，標高 181ｍから同 159ｍへ切土
同 120ｍから同 130ｍへ盛土
同 131ｍから同 138ｍへ盛土

Ⓒについては上流において 0.8 haの切土と下流の集落端までの間で，厚さ最大 10ｍの盛土がなされている．砂防指定地で求められた洪水調節池がある．

Ⓓについてはその隣接渓流（短縮された後の現在）は標高 145ｍから同 149ｍへ平均４ｍ腹付け盛土されている（新旧地形図のデータから読み取れた）．

なおⒶとⒷは公刊地形図で状況証拠が窺えるのみで，後年になって撮影した痕跡写真以外には情報がない．整理上，ここではⒶの崩土の回数は１とする．

Ⓑは渓流の右岸で流土（土石流とがけ崩れを総称）が２回あったことが公刊の地形図で分かったが,公的な把握が不明で､過去の写真も入手できていない．

Ⓑは近年新たに筆者が現認したもの 1 回を加え，延べ３回に上る．

Ⓓの土石流は何れも筆者が現認しており，それぞれ上流に渓流があり土石流の上流（Ⓒは下流まで）が埋立てられていた事例である．上流で見られた地形改変には次のような地上水文の変化が抽出される．

①　不浸透域の拡大

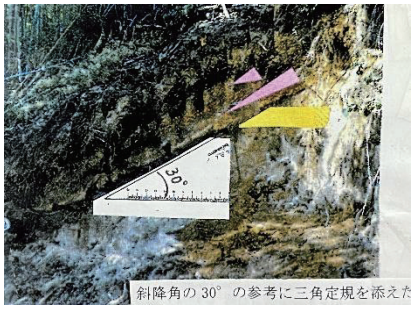


図-3　軽石層露頭

②水路整備による到達時間の縮減
③流域変更（別流域の流向逆転）による洪水流入増
④調整池に収容されない降水の制御不在
⑤谷の埋立てによる保水域（Ⓑの盛土前）の消滅
⑥渓流の埋立てによる広域な地盤の含水と堰堤背後の満砂・飽水，洪水の滞留による地下水位の上昇

近年（1992～2012 年）の公刊地形図の新旧比較で渓流の埋立てが分かった．Ⓓの流域面積 3.5 haは 4.5 haに増えている．

(3) 崩壊の特徴

本ケースの特徴は，東西 300mの距離内で繰返し崩壊している点と，**図-3** に例示する急傾斜軽石層の二つにある．この例の，切下げ高 22mの大規模な切土と 40m以上に及ぶ盛土という規模は珍しいものではないが，**図-5** で示すような軟弱な盛土中には水みちが残留している可能性が高く，それが軽石層とも連通して土石流等の水の供給連鎖が拡大することも考えられる．改変には，開発手引きに沿って地下排水管を入れるに留まり，水文地質の視点が不在と言う積弊が今日に課題を残した可能性もある．

軽石層の水理については，露頭や地盤調査を基に九州大学山内豊聡元教授（以下，山内）の「しらすの限界流速と地山の浸透崩壊問題への適用」[4]の物性値で検討し，3 章(3)で示す．渓流の水理に関しては堰堤背後で泥水が沈降[5]したため定量的検証は断念し，流末の定性的な観察に留まる．

3，水工学的検討と連続・反復性

渓流の残留水脈による地下水流動の広域化，軽石層の勾配､硬質シラスの骨格崩壊の関係を考察する．

(1) 地下水流への軽石層の介在及び地層の飽和

前章で述べた崩壊の連続・反復性について軽石層の広がりを含め，以下の背景を抽出できた．

a) がけ崩れⒶの事例

新旧の公刊地形図と比較断面図で，表層崩壊及び**図-1** の地下 2mに厚さ 1m程度の軽石層が窺える．

b) 土砂流出Ⓑの事例

公刊地形図のがけの表示が 15 年間を隔てて 2 件



図-4　地下掘削中に見られた地層　四周に軽石層がある．

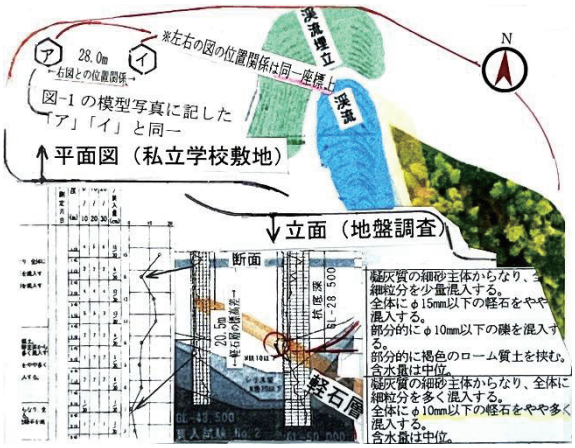


図-5　標準貫入試験・柱状図，渓流と図-6 の位置関係

記されていることから，時期を別にして土砂が複数回流出したと窺える．

c) 土石流Ⓒの事例

図-2 の，地表下 5～10mの間で土石流が生じた．

d) 土石流Ⓓの事例

図-6 の陥没トラフの出口に，土石流として連行されたものと思われるシラスの砂堆が窺える．

e) 共通する背景

図-1，4，5 のとおり，広く軽石層が存在する．

(2) 土石流の連続性と渓流の旧水脈と軽石層の勾配

それらの全体的広がりとⒶ～Ⓓの位置が近接する点では，複数の渓流長が何れも半分以上埋立てられた経緯と関連があると考える．

しかし，2 渓流と交差するバイパスの存在などの根拠を示せず，2 渓流の地下水系が連通していると断定できない．土砂災害リスクを将来の課題にする．

2019～2020 年夏にⒹの沿川で筆者は斜面表層の剥落を撮影したが，地山に達する崩土の痕はなかった．シラスの破壊規準は旧国鉄広木トンネルの地山

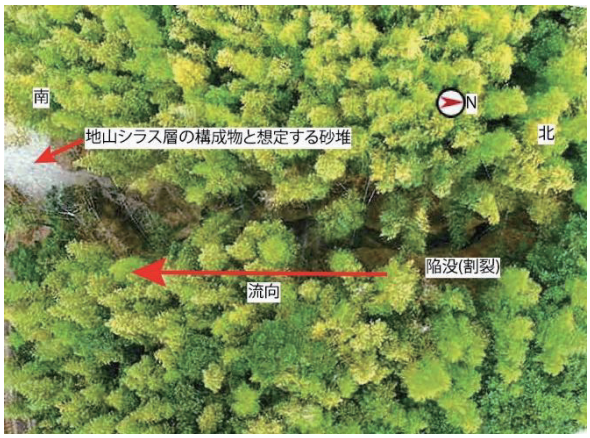


図-6 Ⓓ土石流の陥没トラフ 北が上流,南が下流

の載荷実験を受けて，上田らが脆性破壊することを見出した．同様の縦横比で陥没面が生じたことが図-6 の開口幅の規模から想定できる．脆性破壊の勾配は上田の前出論文[2]にある 70°±4°を参考に，自重のみで陥没が生じたことを考慮すれば，控え目に見ても，その中央値と考える．現象は不飽和段階の地山が，山付き河岸の下端が側方侵食されるのと似た機構で，上部が落ちた脆性破壊と考えられ，図-6 の写真南端に写っている白い砂堆は地山陥没以降に起動した土石流の必要条件であるとすることが合理的である．

(3) 水工学的検討

以上から，次の 3 点を考察する．

①旧渓流の埋立てで地下水脈が加圧された可能性

②Ⓓ土石流隣接の堰堤群の満砂・地下水による浸透圧[5]，堰堤背面からの軽石層への浸入の可能性

③急勾配（30° 超）の軽石層により動水勾配が限界動水勾配を超えたとする試算結果

①，②の計算は叶わなかったが，泥水が長期間溜まって接触したことで地山の下端でシラス土粒子が飽和し，結束が壊れたと想定すれば，上部のシラスが落ちて土石流化したことが推定される。③についてダルシー則に則り水工学的に試算した結果を示す．

透水層の水の挙動

条件

限界動水勾配

i_c；山内説 0.35～鹿児島大学元教授露木利貞説 0.61

動水勾配i_c；図-3 の露頭(31.0°)と

図-5 の柱状図からの勾配(36.9°)が並存した。

土石流起点の直下流を優先に *tan31.0°=0.6* を原状として掲げることとする．

$$n_e = \text{有効間隙率}\ 0.3$$

1．実流速 v

ダルシーの法則に基づき実流速vを求める．

$$v = (k \cdot i) \,/\, n_e$$

条件[4]；軽石層の透水係数k：$10^{-1}cm/s$

i=0.60＝ tan31°（図-3 の露頭勾配から）

以下同じく

$$v = 0.1 \times 0.60 / 0.3 = \frac{0.2cm}{s}$$

2．限界流速$v_c = 0.035cm/s$

限界動水勾配 $i_c = 0.35$ ･･･山内説の中央値[4]

$$v_c \fallingdotseq k \cdot i_c / n_e \fallingdotseq 0.1 \times 0.35 / 0.3 \fallingdotseq 0.117cm/s$$

地層内水圧の浮力:図-7 右軸に軽石層の上の土層の重力と浮力の比を表示する．

算定された軽石層の実流速は，軽石層の限界流速を約 1.7 倍超過している．高い透水性を有する軽石層により，改変で閉塞された地下水が崩壊発生地点へ向かった可能性が考えられる．Ⓓ土石流現場の西側における 2 地点の標準貫入試験の柱状図（調査地点ア，イ）によれば，軽石層の総厚は 2m程度で東南東に 30° 以上斜降していていることから，実流速はさらに上がった可能性がある．

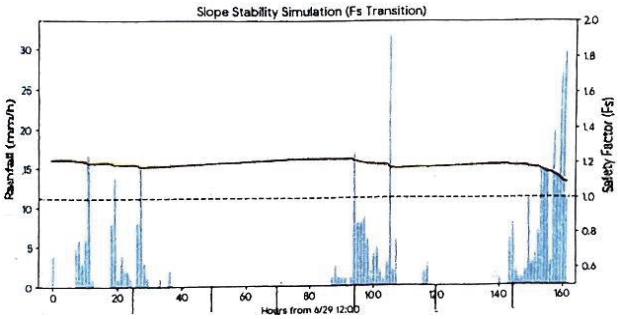


図-7 降雨データ 目盛 左;降雨強度,右;上層土の安定 右;Fs＝「表土自重によるせん断抵抗」/せん断力

定性的には，間断しながら連続する降雨で，パイピングの原型となっていた水みちが拡大して，軽石層の飽和で崩壊[5]したことが強く示唆される．

難透水層の上の軽石層は，一度飽和すると水が抜けない[5]まま，過剰間隙水圧の上昇降下が反復する．

4，急勾配軽石層と残留水脈の融合

前出図-2、図-6 を基に,水みちが存続し浸透壊して土砂崩壊が反復した要因を考察する．

(1) 渓流埋立ての影響

急勾配の軽石層の介在と，埋立てられた 2 渓流の上流に残存する旧・水脈（以下，残存水脈）の並存を考えると，本ケースにおける土砂崩壊の反復に，これらが強く関連する可能性が浮上する．また，残留水脈及び堰堤背後の地下水位の上昇も地下水流の広域・連鎖化に関係していると考えられる．

以上を総合すれば，それらと地下水文が地層を構成する大小の粒子の浸潤に要する時間と共に再構成が進み，活性化してきたと考えて不合理ではない．

それが土石流などの要因となる地下水の連鎖強化に繋がったと考えられる．それ以外には土砂崩壊と強く相関する因子は見当たらない．従って，本ケースのような山地流域における連続・反復的な土砂崩壊の要因は，次のように要約される．

・軽石層が地下に広域に横臥していること．

・軽石層が急傾斜していること．

・対象地上流で埋立てられた水脈の残存影響が膨



図-8　鹿児島市小野町田中宇都

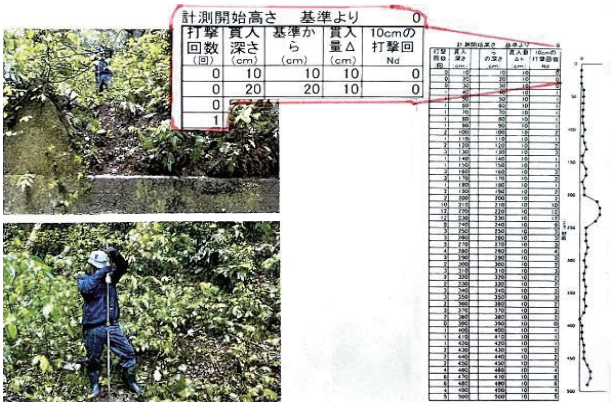


図-9　堤体背面・満砂部の貫入試験と柱状図

張，活性化して行くこと．

6 章(3)に述べるクリープ現象を前提にすれば，これらは地頭薗らの水文地質調査報告[1]に照らし帰結する推定や，山内[4]の浸透破壊説とも矛盾しない．

(2) 水みちの残留・増長

埋立てられた水みちを全て終息させることは，実際の施工では統御し難い．**図-5** の柱状図で見るとおり最大でも N 値が 7 前後と言う実態はそれを裏付ける．これは旧水系由来の伏流水が継続または肥大化する条件が充分に残っていることを示している．実際に本ケースに限らず多数の盛土工事現場に見られると考える．1 章に挙げた上田の問題提起を始めとする宅地造成地はもちろん，熱海市伊豆山災害など，沈下や土砂災害の事例は多い．

地下水位が日々の晴雨によって絶え間なく昇降すること，そこから，大雨時でなくとも地層のパイピング内で昇圧と降圧が繰り返され，軽石層及び地山シラスに生じる過剰間隙水圧によって，山地の深部から破壊現象が進行し続ける．

人為が加わっていない山地でも崖錘が押し出された例として，1993 年に起きた鹿児島市小野町田中宇都の事例（**図-8**）がある．帯状の「へ」の字の軽石層から出た水で崖錘上の孟宗竹林がなぎ倒された．

5，水の供給連鎖

浸透破壊から土石流の前駆現象について述べる．

(1)　急傾斜の軽石層の浸透破壊

3 章の(4)で，急傾斜勾配の軽石層に浸入した水が浸透破壊を起こしたことを試算したとおり，容易に限界流速を超過し破壊することが分かる．本ケースのⒹでは盛土開始層の下にさらに急勾配で軽石層が斜降していたことが標準貫入試験の箱書きで窺えた（**図-5**）．勾配によって浸透流の速度は上述の試算値より増加し，シラス本体を飽和する可能性もある．

一方で，露木利貞元教授からせん断強度（インターロッキング効果[5]）の喪失も指摘されてきた．同喪失については，本ケースと近い大規模団地の地下水下に設けた山田トンネルについて述べてもいる．当所でもⒹが地下水下であるかを確認するため隣接する渓流の堰堤裏を動的コーン貫入試験で調べた．

その際，貫入初期から貫入終了まで泥層内独特の自由水の撥ね音が聴かれ続け、ロッドも濡れた。このことから，前述トンネルと同様に，Ⓓも地下水下である可能性が窺えた．換算 N 値は 0～2 の範囲であった．**図-3** と**図-4**，**図-5** に顕れた軽石層の環境下と同様，限界動水勾配を超え，浸透流から崩壊へと進んだ．そうすると，**図-6** が土石流を示している可能性は排除できない．これと似た状況下では，軽石層の浸透破壊を疑った対応が求められる．

(2) ケーヴィング現象と土石流の起動

1975 年旧建設省土木研究所（以下，土研）「シラス地帯の斜面崩壊対策に関する調査報告書」[6]P13 では，「地下水が水みちをもって崖錘上に滲出する所で，その流出口付近のシラスが次第に水に飽和され，シラスの崩壊が始まって崖の奥にケーヴィングが進み、そのがけの上部に亀裂を生じ崩落する」とある．**図-6** の鉛直陥没はその一態様と考える．

以上のほか，伏流水が渓流の治山堰堤背面に泥土と一体化して浸入し，かつてよりも周りを強く圧迫するとも考えられる．それら多種の形態を採りながら陥没を含む本ケースの土石流等土砂崩壊が生じる．

6，水平連通する地下水系と高盛土による鉛直連通

崩壊が一過性の豪雨ではなく地下水によることと，地下水文の鉛直方向への水供給の拡大を述べる．

(1) 水文地形的観点から見た水供給の連鎖拡大

本ケースのように，地上の地形改変及び地下の水

文変化が，軽石層の介在で再構成される可能性が高い．これらにより旧来の水脈が増長し，広域化して崩壊に繋がる可能性が高い．その原因としては，渓流が埋立てられた後も浸透水は供給され続けること，全方向的に埋立て土からの側圧がかかり軽石層の水みちの内径が拡大すること，併せてパイピングが延びることが推定され．流域全体を通じて浸透流が連通すると言う質的変容がもたらされると考える．

(2) 土石流に対する表面流と地下水の寄与

地下水文の変容に起因する土石流は，一過性の豪雨が原因でないことは土研の報文等で示されている．

確かに,本ケースにおいても，降雨データを見ると，降雨強度はさほどのものではないにもかかわらず崩壊が起きている．この疑問を解く知見が，土研報告第 143 号 P12～13 にあり，「山地流域における洪水流出の追跡」[7]として示されているので次に示す．「表面流の発生は，ほとんど降雨強度の強弱に依っていることが分かる．すなわち，33 ㎜/hr 以上では必ず発生し，それ以下では全然発生しない．―（中略）―これまでの観測では累加降雨量が 35 ㎜/hr で発生しながら 153 ㎜の降雨でも発生していない」．

降雨強度が小さければ表面流はほとんど発生せず，地中深部に浸透することが下川らから示されている．土研の知見の眼目も，表面流がゼロでも軽石層を通じた浸透破壊がありうると言う点にあると言える．

33 ㎜/hr 以下では表面流が全然発生しないと言う場合でも，土石流が起きる可能性はあると言うことに留意すべきである．

(3) 高盛土の影響と時間的再配置

地下水の流去先であった渓流は側岸に分厚い軽石層を擁し，地山シラスが侵食され後退して形成された天然の谷であったと見える．近年の大規模改変で渓流が閉ざされ伏流水が沿川内外の弱所を通じて，©，Ⓓの一帯に侵出した．その影響で，Ⓓでは 3 章(3)のとおりインターロッキングの崩壊と，パイピングにより,地山シラスが土石流化したと考えられる．

既往の高盛土には，設計時の斜面安定条件をかなり下回り，斜面の安全率が 1 を下回る現場も少なくない．その結果クリープが生じ，劣化から過剰間隙水圧が発生し土石流を生じるなど，水みちがダイナミックに変化することを松浦純生が「斜面変動場における地下水文・水理学の進展と今後の課題」[8]で述べている．水が地盤を浸透する「時間的要素」によって土粒子の物理的再配置が行われた結果,広域・長期的に崩壊が繰り返される．筆者はこれを回避するため,盛土開始面に側方流動を拘束する地中壁や，30 ㎝ごとに，転圧に平均N値 15 以上とする管理要件を付して土粒子の再配置の抑制を図ってきた．

7. おわりに

水文地形的背景の知見を踏まえると，急勾配透水層及び埋没渓流の残留水脈が作用して未崩壊の山腹に,土砂災害に発展するリスクがあると考えられる．

本ケースで帰したことは次の 4 点である．

1) 急勾配軽石層の分布が広い地域では土砂崩壊が継続する傾向にある．

2) 盛土で複数の渓流が埋立てられる場合は,地上で分離しているように見えても,地下の水文が一体化・連通する可能性があるとすべきである．

3) 盛土層は，締固め不足や圧密による水みちが新たに形成され，盛土の下層にある軽石層と通じ合う傾向がある．可撓性と高強度が両立する集水・排除システムを構築し，盛土と原盤の相乗作用で地下水が過剰に流動しない地下水文を構築する必要がある．

4) 高硬度の地山シラスで土石流が起動したことは，深部で過剰間隙水圧が及び，上部が落ち，本件のような土石流になったと考えられる．高盛土して埋立てた水脈が消えたと歓迎する施工陣には,地下水文,残留水脈の影響が残ると懸念する姿勢が必要である．

参考文献

1) 地頭薗隆，下川悦郎：シラス地域の水文地形とシラス斜面崖錘部の崩壊，地形，第 23 巻，第 4 号，pp.617，2002.

2) 上田通夫：シラスの力学的性状の解明と防災技術の研究，上田通夫先生退官記念研究集，pp.111,151,173,201，1984.

3) 山部鉄朗：土砂災害と地下水について，九州地区治山林道研究発表会,（公益社団法人）日本技術士会九州本部研修委員会，pp.20-46，2025.

4) 山内豊聡：しらすの限界流速と地山の浸透崩壊問題への適用，pp.140-142，浸透崩壊に関する考え方と破壊発生の条件，pp.107-124，応用地質年報，№9，1978.

5) 露木利貞：しらす地盤地帯における地下水下のトンネル工事，土と基礎，Vol.36, No.3，pp.43-45，1988.

6) 建設省土木研究所：シラス地帯の斜面崩壊対策に関する調査報告書，土木研究所資料，998 号，pp.13，1975.

7) 建設省土木研究所：土木研究所報告，第 143 号，山地流域における洪水流出の追跡，pp.12-13，1988.

8) 松浦純生：斜面変動場における地下水文・水理学の進展と今後の課題，J of the Jpn.landslide Soc.,Vol.49,No.3，pp.3，2012.

（2026.5.29　受付）