

土石流シミュレータを用いた土石流発生時の避難経路の検討

Study on Evacuation Route from Debris Flow Using Debris Flow Simulator

糸数 哲⁽¹⁾・中谷加奈⁽¹⁾・山野井一輝⁽²⁾・長谷川祐治・藤田正治

Tetsushi ITOKAZU⁽¹⁾, Kana NAKATANI⁽¹⁾, Kazuki YAMANOI⁽²⁾, Yuji HASEGAWA
and Masaharu FUJITA

(1) 京都大学大学院農学研究科

(2) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Agriculture, Kyoto University

(2) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

To prevent losses of human life caused by sediment disaster, the warning and evacuation system have been advanced. To obtain information of the safety evacuation route and shelter from debris flow, we applied debris flow simulator Hyper KANAKO system to a debris flow prone torrent in Kyoto Prefecture. In this study, we set landform data using digital elevation data. We also changed the landform partly to consider the artificial channel depth and building height. We set the supplied hydrograph using assumed rainfall intensity (88.9 mm/h) from Iwai's method. We set recurrence intervals of the assumed rainfall intensity as 100 years. Sediment volume of debris flow was estimated from assumed slope failure area rate (5%) and depth (1.5 m). The simulation results showed that part of the sediment moved down through the channel and sediment overflowed where channel becomes shallow. The results also showed that the flooding flow concentrated in the passageway under railroad which is narrow and located low.

キーワード: 土石流シミュレータ, 避難経路, 流路工, アンダーパス

Keywords: debris flow simulator, evacuation route, artificial channel, underpass

1. はじめに

土砂災害の発生による人的被害の防止・軽減を図るため、警戒避難体制の整備が進められており、例えば、避難所等が記載された土砂災害ハザードマップが行政により作成・配布されている。土砂災害に対する防災・減災への取り組みは行政だけでなく、地域住民も参加して行われており、地域住民と行政が共同で災害図上訓練や避難訓練等を実施し、土砂災害に対する地域防災力向上への取り組みが行われている（例えば、石井ら、2016；佐藤ら、2016）。

土石流は降雨ピーク時や降雨ピーク後に発生することがある（土志田・新井場、2016）ため、避難所までの避難中に土石流が発生し、被災する可能性がある。また、土石流の発生によって避難経路の一部や避難所が被災する可能性もある。土砂災害発生時の避難経路や避難所の安全度を事前に把握しておくことは、避難行動（垂直避難・水平避難）や避難経路を選択する上で重要な事項である。土石流シミュレータは、土石流発生時の土砂の氾濫・堆積域の予測が可能であり、より現実的な避難行動の検討を行うために有用なツールである。土石流の流下・堆積は、

扇状地の勾配だけでなく、家屋の影響も受ける（例えば、中谷ら, 2012; Nakatani et al., 2014）ことから、避難経路等の安全度を検討するためには、それらの影響も考慮した上で土石流シミュレーションを行う必要がある。本研究では、家屋のほか、土石流の流下・堆積に影響を与えと考えられる流路工等も考慮した上で土石流シミュレーションを行い、土砂の堆積範囲や浸水範囲をもとに土石流発生時の避難経路や避難所の安全性の検討を行った。

2. 解析方法

2.1 解析対象地

本研究では、京都府内の土石流危険渓流（流域面積：0.127 km²）を対象に解析を行った。解析対象流域周辺の地形をFig. 1に示す。対象流域の下流側には要配慮者利用施設（老人福祉施設）や線路等が存在し、要配慮者利用施設およびその南側に位置する住宅地と避難所は線路によって隔てられている。

対象流域の渓流は流路工に導水されており、その流路は、対象渓流出口付近では要配慮者利用施設の方（東方向）に向かうが、途中、南方向に向きを変え、高速道路下を通過した後南側に位置する住宅地内の流路工につながり、住宅地内で再び東方向に向きを変える（Fig. 2）。流路工は、谷出口付近（Fig. 2右上写真）では幅が約4 m、深さが約5 mであるが、高速道路南側（Fig. 2右下写真）では幅が約2 m、深さが約1.5 mとなっており、谷出口付近に比べ流路工の断面が小さい。

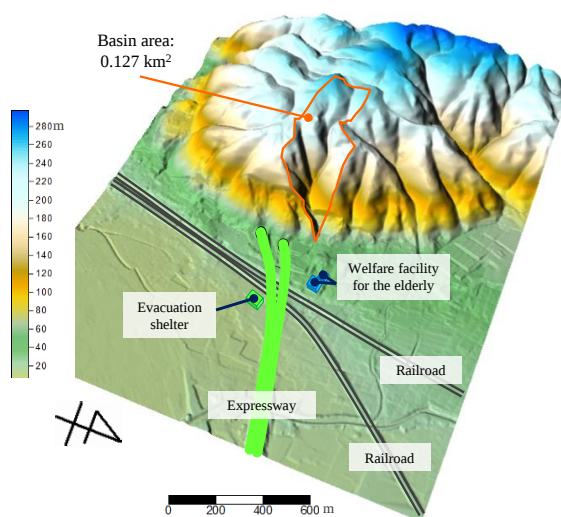


Fig. 1 Topography of study site

線路の西側に位置する要配慮者利用施設および住宅地の住民等が、線路の東側に位置する避難所まで移動する際の想定避難経路をFig. 3に示す。線路西側の住民等が避難所まで移動する場合、高速道路北側の高架道路または高速道路南側のアンダーパス（Photo 1）を通行すると考えられる。要配慮者利用施設から避難所まで移動する場合には高架道路および高速道路下の歩道を利用し、高速道路南側に位置する住宅地から避難所まで移動する場合には、線路下のアンダーパスおよび歩道を利用することが考えられる。ただし、線路下のアンダーパスは幅員が約2 mと比較的狭い通路となっている。



Fig. 2 Flow direction of the artificial channel

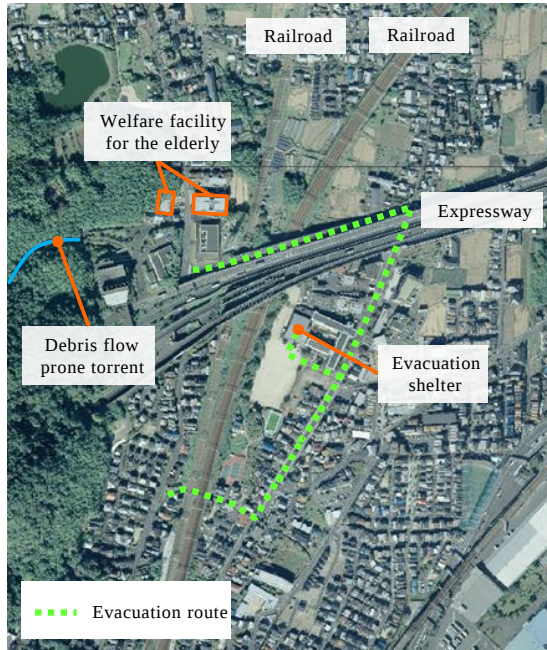


Fig. 3 Evacuation route



Photo 1 Underpass (passageway under railroad)

2.2 土石流の数値計算モデル

本研究では、Hyper KANAKOシステム（堀内ら，2012）を用いて土石流数値シミュレーションを行った。土石流の支配方程式は、高橋・中川（1991）のモデルを使用している。土石流計算の基礎方程式を以下に示す。なお、1次元計算では以下の方程式のx方向成分についてのみ考慮している。

水・土砂を含めた全容積の保存式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = i \quad (1)$$

Table 1 Parameters for the simulation

Parameters/Variables (Unit)	Value
Simulation time (s)	600
Time step (s)	0.01
Diameter of material (m)	0.05
Internal friction angle (deg)	35
Mass density of bed material (kg/m^3) σ	2,650
Mass density of fluid phase (kg/m^3) ρ	1,180
Concentration of movable bed	0.65
Acceleration of gravity (m/s^2)	9.8
Coefficient of erosion rate	0.0007
Coefficient of deposition rate	0.05
Manning's coefficient ($\text{s/m}^{1/3}$)	0.03
Interval of the 1D calculation points (m)	5
Mesh size in 2D area ($\text{m} \times \text{m}$)	1×1

土砂の体積の保存式

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} + \frac{\partial Chv}{\partial y} = iC_* \quad (2)$$

x 方向（流下方向）の土石流の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} \quad (3)$$

y 方向（横断方向）の土石流の運動方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} \quad (4)$$

河床変動の式

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (5)$$

ここに、 h ：流動深、 u ： x 方向の流速、 v ： y 方向の流速、 C ：土砂濃度、 H ：流動面標高（ $H = h + z$ ）、 z ：河床位、 t ：時間、 i ：侵食・堆積速度、 ρ ：間隙流体の密度、 C_* ：河床堆積物の体積濃度、 τ_x ： x 方向の河床せん断力、 τ_y ： y 方向の河床せん断力である。

土石流シミュレーション時に用いたパラメータを Table 1 に示す。本解析では、計算時間を600秒とし、

0.01秒間隔で計算を行った。土石流の砂礫密度および流体相密度は、京都府内で発生した土石流を対象に再現計算を行った既往研究（中谷ら，2014）を参考に、それぞれ $2,650 \text{ kg/m}^3$ および $1,180 \text{ kg/m}^3$ とした。一次元計算領域の河道幅を一律5 mに設定し、計算点間隔を5 mとした。二次元計算領域のメッシュサイズを $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ に設定し、要配慮者利用施設および避難所を含む、南北約1.0 km、東西約0.8 kmの範囲を二次元計算領域とした。土砂の粒径は、対象溪流の河床礫の大きさを考慮して、5 cmとした。

2.3 地形および家屋・流路工等の設定方法

土石流シミュレーション時に用いる地形条件は、国土地理院提供の5 m DEMデータから作成し、二次元計算領域のメッシュの高さを変えることで家屋・建物ならびに流路工等を考慮した。家屋については、家屋にあたるメッシュを、1階建ては3 m、2階建ては6 m、3階建て以上は10 m高く設定し、流路工については、流路工の管底高および地盤高データを参考に流路工の深さを確認し、流路工にあたるメッシュを低く設定した。その他、高速道路南側に位置する線路沿いの盛土部分にあたるメッシュを2 m高く設定した（Fig. 4）。

2.4 供給ハイドログラフ

計算時の供給ハイドログラフは、京都地方気象台の雨量データ（1930～2015）から岩井法を用いて算定した100年確率の時間雨量（88.9 mm/h）をもとに作成した。なお、京都地方気象台の1916年から2015年の100年間に観測された時間雨量の最大値は88.0 mm（1980年8月26日）となっていることから、算定された時間雨量は概ね妥当な値といえる。土石流発生時の流出率（降雨に対する流量の割合）は、土石流シミュレーションに関する既往研究（小杉ら，2015）を参考に70%（流出係数0.7）とした。土石流の継続時間は、土石流の観測事例（例えば、欧ら，1991；池田ら，1998）を参考に、土石流継続時間を360秒、ピーク継続時間を240秒として流量ハイドログラフを作成した（Fig. 5）。

2.5 供給土砂量

入力土砂量は、崩壊面積率および平均崩壊深から算定した。ここでは、本研究の対象流域と同様の地質が分布する流域において調べられた降雨強度と崩壊面積率の関係（松村ら，2015）を参考に、崩壊面積率を5%とし、平均崩壊深を1.5 mと仮定して入力土砂量を算定した。算定した崩壊土砂量（ $9,508 \text{ m}^3$ ）を土石流発生溪流（一次元計算領域）上に堆積させ、上流からの水の供給（Fig. 5）によって土石流を発生

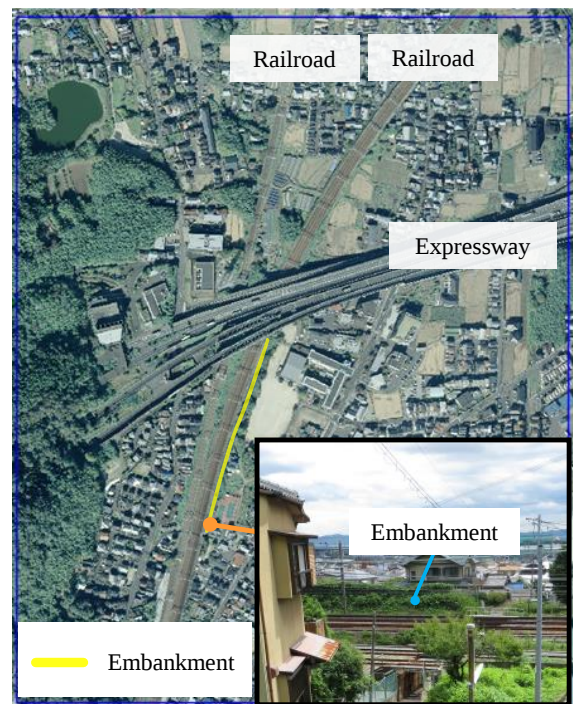


Fig. 4 Embankment along the railroad

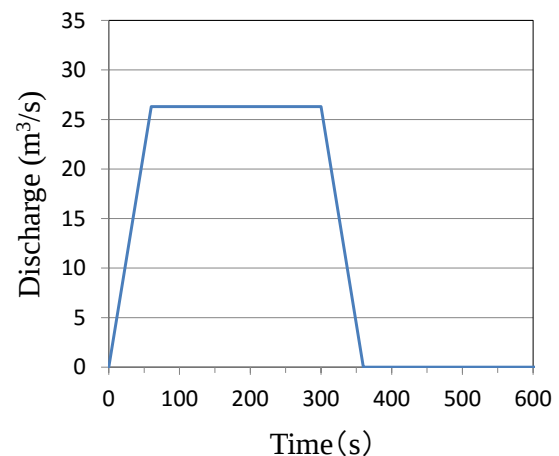


Fig. 5 Supplied hydrograph for simulation

させた。

3. 結果と考察

3.1 堆積厚

Fig. 6に、計算開始から600秒後の土砂の堆積厚を示す。なお、Fig. 6中で高速道路上に表示されている堆積厚は、高速道路下の流路工内の堆積厚である。

土石流発生溪流の下流側は、概して階段状の地形を呈しているため、土砂の多くは谷出口付近に堆積する結果を示した。下流側に氾濫した土砂の一部が要配慮者利用施設付近の道路に達し、高速道路北側の避難経路の一部に土砂が堆積する結果を示した。

また、土砂の一部は湾曲した流路工に沿って流下方向が変わり、流路工の深さが減じる高速道路南側の住宅地内で氾濫・堆積する結果を示した。この結果は、比較的大量の土砂が流路工内を流下した場合、土石流発生溪流の下流側に位置しない場所において土砂が堆積する可能性があることを示唆しており、流路工沿いの道路を通行する際には注意する必要があると思われる。なお、流路工にあたる部分の堆積厚は、流路工底面からの土砂の堆積厚を示している。流路工内の堆積土砂上面の高さを流路工沿いの道路面の高さ比べると、Fig. 2右上写真付近では堆積厚が約0.8 mとなっている。本解析で想定したケースでは、氾濫した土砂のほぼ全ては線路より西側に堆積するため、土砂の氾濫・堆積によって高架道路ならびにアンダーパスの避難経路としての安全性や、避難所の安全性が著しく低下する可能性は低いと考えられる。

3.2 痕跡

次に、計算開始から600秒後の痕跡（堆積厚+流動深の最大値）をFig. 7に示す。土砂の堆積範囲（Fig. 6）に重複しない範囲は浸水範囲を示している。なお、高速道路上に表示されている痕跡は、高速道路下の流路工、道路および線路上の痕跡である。土石流発生溪流の下流側に氾濫した水は、要配慮者利用施設付近の道路や線路に達する結果を示したが、高速道路北側の道路上の水深は比較的小さい傾向を示した。これに対し、高速道路南側の住宅地内の道路上の水深は比較的大きい結果を示した。これは、高速道路南側の住宅地内の流路工から氾濫した水が道路上を流下した水と合流するためである。また、道路上や線路上を流下した氾濫水が線路下のアンダーパスに集中し、アンダーパスが洪水流の流路となることによって、線路より東側に水が氾濫する結果を示した。土石流発生溪流より低い位置にアンダーパスが存在する場合には、氾濫水が集中する可能性があるため、避難経路として通行する際には特に注意が必要であると思われる。線路下のアンダーパスに水が流れ込んだ場合には、避難経路として通行するのを避け、高速道路北側の高架道路を避難経路とする方が危険性は低いと考えられる。

水の氾濫域は土砂の氾濫域よりも広く、線路東側の一部に浸水域が広がっているが、浸水域は避難所には到達しない結果を示した。これは、線路沿いの盛土が影響しており、盛土部分が土手の役割を果たしていることで避難所の浸水を抑制していると考えられる。

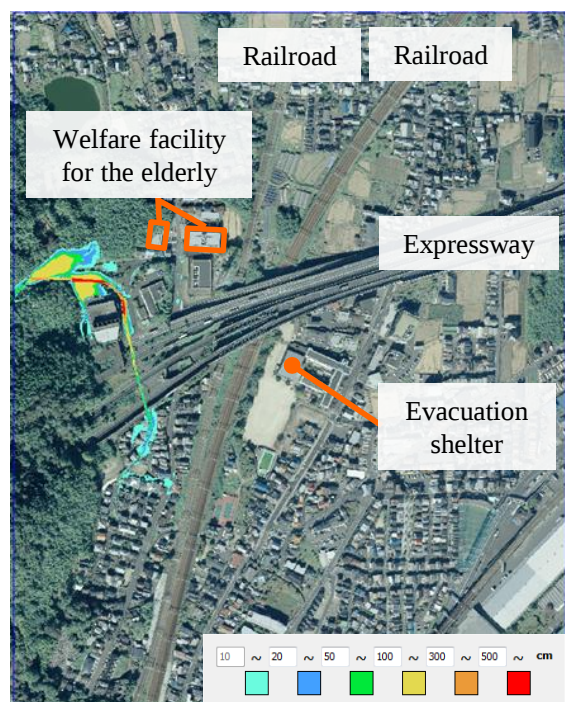


Fig. 6 Simulation result for deposition thickness

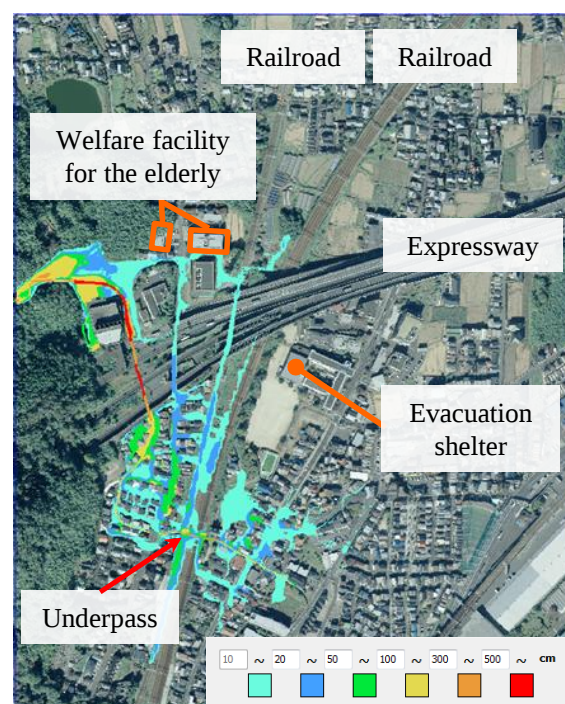


Fig. 7 Simulation result for debris flow trace (maximum flow depth and deposition thickness)

4. まとめ

家屋や流路工等を考慮して土石流シミュレーションを行い、土石流発生時の避難経路の安全性について検討した。100年確率の時間雨量（88.9 mm/h）によって土石流が発生した場合、要配慮者利用施設か

ら避難所までの避難経路の一部が浸水し、土砂が堆積する結果を示した。また、高速道路南側の住宅地において流路工から土石流が氾濫する結果を示したことから、流路工の流下方向によっては土石流発生溪流の下流側に位置しない場所においても土砂が氾濫・堆積する可能性があり、流路工沿いの道路を避難経路とする場合には注意を要することが分かった。

また、氾濫した水が道路上や線路上を流下して線路下のアンダーパスに集中する結果を示したことから、土石流発生溪流よりも低い場所にアンダーパスがある場合は、氾濫水の集中に注意する必要があることも分かった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、京都府砂防課より貴重なデータの提供を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 池田暁彦・門馬直一・堀内成郎・山田利治 (1998) : 滑川北股沢で発生する土石流について, 砂防学会誌, 第51巻, 2号, pp. 31-38.
- 石井崇・長井隆幸・福田光生・岩田涼乃・間野達・牧野裕至・永田雅一・千葉幹・西村直記 (2016) : 立山砂防事務所における住民と行政の共同による地域防災力向上のための取り組み, 平成28年度砂防学会研究発表会概要集B, pp. B-164-B-165.
- 欧国強・小橋澄治・水山高久 (1991) : 土石流ピーク流量の推定, 砂防学会誌, 第44巻, 4号, pp. 24-29.
- 小杉恵・中谷加奈・長谷川祐治・里深好文・水山高久 (2015) : 家屋の存在が土石流の氾濫・堆積に及ぼす影響-2014年8月広島土砂災害を対象として-, 平成27年度砂防学会研究発表会概要集B, pp. B-76-B-77.
- 佐藤寛容・城ヶ崎正人・安井広之・漕江茂裕・坂野弘太郎・竹島彰子・堀大一郎・清水幹輝・吉川卓郎 (2016) : 奈良県における地域防災マップづくりによる防災力向上への取り組み, 平成28年度砂防学会研究発表会概要集B, pp. B-168-B-169.
- 高橋保・中川一 (1991) : 豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 砂防学会誌, 第44巻, 3号, pp. 12-19.
- 土志田正二・新井場公徳 (2016) : 平成26年8月広島豪雨により発生した二次崩壊現象の解明, 平成28年度砂防学会研究発表会概要集A, pp. A-14-A-15.
- 中谷加奈・奥山悠木・長谷川祐治・里深好文・水山高久 (2012) : 扇状地における家屋が土石流の氾濫・堆積に与える影響, 砂防学会誌, 第60巻, 4号, pp. 15-23.
- 中谷加奈・里深好文・藤田正治・水山高久 (2014) : 平成24年7月に京都府亀岡市南条で発生した土石流の検討-構造物の影響を考慮して-, 自然災害科学, 第33巻, 1号, pp. 17-27.
- 堀内成郎・岩浪英二・中谷加奈・里深好文・水山高久 (2012) : LPデータを活用した土石流シミュレーションシステム「Hyper KANAKO」の開発, 砂防学会誌, 第64巻, 6号, pp. 25-31.
- 松村和樹・長谷川祐治・藤本将光・中谷加奈・西川友章・笠原拓造・柳崎剛・鏡原聖史・加藤智久・岡野和行・鈴木崇・平岡伸隆 (2015) : 2014年8月の豪雨による兵庫県丹波市で発生した土砂災害, 砂防学会誌, 第68巻, 1号, pp. 60-67.
- Kana NAKATANI, Satoshi HAYAMI, Yoshifumi SATOFUKA, Takahisa MIZUYAMA (2014): Case study of debris flow disaster scenario caused by torrential rain on Kiyomizu-dera, Kyoto, Japan; applying Hyper KANAKO system, proceedings of the 2014 International Debris-Flow Workshop.

(論文受理日: 2016年6月13日)