

宅地域における土石災害警戒区域等の評価と 土石流氾濫リスクの空間分布

中本 英利¹・竹林 洋史²・藤田 正治³

¹正会員 修士（工学） 株式会社東京建設コンサルタント関西本社
（〒530-0042 大阪市北区天満橋 1-8-63 トークン大阪ビル）

E-mail: nakamoto-h@tokencon.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 博士（工学） 京都大学准教授 防災研究所（〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口）

E-mail: takebayashi.hiroshi.6s@kyoto-u.ac.jp

³正会員 工学博士 京都大学教授 防災研究所（〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口）

E-mail: fujita.masaharu.5x@kyoto-u.ac.jp

2018年7月に広島市安芸区矢野東の梅河団地で発生した複数の土石流を対象に、土石流の数値シミュレーションを実施し、土石流の流動特性を検討するとともに、設定されている土石災害警戒区域（イエローゾーン）や土石災害特別警戒区域（レッドゾーン）の評価を行った。宅地域における家屋に作用する最大応力の大きい領域は、破壊した家屋の分布と良く一致していた。土石災害特別警戒区域（レッドゾーン）以外でも、家屋が破壊するおそれのある箇所が存在すること示した。また、複数の斜面崩壊の発生タイミングや斜面崩壊数の違いにより、宅地域に流入した土石流の氾濫域や流動深の空間分布を検討した。避難計画等を検討する上では、宅地に流入する土石流の規模やタイミングを考慮すること、複数の溪流からの土石流出量を考慮することの重要性を示した。

Key Words: Debris flow, Destruction of house, Numerical analysis, Hazard map, Sediment disaster

1. はじめに

近年、短時間で高強度の豪雨によって、多発的な斜面崩壊に伴う土石流が発生している。その結果、土石流が宅地へ流入した箇所では、多くの家屋被害や人的被害が生じている。2014年8月に広島市安佐南区八木三丁目発生した土石流では、少なくとも本川源頭部で3箇所、支川源頭部で2箇所¹⁾の斜面崩壊が発生した。2018年7月の西日本豪雨でも、広島県安芸郡熊野町では、山頂付近の2箇所と中腹付近の1箇所²⁾、広島市安芸区矢野東では、山頂付近の3箇所³⁾で斜面崩壊が発生し、いずれも斜面崩壊を起因とした土石流が下流の宅地域に氾濫し、甚大な被害が生じている。また、同時もしくは時間をおいて多発的に発生した土石流は、先に発生・堆積した土石流を次の土石流が浸食するとともに、溪床や河岸などを浸食して土石流の規模を大きくしたと考えられる。

現在、住民が知ることのできる土石災害情報の一つに、土石災害警戒区域（イエローゾーン）及び土石災害特別警戒区域（レッドゾーン）がある。これらの区域は、各自治体によって設定され、土石災害に対する避難・警戒、家屋建造可否や家屋を守るための防災対策など非常に有

効な情報となっている。土石災害警戒区域等の設定に用いられる土石流の氾濫域は、地形勾配のみで設定する簡便な方法が用いられている。また、土石流溪流からの土石流出量は、最も規模の大きい単一の溪流からの土石流出量を想定しており、支川や複数溪流からの土石流出等は考慮されていない⁴⁾。一方で、近年では、土石流の数値シミュレーションを用いて、宅地域の家屋や道路の影響を考慮した土石流の流動特性や被災状況の再現等が行われるようになっており^{5) 6)}、数値シミュレーションから得られる情報も非常に有効な情報となっている。しかし、谷出口から上流区間を最も流出土砂量の大きい単一溪流の一次元領域として取り扱う等、複数溪流から発生した土石流やその発生タイミングが宅地域へ与える影響が十分に見込まれていない等の課題が挙げられる。

そこで、本研究では、2018年7月の西日本豪雨による広島での複数斜面崩壊がみられた土石災害事例を対象に、土石流の数値シミュレーションを実施し、土石流の流下範囲や家屋に作用する土石流の流体力分布を明らかにするとともに、設定されている土石災害警戒区域（イエローゾーン）や土石災害特別警戒区域（レッドゾーン）の評価を行う。また、複数の斜面崩壊の発生タイミングや

斜面崩壊数の違いが、宅地に流入する土石流の氾濫域や流動深の空間分布に与える影響を検討し、土石災害警戒区域等との関係について考察する。

2. 土石災害警戒区域等の課題

土石災害警戒区域（イエローゾーン）は、土石災害が発生した場合に、住民等の生命または身体に危害が生じるおそれがある区域、土石災害特別警戒区域（レッドゾーン）は、土石災害が発生した場合に、建築物に損壊が生じ住民等の生命または身体に著しい危害が生じるおそれがある区域であり、土石流の場合は、それぞれ、土石流が氾濫する区域、土石流により家屋が倒壊する区域と考えることができる。

2018年7月の西日本豪雨では、土石災害による死者の約9割は、土石災害警戒区域等で発生していた一方で、土石災害警戒区域（イエローゾーン）内ではあるが、土石災害特別警戒区域（レッドゾーン）外で家屋の全壊が生じた事例や土石災害警戒区域（イエローゾーン）外においても家屋の全壊被害が生じ死者が発生した事例も確認されている⁷⁾。また、過去の土石災害16事例の検証結果⁸⁾では、実際の被災家屋のうち、土石災害特別警戒区域（レッドゾーン）と同様の方法で設定された家屋被災範囲に含まれるのは、約7割程度に留まっている。これらの要因は、両警戒区域の設定方法に起因すると考えられる。両警戒区域は基礎調査結果をもとに設定され、土石災害警戒区域（イエローゾーン）は、土石流扇状地の上流端である土石流堆積開始地点を起点とした扇形の土石流氾濫域を想定し、地盤勾配が緩やかになる地点（勾配 2° ）を土石流の氾濫範囲の下端とした区域とされ地形条件のみで設定される。土石災害特別警戒区域（レッドゾーン）は、土石流により建築物に作用すると想定される流体力が建築物の耐力を上回る範囲を区域として設定するが、いずれも等流仮定や経験式から算出されるものである⁴⁾。現状の土石災害警戒区域等の設定方法は、全国の膨大な土石流危険溪流に適用するために簡便な方法が用いられており、家屋が存在しない想定など、ある一定レベルの精度で氾濫域等の予測はできるが、谷出口で溪流が屈曲した局所的な地形や家屋・道路等の影響を踏まえた土石流の動態までは捉えることができていない。

3. 対象地区と被災状況

本研究では、2018年7月の西日本豪雨により土石流が発生し多くの家屋が被災した広島市安芸区矢野東の梅河団地を対象とする（図-1参照）。梅河団地では、北側の13溪流、南側の14溪流で土石災害警戒区域等が設定されており、中谷ら⁶⁾、長谷川ら⁹⁾により数値シミュレーション

を用いた土石災害警戒区域内の土石堆積状況や危険度分布の検討が行われている。また、北側の13溪流では、被災前の2018年2月に土石流を捕捉できる機能を持たせた新しいタイプの治山ダムが設置されている。本数値シミュレーションでは、家屋の破壊を発生させた北側の13溪流で発生した土石流を対象に、土石流の発生箇所から宅地までを二次元領域として解析を実施した。図-2に13溪流出口において破壊された家屋の位置を示す。家屋



図-1 被災前後の状況（梅河団地）

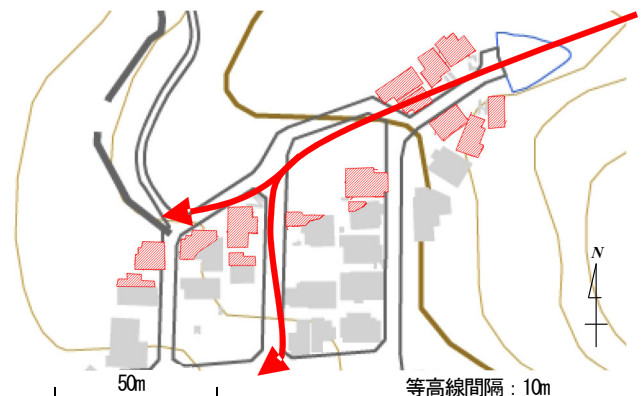


図-2 被災した家屋（赤斜線）と土石流の流れ

の破壊は、主として宅地の北側を直線的に流れた土石流によって引き起こされている。多くの家屋が全壊となっているが、全壊家屋の南側に一部半壊している家屋もある。

4. 数値シミュレーションの概要

(1) 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¹⁰⁾を用い、細粒土砂が水と混合することにより水と土砂の混合物として液相のように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¹¹⁾を用いる。本対象溪流では、比較的規模の大きい二つの溪流が存在するため、全解析区間に平面二次元土石流モデルを適用した。家屋に作用する応力 F_{hx} は、家屋の解析格子に働く単位幅あたりの流下方向の応力であり、静水圧近似による静的な圧力と運動エネルギーによる流体力の和で評価し、以下の式¹²⁾で算出した。

$$F_{hx} = \frac{1}{2} \rho_m g h^2 \cos \theta + \rho_m h u^2 \quad (1)$$

ここに、 g は重力加速度、 h は流動深、 θ は地形勾配、 u は流速、 ρ_m は以下の関係がある。

$$\rho_m = (\sigma - \rho) \bar{c} + \rho \quad (2)$$

ここに、 ρ は水の密度、 σ は土砂の密度、 \bar{c} は流動深平均の土砂濃度である。

(2) 解析条件

解析領域は、図-3の航空写真内の黒枠で示された領域であり、梅河団地13溪流源頭部から矢野川までの約950m×400mの領域である。地形データは、国土地理院により被災前に測定されたもので、平面的に5mの解像度のDEMデータである。解析格子は、家屋の形状や道路を流下する土石流を表現するため、2m×2mの正方形格子を用いる。実際の土石流の発生箇所、及び規模は不明であるが、斜面崩壊を発端として発生するものとした。土石流の流下距離が十分長く、斜面崩壊の大きさ自体は下流域での土石流の規模にほとんど影響を与えない¹³⁾と考えられることから、境界条件として、溪流上端の斜面崩壊地点で流体化した水と土砂の混合物（堆積濃度0.6、約5m³）が初期の斜面に流速ゼロで存在するものとした。斜面崩壊は、図-3に示すように北側の溪流山頂付近に1箇所、南側の溪流山頂付近に2箇所の計3箇所を考慮する。現地の状況から、南側の溪流からの土石流が北側の溪流の土石流よりも先に発生していると考えられるため、本解析では、南側の2つの溪流から同時に発生した土石流が宅地に到達した直後（100秒後）に、北側の溪流で斜面崩壊を発生させる条件とした。河床材料の

粒径は、最大粒径が約50cmで数cm程度と報告⁶⁾があるが、著者らの現地調査結果を踏まえて1cmとした。治山ダムは非浸食性の構造物として扱い、高さは現地で計測した値を用いた。宅地の中の家屋は、非浸食域としたが、土石流によって流された家屋については、本解析では家屋が無いと仮定して扱っている。

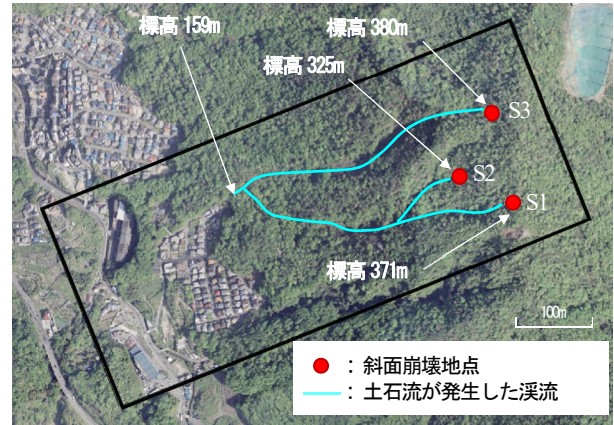


図-3 解析領域と斜面崩壊地点

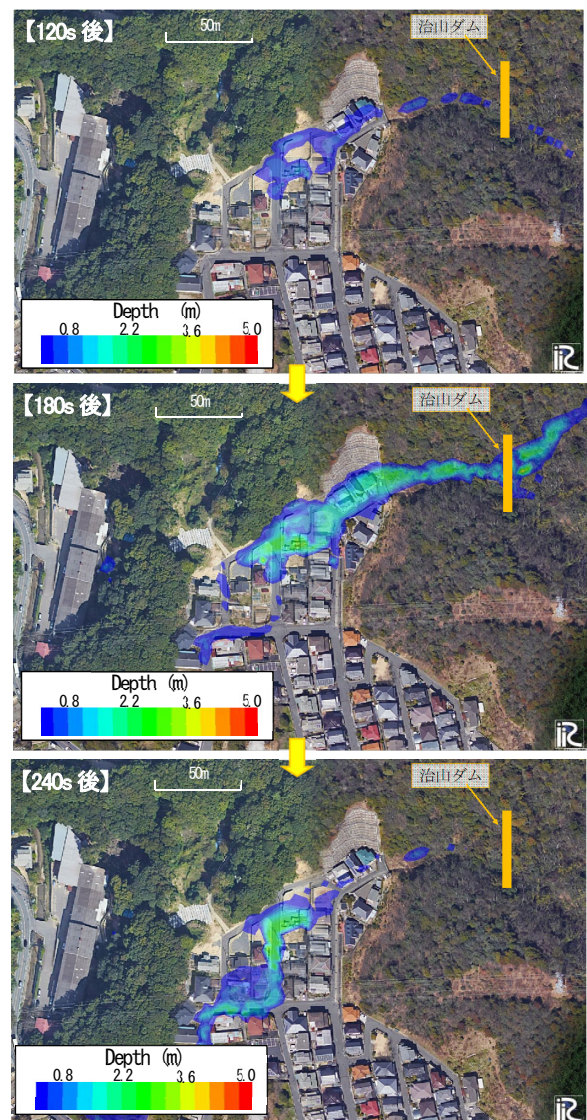


図-4 宅地内における流動深の時空間的な変化

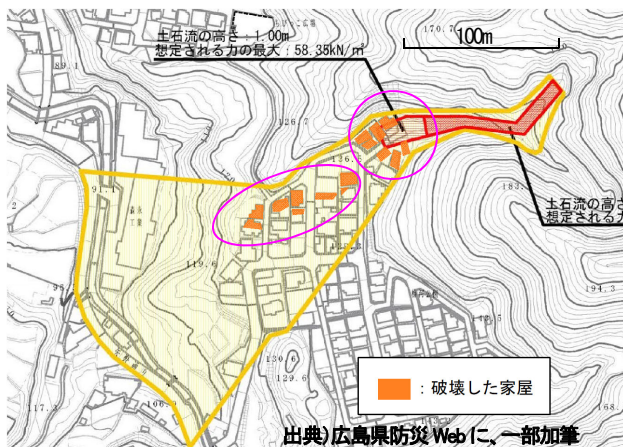


図-5 土砂災害警戒区域等と家屋被害の分布

5. 宅地域における家屋倒壊の再現と土砂災害警戒区域等の評価

図-4に数値シミュレーションによって得られた梅河団地内における土石流の流動深の時空間的な変化を示す。120秒の時点では、南側の溪流で発生した土石流のみが宅地に流れ込んだ状態である。南側溪流からの土石流は宅地上流の治山ダムに一部堆積するため、宅地内における流動深は非常に小さい。180秒以降は北側の溪流からの土石流も宅地に流れ込んでいる。180秒の時点では土石流が宅地北側を直線的に西に向かって流れている。これらのことから、対象地点の家屋の多くは北側溪流からの土石流によって破壊された可能性が高い。240秒の時点では、宅地北側に堆積した土砂により、土石流が西に直線的に流ることができなくなり、土石流の流れが宅地中央の道路を南下している。なお、本数値シミュレーションによる治山ダム上流域の浸食量は約6,400m³であり、治山ダムの堆積可能容量約2,400m³を大きく上回る。

図-5に、梅河団地13溪流に設定されている土砂災害警戒区域（イエローゾーン）、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）を示す。図には、2018年7月豪雨時に発生した土石流により破壊した家屋も示している。破壊家屋は、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）内ではあるが、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）の外となっており、土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）以外でも、家屋が破壊するおそれのある箇所が存在することが示唆される。図-6に、数値シミュレーションによる240秒までに土石流が家屋に作用した最大応力の分布を示す。宅地北側における家屋に作用する最大応力が非常に大きくなっており、土石流は団地を通過して北西の崖下の工場（イエローゾーン外）にまで達している。図-2と比較すると、宅地域における家屋に作用する最大応力の大きい領域は、破壊した家屋の分布とよく一致していることがわかる。本解析では、土石流によって流された家屋は無いものと仮定して扱っているが、家屋があった場合、家

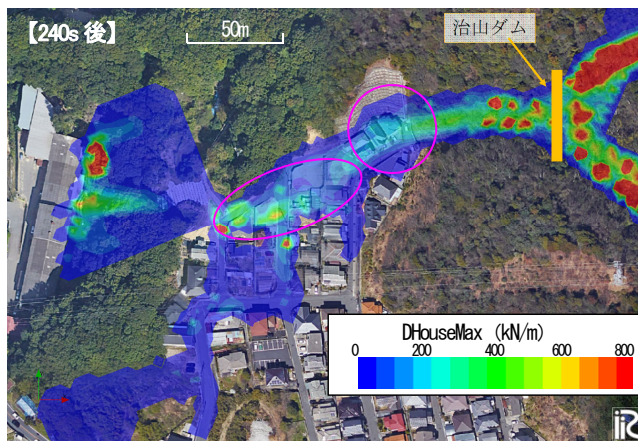


図-6 家屋に作用する最大応力

表-1 解析ケースと解析条件

ケース名	斜面崩壊の条件
Case 0	南側溪流のS1, S2が同時に崩壊後、土石流が宅地に到達した直後（100秒後）に北側溪流のS3が崩壊（図-4の条件と同条件）
Case 1	南側溪流のS1, S2, 北側溪流のS3が同時に崩壊
Case 2	南側溪流のS1のみ崩壊
Case 3	南側溪流のS2のみ崩壊
Case 4	北側溪流のS3のみ崩壊

※S1, S2, S3は、図-3の斜面崩壊地点を示す。

屋前面に土石流が堆積し、さらに大きな応力が作用すると考えられる。また、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）内においても、土石流が流れてこない被災リスクが低い箇所が存在しており、避難を考える上で非常に重要な情報となる。

6. 土石流氾濫リスクの空間分布

本研究で対象とした梅河団地の土砂災害事例では、時間差で生じた複数の斜面崩壊により発生した土石流が、土石流を捕捉できる機能を持つ治山ダムを越えて宅地に流入し、氾濫したものである。図-4の数値シミュレーション結果からも、南側の溪流で発生した1回目の土石流は、治山ダムに一部捕捉されたため、宅地へ流入した土石流の流動深は小さかったものの、北側の溪流で発生した2回目の土石流は、ほぼ満砂の治山ダムを越えて宅地に流入し、家屋の破壊を伴うほど流動深が大きくなったと考えられる。このように、複数の斜面崩壊のタイミングや斜面崩壊数の違いによっては、宅地域に流入する土石流の氾濫域・流動深も大きく異なることが想定され、宅地域の土石流氾濫リスクを考える上で非常に重要な条件となってくる。そこで、表-1に示す斜面崩壊の条件をもとに数値シミュレーションを実施し、複数の斜面崩壊

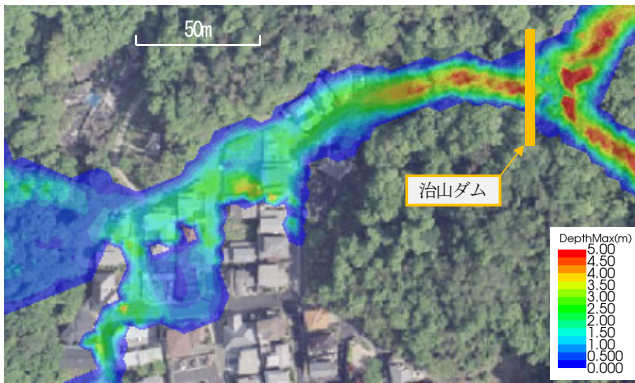


図-7(1) 最大流動深の空間分布 (Case 0)

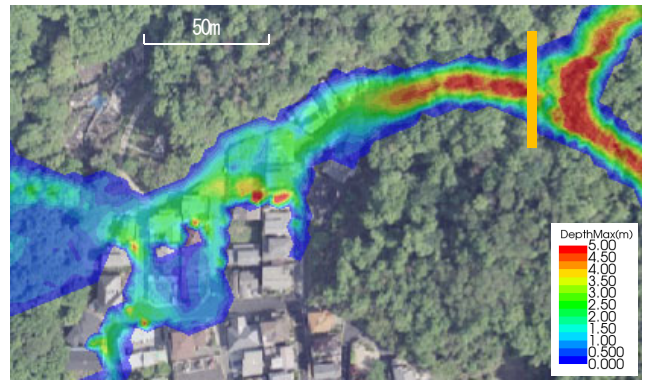


図-7(2) 最大流動深の空間分布 (Case 1)

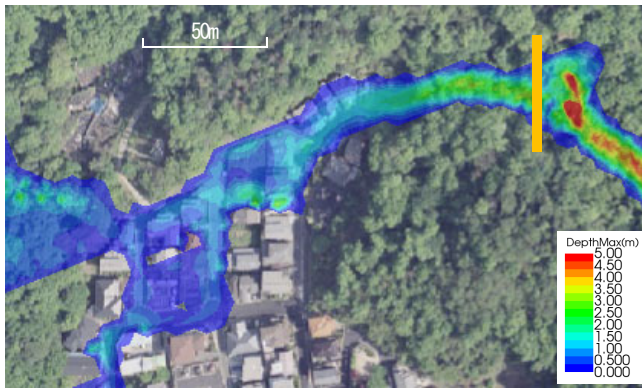


図-7(3) 最大流動深の空間分布 (Case 2)



図-7(4) 最大流動深の空間分布 (Case 3)

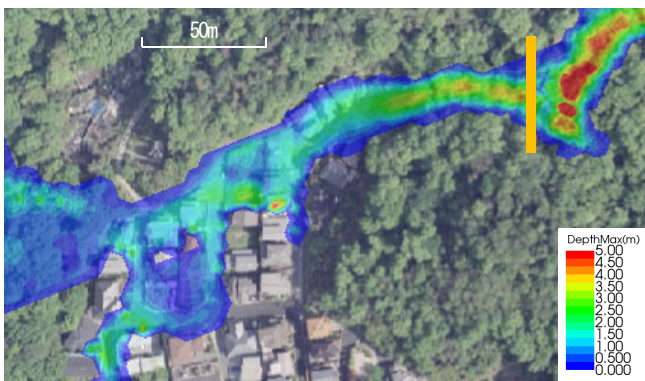


図-7(5) 最大流動深の空間分布 (Case 4)

のタイミングや斜面崩壊数の違いによる宅地域の土石流氾濫リスクの空間分布を検討した。

図-7に各ケースの数値シミュレーションによって得られた梅河団地における最大流動深の空間分布を示す。Case 0は南側溪流の斜面崩壊と北側溪流の斜面崩壊に時間差が生じたケース、Case 1は南側と北側の溪流の斜面崩壊が同時に生じたケースである。Case 1では、南側溪流で発生した土石流と、北側溪流で発生した土石流は、ほぼ同時に治山ダム地点に到達し合流する。そのため、治山ダム上下流において、Case 0に比べて流動深が大きくなっており、5m以上の流動深で宅地域に流入している。Case 0とCase 1を比べると、宅地域に流入する土石流の土砂量はCase 1の方が大きいので、流動深は大きくなり、特に家屋の前面等でその影響は顕著にみられる。一方で、土石流の氾濫範囲はほとんど変わっていないこと

がわかる。ただし、時系列的にみると、Case 0では、1回目の土石流で宅地北側を西に直線的に流れ堆積し、2回目の土石流で宅地中央の道路を南下するのに対し、Case 1では、宅地北側を西に向かう流れと、宅地中央の道路を南下する流れがほぼ同時に生じている。このことは、宅地に流入する土石流の規模やタイミングを考慮することによって、土石流氾濫リスクの空間分布が得られ、土石流の氾濫が生じにくい箇所等、優先的に避難場所や避難経路等を選定することができることを示している。

Case 2とCase 3は、同じ南側溪流の斜面崩壊であるが、Case 2は土石流が宅地内に流入し氾濫しているのに対し、Case 3では、溪流の出口付近で土石流が堆積して止まっている。これは、Case 2（斜面崩壊地点は図-3のS1）がCase 3（斜面崩壊地点は図-3のS2）に比べて、斜面崩壊地点の標高が高く流下距離が長い点、また、Case 2の方が上流域の勾配が急なため、土石流が流下する過程で溪床や河岸を多く浸食し、土石流の規模を大きくした点が考えられる。このように同じ溪流でも斜面崩壊地点の違いにより、宅地に流入する土石流の規模が異なることがわかり、被害を想定する際には条件設定やケース設定に注意が必要である。

Case 4は、北側溪流のみで斜面崩壊が生じたケースである。Case 2と比べると、土石流の氾濫範囲はほとんど同じであるが最大流動深はCase 4の方が相対的に大きく、南側溪流より北側溪流からの流出土砂量が多いことがわかる。従来、土石流溪流からの土砂流出量は、最も規模

の大きい単一の溪流からの土砂流出量を用いることになっているが、本研究の対象溪流のような場合、南側溪流、北側溪流のどちらを想定しても土石流の範囲はほぼ同じであるが、宅地域に氾濫する土石流の流動深は大きく異なるため、避難計画等を立案する際には、溪流からの土砂流出量を小さく見積もらないよう、複数の溪流からの土砂流出量を考慮する必要がある。

7. おわりに

広島市安芸区矢野東の梅河団地で発生した複数の土石流を対象に、土石流の数値シミュレーションを実施し、土石流の流動特性を検討するとともに、設定されている土砂災害警戒区域等の評価を行った。対象地点の家屋の多くは第2波である北側溪流からの土石流によって破壊された可能性が高いことが明らかとなった。また、宅地内における家屋に作用する最大応力の大きい領域は、破壊された家屋の分布と良く一致していた。土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）以外でも、家屋が破壊するおそれのある箇所が存在すること示唆された。さらに、複数の斜面崩壊の発生タイミングや斜面崩壊数の違いにより、宅地域に流入した土石流の氾濫域や流動深の空間分布を検討した。避難計画等を検討する上では、宅地に流入する土石流の規模やタイミングを考慮すること、複数の溪流からの土砂流出量を考慮することの重要性を示した。

参考文献

- 1) 竹林洋史, 藤田正治, 江頭進治: 2014年8月に広島で発生した土石流の流動・氾濫特性, 京都大学防災研究所年報, No.58A, pp.34-39, 2015.
- 2) 竹林洋史, 藤田正治: 2018年7月に広島県安芸郡熊野町で発生した土石流の宅地内の氾濫特性, 京都大学防災研究所年報, No.62A, pp.6-12, 2019.
- 3) 竹林洋史, 藤田正治: 2018年7月に広島市安芸区矢野東で発生した土石流の流動特性, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.2, pp.I_859-I_864, 2019.
- 4) 広島県土木建築局: 基礎調査マニュアル (案) (土石流編・システム利用), pp.4-10-4-169, 2016.
- 5) 中谷加奈, 小杉恵, 里深好文, 水山高久: 家屋や道路が土石流の氾濫・堆積に及ぼす影響—2014年8月に発生した広島土砂災害を対象として—, 砂防学会誌, 第69巻, 5号, pp.3-10, 2017.
- 6) 中谷加奈, 長谷川祐治, 笠原拓造, 海堀正博, 里深好文: 平成30年7月豪雨で発生した土石流被害と谷出口の道路の影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), 第75巻, 1号, pp.403-413, 2019.
- 7) 国土交通省: 「実効性のある避難を確保するための土砂災害対策のあり方について」報告書, 2018.
- 8) 寺田秀樹, 水野秀明: 土石流による家屋被災範囲の設定方法に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.70, 2003.
- 9) 長谷川祐治, 中谷加奈, 海堀正博, 里深好文: 土砂災害警戒区域内の住宅地における土石流の危険度分布の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), 第75巻, 2号, pp.I_181-I_186, 2019.
- 10) 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.
- 11) Hiroshi Takebayashi, Masaharu Fujita.: Numerical Simulation of a Debris Flow on the Basis of a Two-Dimensional Continuum Body Model, Geosciences, 10, 45, 2020.
- 12) 中本英利, 竹林洋史, 宮田英樹, 藤田正治: 家屋の破壊過程を考慮した土石流の数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, 土木学会, p.I_919-I_924, 2018.
- 13) 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, 5号, pp.38-42, 2016.

(Received May 31, 2022)

(Accepted September 1, 2022)

EVALUATION OF SEDIMENT DISASTER HAZARD AREAS AND SPATIAL DISTRIBUTION OF DEBRIS FLOW INUNDATION RISK IN RESIDENTIAL AREAS

Hidetoshi NAKAMOTO, Hiroshi TAKEBAYASHI and Masaharu FUJITA

Numerical simulations of debris flows were performed for several debris flows that occurred in Umegou Danchi, Yanohigashi, Hiroshima in July 2018, to study the flow characteristics of debris flows and to evaluate the established sediment disaster hazard areas, etc. The areas of high maximum stress acting on the houses in the residential areas were in good agreement with the distribution of the destroyed houses. The results showed that even outside of the sediment disaster special hazard areas, there are areas where houses may be destroyed. In addition, we investigated the spatial distribution of the inundation area and flow depth of the debris flow that flowed into the residential area, depending on the timing of occurrence of multiple landslides and the difference in the number of landslides. When considering evacuation plans, it was shown that it is important to consider the scale and timing of the sediment flow that flows into the residential areas, and to consider the amount of sediment runoff from multiple mountain streams.