

土石流の流動特性を考慮した鉄道の土砂災害対策

Countermeasures Against Sediment Disaster on Railroads Considering Flow Characteristics of Debris Flow

竹林洋史

Hiroshi TAKEBAYASHI

Synopsis

A field observation was conducted on the debris flow that occurred in Maruyama, Miyagawa-cho, Hida City, Gifu Prefecture, Japan, as a result of the torrential rainfall in western Japan in July 2018. Numerical simulations of the debris flow were also conducted to discuss countermeasures for railroads considering the flow characteristics of debris flows. The debris flows originated from two valleys. Numerical simulations showed that a large amount of sediment was deposited downstream of the confluence of the two tributaries and in the west side of the tributary. This is due to the geometry of the stream, which is conducive to sediment deposition, and is thought to be one of the reasons for the frequent occurrence of debris flows. Numerical simulation of debris flows can be used to calculate the path and duration of debris flows. This information can be used to determine effective locations for debris flow sensors that can warn trains in operation.

キーワード: 鉄道, 土石流, 数値解析, 現地調査, 土砂災害対策

Keywords: Railways, Debris flow, Numerical analysis, Field observation, Countermeasures against sediment disaster

1. はじめに

2018（平成 30）年 7 月 6 日と 7 日に中国・四国地方を中心として、九州北部から中部地方の広い範囲で多くの雨が降った。岐阜県においても県内の広い範囲で多くの雨が降り、洪水氾濫、斜面崩壊および土石流が発生した。岐阜県飛騨市では、宮川町丸山において複数回の土石流が発生した。その結果、Fig. 1 に示すように、溪流の出口に位置する JR 高山本線が被災し、坂上駅から打保駅の区間が不通となった。対象地点は、10 年程前にも土石流で被災しており、土石流が発生しやすい溪流と考えられる。なお、土石流発生時には列車を運行していたが、列車に被害は無かった。対象区間は列車の運行本数が少なく、列車運行時でも列車が土石流の直撃を受ける可能性はそれほど高くないが、タイミング次第では列車が

土石流によって被災し、鉄道被害だけでなく、人的被害も発生していた可能性もあった。

JR 東海によると、豪雨による鉄道周辺の土砂災害の予測は、線路基礎の盛土や鉄道近傍の斜面の安定

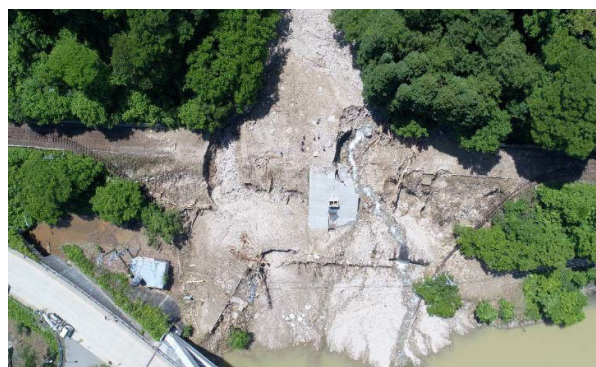


Fig. 1 Sediment disaster of the JR Takayama Mainline in Hida City, Gifu Prefecture⁶⁾

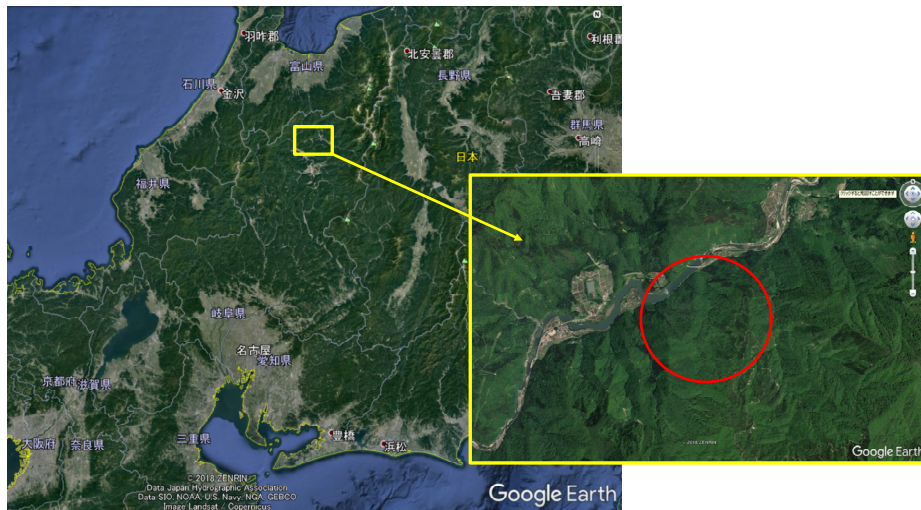


Fig. 2 Damaged area of JR Takayama Mainline in Hida City, Gifu Prefecture.



Fig. 3 Uchiho Dam Reservoir where debris flows flowed into.

性によるものが主であり、線路沿いに設置された雨量計とレーダー雨量のデータによる降水情報に基づいて行われている。しかし、高山線のように山に囲まれた領域に位置する線路では、山による遮蔽によって、レーダー雨量の値が十分に得られない。また、土石流については、土石流の発生地点が線路から離れているため、気象庁による土壌雨量指数を用いた簡易な予測となっており、溪流での土石流の流動特性を考慮した予測や対策は行われていない。

本研究では、岐阜県飛騨市宮川町丸山で発生した土石流について現地調査と数値シミュレーションを実施し、溪流における土石流の流動特性を考慮した鉄道の土砂災害対策について検討する。

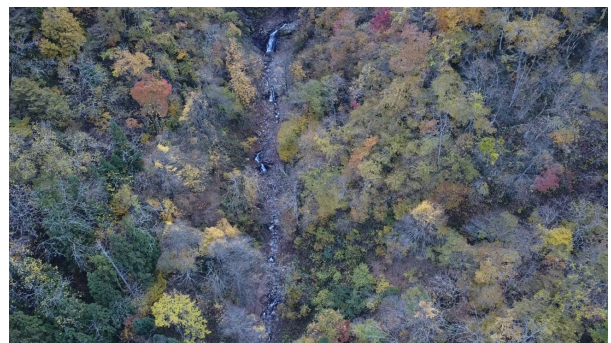
2. 岐阜県飛騨市宮川町丸山で発生した土石流

(1) 対象溪流の概要

対象の溪流は、Fig. 2 に示すように、岐阜県飛騨市北部を東西に流れる宮川に流れ込む溪流である。溪流と宮川との合流地点では、宮川内に Fig. 3 に示すような関西電力の打保ダムが設置されており、土石流は打保ダムの貯水域に流れ込んだ。溪流内には人家は存在しておらず、対象溪流は土砂災害警戒区域



(a) Downstream area



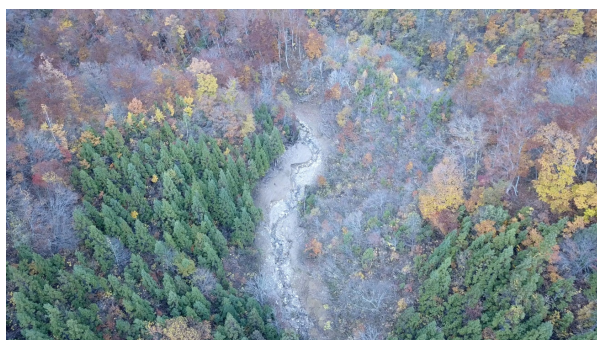
(b) Middle reaches (downstream of the confluence)

Fig. 4 The main river in the downstream of the confluence

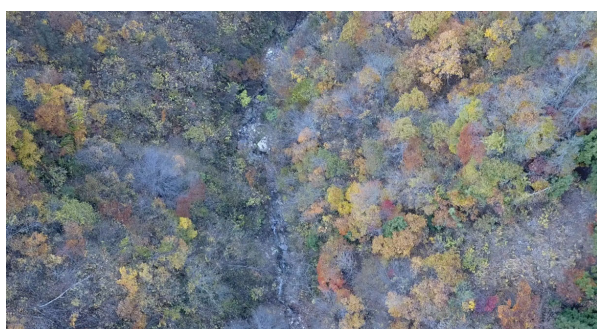
の指定はされていない。対象溪流には大きく流域があり、宮川との合流点から約 800m 上流で二つの流域からの溪流が合流している。合流地点から宮川までの溪流本川の平均河床勾配は約 15 度、宮川との合流地点付近では約 12 度と緩やかになっている。また、東側流域の溪流の平均河床勾配は約 17 度、西側流域の溪流の平均河床勾配は約 16 度であり両者の違いは大きくないが、西側流域の溪流には途中で約 12 度の緩勾配域が存在する。

(2) 現地調査

Fig. 4 (a) に下流域の溪流本川の様子を示す。谷



(a) River in the west river basin



(b) River in the east river basin

Fig. 5 Rivers in the upstream area

の形状はV字谷であり、非常に急な斜面が溪流の兩岸に連続している。今回の土石流によって上流から運ばれた土砂が下流域の河床に堆積して河床が上昇し、多くの不安定土砂が下流域の溪流本川に残っていることがわかる。また、河床材料は、直径数 mm 程度の細かいものが多く見られるが、土石流の後続流および土石流発生後の土砂濃度の低い流水によって堆積土砂が浸食された流路内には、直径数 m 程度の巨礫も見られる。

Fig. 4 (b) に両支川の合流地点直下流の様子を示す。河床縦断勾配が非常に急で河床縦断形状はステップ状の地形となっており、複数の滝が存在することがわかる。

Fig. 5 (a) に西側流域の溪流の様子を示す。西側流域では、河道内に粒径の小さい土砂の堆積が見られる。これは、前述のように、西側流域には勾配 12 度程度の比較的緩勾配の領域が存在するためである。一方、Fig. 5 (b) に示すように、東側流域の溪流には目立った土砂の堆積は見られず、岩が露出している領域が多く見られるとともに、合流地点下流域と同様にいくつかの滝が見られる。

(3) 降雨と土石流発生時刻

Fig. 6 に被災地点から 7km 程度西に位置する河合地点で観測された降雨強度の時間的な変化を示す。図に示すように、降雨強度の最大値は 33mm/h であり、それほど大きな値ではない。

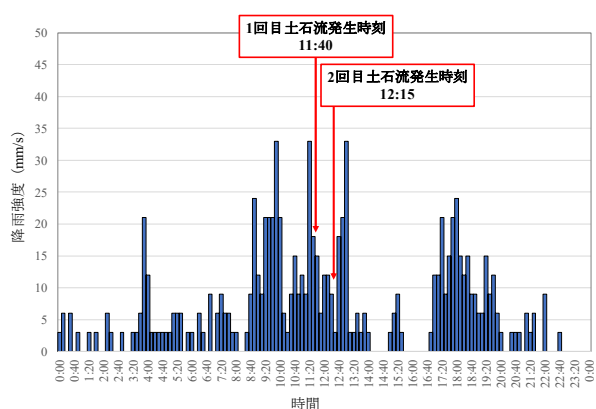


Fig. 6 Temporal change of rain intensity at Kawai

JR 東海によると、2018 年 7 月 7 日正午前に土石流によって線路が被災したことを現場で確認しており、その後、13 時ごろに現地で被災状況がさらにひどくなっていることを確認している。つまり、12 時前と 12 時前～13 時ごろまでの間にそれぞれ土石流が発生しているようである。また、土石流が二回発生したと考え、打保ダム貯水池内の水位情報から判断すると、土石流が貯水池に流れ込んだ時刻は 11 時 40 分と 12 時 15 分のものである。Fig. 6 によると、これらの時刻における降雨強度はそれほど大きくないが、最大降雨強度を観測した 9 時 40 分、11 時 20 分、13 時の 3 回の時刻の 2 回目と 3 回目の間となっており、発生時刻前に既に多くの雨が降っていたことがわかる。

また、1 回目の土石流発生時には列車が運行中であった。幸い、土石流が線路に到達したタイミングでは列車は被災箇所を通過していなかったため、人的被害は発生していないが、非常に危険な状態となっていたことがわかる。これは、9 時 40 分ぐらいに観測された強い雨が 10 時 20 分頃には 3mm/h まで小さくなっており、この時点で土砂災害に対して危険な状態が終了していたと判断されたためと考えられる。

3. 数値シミュレーション

(1) 解析モデルの概要

本解析では、粗粒土砂の構成則に江頭らのモデル¹⁾を用い、細粒土砂と水の混合物が液体として振る舞う相変化と層流域上に乱流域を考慮した平面二次元土石流モデル^{2), 4), 5)}を用いる。

水及び土砂の混合物の質量保存則¹⁾は以下のようである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 h は土石流の流動深である。 u と v は x と y 方向における速度成分、 c_* は静止堆積層の

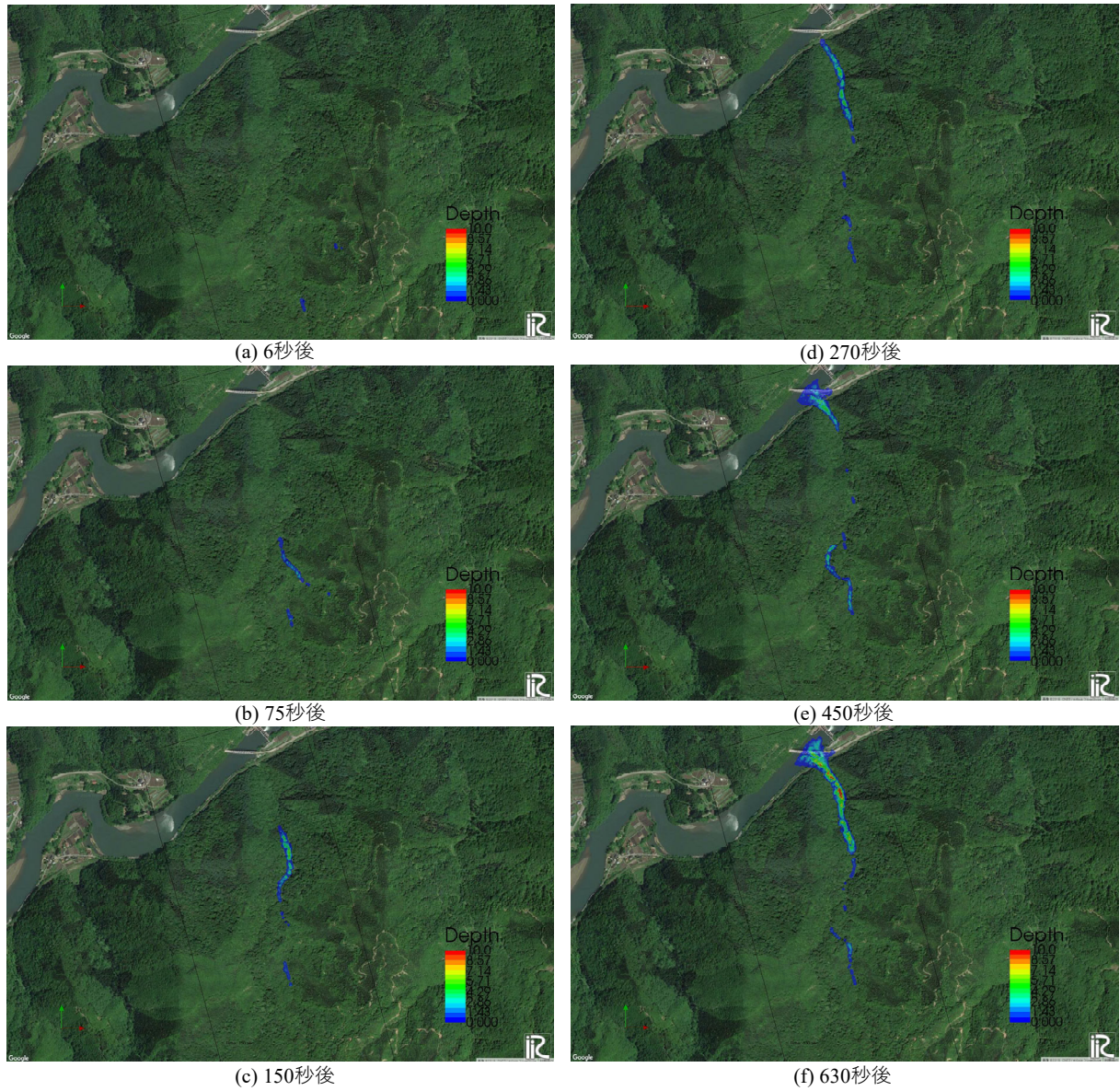


Fig. 7 Spatiotemporal change of flow depth of debris flow (Numerical simulation, BG: Google Earth)

砂礫の堆積濃度, E は河床の浸食速度であり, 以下の江頭らの式¹⁾を用いる.

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (2)$$

ここに, θ は流動方向の河床勾配であり, 以下の関係がある.

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3)$$

ここに, θ_x は x 方向の河床勾配, θ_y は y 方向の河床勾配である. θ_e は水及び土砂の混合物中の鉛直平均土砂濃度 $\bar{c}$ に関する流動方向の平衡河床勾配であり, 水と土砂の混合物に対して河床近傍に層流域, その上に乱流域を有する二層流を考えると, 以下の関係が得られる.

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)\bar{c}}{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1} \frac{h_s}{h} \tan \phi_s \quad (4)$$

ここに, ϕ_s は土砂の内部摩擦角である. 流体中の土砂の質量保存則¹⁾は以下のものである.

$$\frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}hU}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}hV}{\partial y} = E \quad (5)$$

運動量保存則¹⁾は以下のものである.

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huU}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (6)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvV}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (7)$$

ここに, g は重力, z_b は河床位である. P は圧力であ



Fig. 8 Spatial change of land deformation (Numerical simulation, BG: Google Earth)

り，静水圧近似を用いる． ρ_m は以下の関係がある．

$$\rho_m = (\sigma - \rho)\bar{c} + \rho \quad (8)$$

ここに， ρ は水の密度， σ は土砂の密度である． τ_{bx} と τ_{by} は x と y 方向における掃流力成分であり，以下のようである．

$$\tau_{bx} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (9)$$

$$\tau_{by} = \left\{ \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \right\} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (10)$$

τ_y は降伏応力であり，本解析では以下の関係を用いる¹⁾．

$$\tau_y = \left(\frac{\bar{c}}{c_*} \right)^{\frac{1}{n}} (\sigma - \rho) \bar{c} g h_s \cos \theta \tan \phi_s \quad (11)$$

f_b は抵抗係数であり，本解析では以下の関係を用いる．

$$f_b = \frac{4}{25} \left\{ k_f \frac{(1 - \bar{c})^{\frac{4}{3}}}{\bar{c}^{\frac{4}{3}}} + k_d \frac{\sigma}{\rho} (1 - e^2) \bar{c}^{-\frac{4}{3}} \right\} \left(\frac{h_s}{d} \right)^{-2} + 9\alpha^2 \left(1 - \frac{h_s}{h} \right) \quad (12)$$

ここに， $k_f=0.16$ ， $k_d=0.0828$ ， e は粒子の反発係数， d は土砂の平均粒径である．河床位方程式¹⁾ は以下のようである．

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_*} \quad (13)$$



Fig. 9 Reconstructed railroad

(2) 解析条件

地形データは国土地理院により被災前に測定された平面的に 5m の解像度の DEM データを用いた．解析格子は，細い溪流の形状やステップ状の地形を可能な限り表現するため， $2\text{m} \times 2\text{m}$ の比較的細かい正方形格子を用いる．土石流は実現象に即して斜面崩壊を発端として発生するものとした．そのため，本解析の境界条件は流体化した水と土砂の混合物が計算開始時点において斜面に存在するというものであり，土石流の流量などを上流から与える必要はない．表層崩壊は，東西各流域に一カ所ずつの合計二カ所を考慮する．表層崩壊の場所は，岐阜県からのヒアリングをもとに，被災後の調査によって判断された崩壊地とした．これら二カ所の斜面崩壊の発生時刻は不明であるため，本解析ではこれら二カ所の斜面崩壊が同時に発生したと仮定している．なお，下流域での土石流の規模は土石流の流動過程で渓床や河岸などを浸食して取り込んだ土砂と水の量で決定されるため，本土石流のように土石流の流動距離が長い場合は斜面崩壊の大きさは土石流の規模にほとんど影響を与えない³⁾．

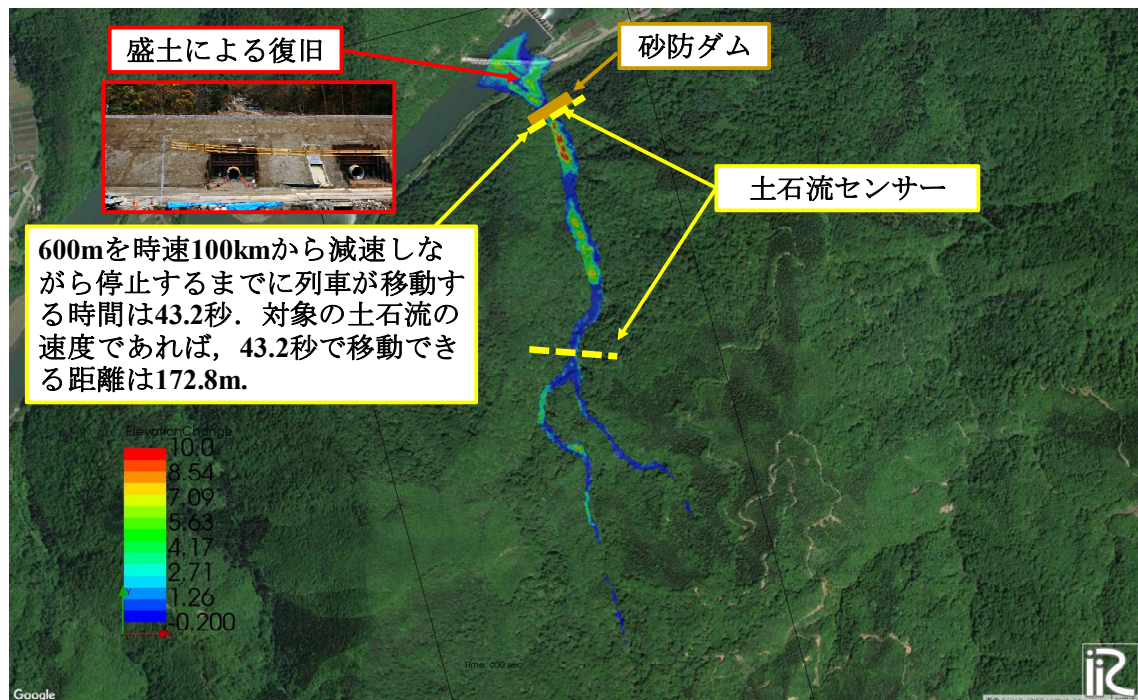


Fig. 10 Debris flow disaster prevention on railroads (BG: Google Earth)

4. 結果と考察

Fig. 7 に数値シミュレーションによって得られた流動深の空間的な分布の時間変化を示す。二つの土石流は、上流域で同時に発生させているが、東側流域の土石流の伝播が速く、斜面崩壊発生から 25 秒程度で両流域の合流地点に達している。一方、西側流域の溪流の土石流はゆっくりと流下していることがわかる。これは、西側の溪流では、一部の領域で河床勾配が緩やかであるため、土石流によって運ばれてきた水と土砂の混合物が溪床に堆積しながら流下しているためである。Fig. 8 に河床変動量の時間変化を示す。図より、東側流域の河道内はほぼ全て浸食域となっているが、西側溪流には土砂の堆積域が広く形成されていることがわかる。

東側流域の溪流から発生した土石流は、発生から約 270 秒後に線路に到達しており、土石流の平均速度は約 6m/s (時速 22km) である。一方、西側流域の溪流が合流地点に到達したのは発生から約 450 秒後であり、合流地点までの土石流の平均速度は約 2.2m/s (時速 8km) と非常に遅い。また、東側流域の溪流から発生した土石流は、溪流本川区間である合流地点から線路までを約 190 秒で流下しており、その間の平均速度は約 4m/s (時速 14km) と低速であった。Fig. 8 によると、合流点下流の本川内に多くの土砂が堆積している。つまり、土石流は溪流本川内の緩勾配域に水と土砂の混合物を堆積させながら流

下したため、速度が遅くなったものと考えられる。

以上のように、西側流域の溪流および本川に多くの土砂が堆積した。これは、河道内に緩勾配域を有しているためであり、対象河道は不安定土砂を貯留しやすい河道といえる。これらの不安定土砂は、今後の土石流への土砂の供給源や発生源となるため、対象流域は土石流が発生・発達しやすい流域と考えられる。なお、対象流域は約 10 年前にも土石流が発生しており、さらにその前にも発生していることが知られている。これは、上述のような河道地形特性によるものと考えられる。

5. 鉄道の土砂災害対策

数値シミュレーションによって得られた土石流の動態を考慮して、鉄道の土砂災害対策を考える。

Fig. 9 は、復旧された線路と盛土の様子である。工事期間が短いことと工事費用が安価であることから、被災前と同様に盛土によって線路を復旧している。しかし、盛土形式の場合は、土石流が流れてきた場合に盛土で土石流を直接受けることとなる。なお、岐阜県によって、線路から約 170m 上流の地点に砂防ダムが建設されることとなっている。砂防ダムは適切に管理され、常に土石流による土砂を堆積させることのできる十分大きい土砂貯留域を保持できていれば土石流を減衰させることができるが、堆砂が進んだ場合は、土石流が砂防ダムを乗り越えることとなる。そのような場合は、盛土形式による線路は、

再度、被災することとなり、運行停止が発生する。そのため、工事期間と工事費用が許されるのであれば、橋梁形式にして橋梁の下を土石流を通過させ、土石流が宮川に直接流れ込むようにするのが良い。

一方、列車運行中に列車が土石流の直撃を受けないためには、土石流センサーの活用が有効である。対象地点の場合、例えば、両支川が合流した後の本川に土石流センサーを設置した場合、支川合流地点から線路までの土石流の移動時間が 190 秒であることを考慮すると、センサーが土石流を感知してから 190 秒以内に列車を停止させることができればよいことになる。一方、列車については、2002 年に廃止されるまで 600m 条項が存在した。これは、列車はブレーキをかけ始めてから必ず 600m 以内に停止できるように運転しなければならないというものである。そこで、時速 100km (約 28m/s) で走行中の列車が 600m で停止することを想定した場合、列車は線形的に減速すると仮定すると、列車がブレーキをかけ始めて停止するまでの時間は 43.2 秒となる。そのため、残りの 146.8 秒で 100km/h の列車が移動できる距離は約 4080m となるため、190 秒で移動できる列車の距離は約 4680m となる。この距離は、列車が停止するには十分長い距離となる。つまり、土石流センサーを溪流に設置することにより、列車運行中であっても移動中の列車を安全に停止できることがわかる。

次に、列車がブレーキをかけ始めて停止するまでの時間である 43.2 秒で土石流がどれぐらいの距離を流下するか考える。数値シミュレーションにより、線路の直上流での土石流の移動速度は、約 4m/s (時速 14km) であるため、43.2 秒での土石流の移動距離はわずか 172.8m となる。つまり、砂防ダム建設予定地の少し上流に土石流センサーを設置すれば、列車は溪流の出口に到達する前に停止できることがわかる。

このように、土石流センサーを設置することにより、列車運行中であっても列車が土石流の直撃を避けることが十分可能であることがわかる。

6. まとめ

本研究では、岐阜県飛騨市宮川町丸山で発生した土石流について実施した現地調査の結果を検討するとともに、土石流の数値シミュレーションを実施し、溪流における土石流の流動特性を考慮した鉄道の土

砂災害対策について検討した。得られた成果をまとめると以下のようである。

- (1) 2018 年 7 月の西日本豪雨によって岐阜県飛騨市宮川町で発生した土石流の数値シミュレーションを実施した。土石流は二つの流域から発生しており、二つの流域の溪流の合流地点よりも下流および西側流域の溪流内には多くの土砂が堆積する結果となった。これは、溪流の形が土砂を堆積しやすい形状となっているためであり、頻繁に土石流が発生する原因の一つと考えられる。
- (2) 土石流の数値シミュレーションを実施することにより、土石流の流下経路および流下時間が計算できる。これらの情報を用いると、運行中の列車に警報を出すことができる土石流センサーの設置が有効であることが示された。

謝辞

JR 東海、関西電力、岐阜県から、各種データ・被災の状況など、詳しい情報をご提供頂いた。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 江頭進治・伊藤隆郭：土石流の数値シミュレーション，日本流体力学会数値流体力学部門Web会誌，Vol. 12, No. 2, pp. 33-43, 2004.
- 2) 江頭進治・佐藤隆宏・千代敬三：砂粒子を高濃度を含む流れに及ぼす粒子径の影響，京都大学防災研究所年報，No.37, B-2, pp.359-30, 1994.
- 3) 江頭進治・宮本邦明・竹林洋史：崩壊に伴う土石流・泥流の形成と規模の決定機構，砂防学会誌，第68巻，第5号(通巻322号)，pp38-42, 2016.
- 4) 竹林洋史：広島市で発生した土石流の数値シミュレーションの事例と対策，地盤工学会誌，Vol.64, No.4, pp12-15, 2016.
- 5) 竹林洋史・江頭進治・藤田正治：2013年10月に伊豆大島で発生した泥流の平面二次元解析，河川技術論文集，Vol.20, pp. 391-396, 2014.
- 6) JR東海：https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000037720.pdf, 2004.

(論文受理日：2023 年 8 月 31 日)