

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

中本 英利¹・竹林 洋史²・宮田 英樹³・藤田 正治⁴

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 トーケン大阪ビル）

E-mail: nakamoto-h@tokencon.co.jp

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 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 トーケン大阪ビル）

E-mail: miyata-h@tokencon.co.jp

⁴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

宅地内の家屋の一部が全壊・半壊した 2014 年の広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流を対象とし、家屋の破壊過程を考慮した平面二次元の土石流数値シミュレーションを実施し、家屋の存在が土石流の氾濫域に与える影響を検討した。その結果、本数値シミュレーションモデルによって、家屋の半壊・全壊の状態を比較的良く再現できた。また、家屋の破壊を無視すると、土石流の主流域が家屋が少ない領域に移動するとともに、氾濫範囲が狭く評価されることが明らかとなった。さらに、家屋を考慮しない数値シミュレーションでは、土石流は扇形に広く薄く流れて土石流扇状地を形成した。その結果、家屋を考慮した場合は氾濫域が大きく異なった。このような氾濫域の違いは、遠方への避難が困難な場合に、少しでも生存率を高めるための避難候補地の決定において非常に有効な情報である。

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

1. はじめに

2013 年の伊豆大島、2014 年の南木曾・広島、2017 年の朝倉・日田など、短時間で高強度の豪雨によって発生した表層崩壊に起因した土石流・泥流により宅地が被災する土砂災害が近年頻発している。2014 年 8 月の広島市安佐北区、安佐南区等で発生した局地的豪雨では、75 名もの人命が失われた。表層崩壊に起因した土石流は、降雨継続時間が短くて総降水量が小さくても、降雨強度が高いと発生しやすい。そのため、地球温暖化による気象特性の極端化によって表層崩壊に起因した土石流・泥流の発生回数が増加することが予想され、土石流・泥流の宅地での動態の解析と解析結果にもとづいた効果的な対策が求められている。

下流域に宅地などが存在する山地溪流では、土砂災害の警戒区域が各自治体によって設定されている。土砂災害警戒区域の設定に用いられる土石流の氾濫域は、質量保存則及び運動量保存則に基づいた数値シミュレーション

によって得られた結果は用いられておらず、土石流扇状地の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砂氾濫域を想定し、地盤勾配が緩やかになる地点（勾配 2 度）を土石流氾濫範囲の下端としている。このような簡便な方法が用いられているのは、土石流溪流が非常に多いことと、このような計算方法でもある一定レベルの精度で氾濫域が予測できるためである。しかし、実際の土石流は、氾濫域の建物や道路の影響を受け、より複雑な形状で氾濫する。

従来、土石流・泥流の数値シミュレーションでは、10m～20m 程度の解析格子を用いて解析することが多く、宅地内の家屋や道路の形状を考慮した解析はほとんど実施されていない。そのような中、竹林¹⁾は、2014 年広島市で発生した土砂災害に対して、家屋の存在を考慮した土石流の数値シミュレーションを実施し、土石流の氾濫域を再現している。中谷ら²⁾も、2014 年広島市で発生した土砂災害に対して、家屋の存在を考慮した土石流の数値シミュレーションを実施しており、家屋の存在によっ

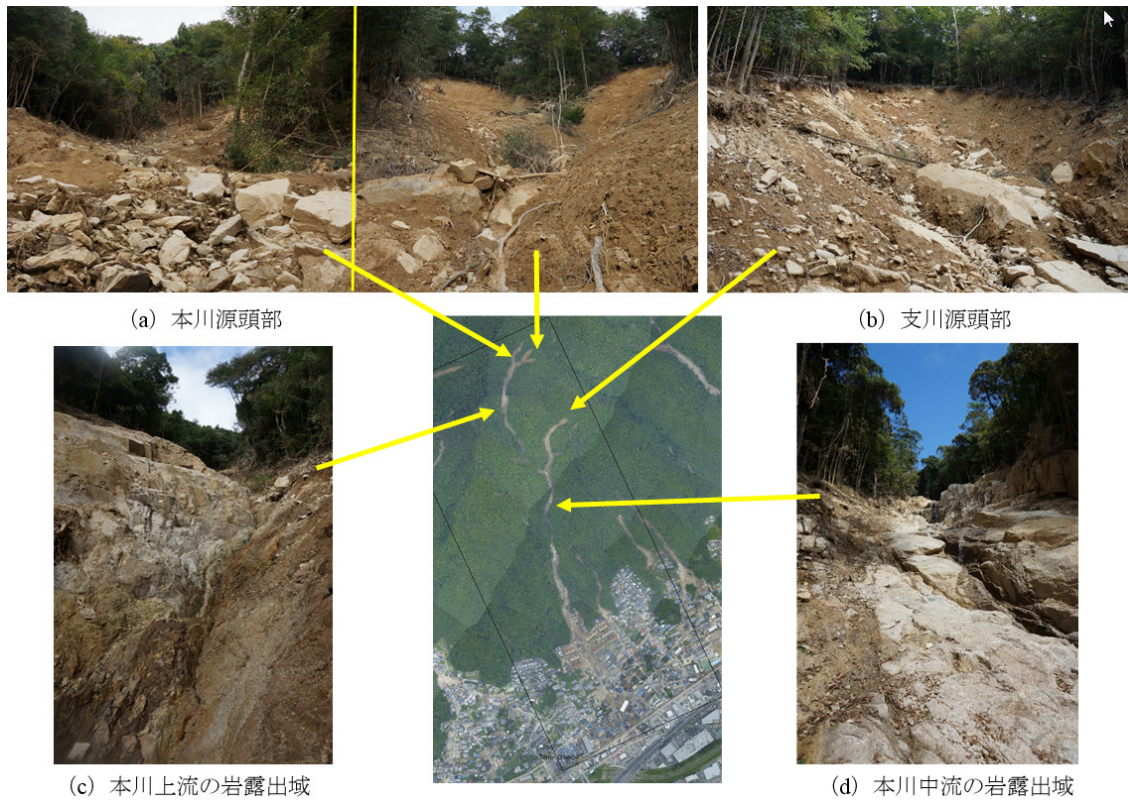


図-1 広島市安佐南区八木三丁目の斜面崩壊跡と岩露出域

て土石流が横断的に広がる宅地が存在することが示されている。しかし、これらの数値シミュレーションは、家屋を不透過な非破壊構造物として扱っており、家屋の破壊過程を組み込んだ土石流・泥流の数値シミュレーション法に関する研究事例はみられない。

家屋の倒壊については、洪水氾濫や津波などに対してはいくつかの既存研究が存在する。洪水氾濫に関する家屋の倒壊条件については、佐藤ら³⁾は、洪水氾濫過程の数値シミュレーション結果をもとに、観測された床上浸水深、最大流体力及び被害度の関係から、流体力が $2.5\text{m}^3/\text{s}^2$ を超えると住居不可能となる家屋が出現するとしている。高橋ら⁴⁾は、家屋に作用する流体力とモーメントに関する実験結果より、家屋の破壊限界に関する流速と水深の関係式を導き、再現計算結果と被害家屋の調査データがよく一致することを示している。「洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）」⁵⁾では、氾濫流に対する家屋倒壊等の危険性を表す「洪水時家屋倒壊危険ゾーン」を設定する条件として、木造2階建てのモデル家屋を想定した荷重条件等より倒壊・滑動・転倒限界の関係式を示している。しかし、土石流・泥流による家屋の破壊プロセスは洪水とはいくつかの点で異なっており、これらの方法をそのまま適用するのは困難である。

本論文では、宅地内の家屋の一部が全壊・半壊した2014年の広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流を対象とし、家屋の破壊過程を考慮した平面二次元の土石流数値シミュレーションを実施し、家屋の存在が土石



図-2 容易に破壊可能な花崗岩

流の氾濫域に与える影響を検討する。

2. 2014年に広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流の概要

図-1に被災後の広島市安佐南区八木三丁目の様子を示す。図に示すように、本川源頭部など複数の場所で斜面崩壊が発生したものと推察される。対象斜面の下領域には、広島花崗岩と呼ばれる風化しやすい岩と花崗岩が風化した真砂土が分布している⁶⁾。斜面の上の方には、変成作用を受けて堅くなった岩も分布している⁶⁾とされているが、現地を見る限り、斜面の上の方にも多くの真砂土が存在していた。広島花崗岩は風化しやすいため、図-2に示すように道具を用いなくても容易に破壊できる。



図-3 家屋の破壊状況 ((a) と (b) はルーチェサーチによる撮影)

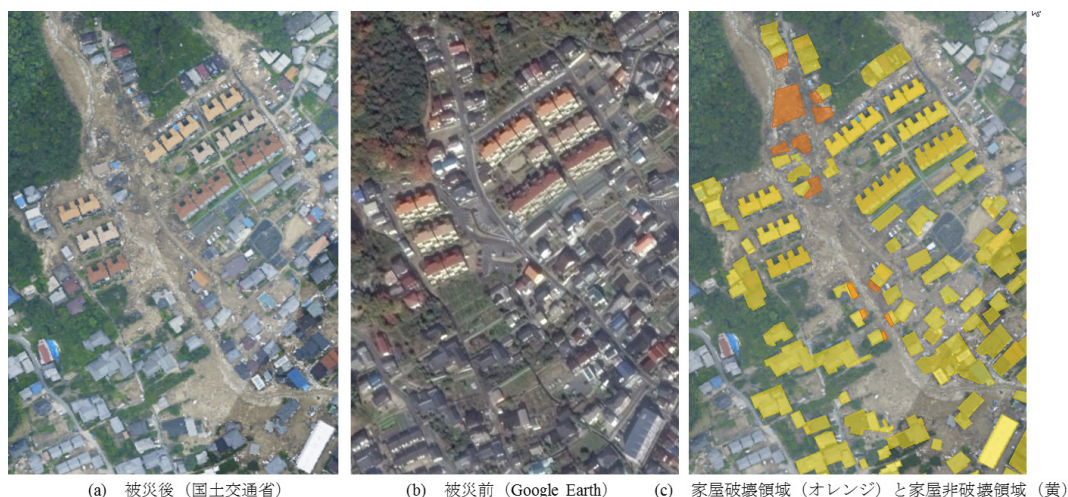


図-4 被災前後の航空写真と家屋破壊領域 (オレンジ) ・家屋非破壊領域 (黄) の平面分布

そのため、土石流の流動によって浸食されやすい。また、節理も多く入っており、地盤は比較的透水性が高い。そのため、不安定土砂に加えて、土石流の通過によって花崗岩や変成岩が破壊されて土石流に取り込まれ、土石流の規模をさらに大きくしたと考えられる。

図-3に8月25日に撮影された被災後の住宅地の様子を示す。溪流の出口付近の宅地には、鉄筋コンクリート構造の県営住宅 (図-3 (c)) と多くの木造家屋が存在していた。鉄筋コンクリート構造の建物は、流速・流動深が大きい状態で土石流が衝突しているが、図-3 (c) に示すように、建物の破壊には至っておらず、外装の一部が損傷しただけとなっている。一方、溪流に沿った領域の多くの木造家屋が全壊・半壊の被害を受けていた。図-4に被災前後の航空写真と家屋破壊領域 (オレンジ) ・家屋非破壊領域 (黄) の平面分布を示す。図に示

すように、溪流の出口から斜面下方に沿って設置されている道路周辺で木造家屋の被害が確認できる。また、家屋は全てが全壊しているわけではなく、家屋の一部のみが破壊されたものも多い。

3. 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⁷⁾を用いた層流域上に乱流域を考慮した平面二次元土石流モデル^{1),8),9)}を用いる。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、土石流の流動方向の平衡河床勾配 θ_0 として、以下の関係が得られる^{1),8),9)}。

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

ここに、 ρ は水の密度、 σ は土砂の密度、 h は流動深、 h_s は層流層厚、 ϕ_s は土砂の内部摩擦角である。 $\bar{c}$ は流動深平均の土砂濃度であり、以下の質量保存則⁷⁾の関係を有する。

$$\frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}hu}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}hv}{\partial y} = E \quad (2)$$

ここに、 t は時間、 u と v は x と y 方向における速度成分、 E は河床の浸食速度である⁷⁾。

本解析モデルは、実現象と同様に斜面崩壊を発端として土石流を発生させているため、仮定した水や土石流の流量を上流端境界条件とする必要が無い。また、全区間を平面二次元モデルで解いているため、全ての解析領域で、土石流の浸食・堆積を評価できる。

なお、本モデルによる土石流の流動特性の再現性については、竹林・江頭・藤田⁹⁾や竹林¹⁾などにより、現地における土石流流動域の平面分布や被災後の浸食・堆積域の概形に対して十分評価できることが確認されている。

(2) 家屋に作用する応力

津波および洪水流によって家屋に作用する力を算定する場合、家屋をコントロールボリュームとして家屋周辺に作用する応力を積分して得られた力が用いられる。これは、洪水流先端部が家屋に到達した直後に家屋が破壊されるのではなく、家屋背面や家屋内に水が到達してから家屋が流出する状況が被災地でよく観察されるためである。しかし、土石流の場合は土石流先端部が家屋に到達した直後に家屋が破壊され、家屋がその形状を保たずに、家屋の一部損壊が発生することが多い。そのため、家屋をコントロールボリュームとして得られた力よりもより小さいコントロールボリュームを用いて得られた力によって家屋の破壊過程を評価する方が適切と考えられる。本解析の解析格子の大きさは2mであり、家屋の大きさよりも小さい。そこで、本研究では家屋形状を複数の解析格子で表現し、各解析格子をコントロールボリュームとして作用する力を計算し、家屋の破壊・非破壊の判定に用いた。

本解析では正方形格子を用いている。そこで、横断方向の流速をゼロ、横断方向圧力は左右で方向は異なるが、同一の値を有しているとし、土石流が流下方向に流れて家屋壁面に垂直に作用している場を考える。木造家屋は可撓性が弱いので、壁はある一定以上の応力が作用すると瞬時に破壊されるとし、家屋破壊時の水深・流速の時間的な変化を無視する。さらに、河床勾配や家屋破壊時のエネルギー散逸はそれほど大きくないため無視するとともに、家屋内にはまだ土石流が流れ込んでいないこと

を考えると、家屋の解析格子に働く単位幅あたりの流下方向の応力 F_{hx} は以下の様に土石流による圧力と家屋に作用する流体力の和で評価できる。

$$F_{hx} = \frac{1}{2} \rho_m g h^2 \cos \theta + \rho_m h u^2 \quad (3)$$

ここに、 g は重力、 ρ_m は以下の関係がある。

$$\rho_m = (\sigma - \rho)\bar{c} + \rho \quad (4)$$

上記応力 F_{hx} は、家屋に設定した解析格子の境界に作用し、家屋の解析格子間における応力のやり取りは考慮しないものとして取り扱う。

単位幅当たりの家屋破壊限界応力については、家屋の構造によって異なると考えられる。本解析では被災後の広島市安佐南区八木三丁目の家屋の全壊・半壊状況の再現から最適な値を設定するものとした。

(3) 解析条件

計算領域は、図-1の航空写真内の黒枠で示された本川源頭部からJR加治線までの2km×0.7kmの領域である。土石流は斜面崩壊を発端として発生するものとし、条件として崩壊土量を与えた。また、崩壊土は飽和状態であるとした。斜面崩壊の発生場所は、現地で斜面崩壊が確認されている本川源頭部とした。崩壊の大きさは、現地調査の結果を参考にして数種類を検討したが、宅地に流入する土石流の特性にはほとんど影響を与えなかった。これは、斜面崩壊による流出土砂量よりも流下しながら河床や河岸から土石流に取り込まれる土砂量の方がかなり多いためである。解析条件は、Case1：家屋の破壊を考慮した解析、Case2：家屋を不透過な非破壊構造物として扱った解析、Case3：家屋の存在を無視し、地盤高を地形条件とした解析の3種類を実施した。家屋の破壊は木造家屋のみで発生するとし、鉄筋コンクリート構造の県営住宅は破壊しないものとした。家屋が破壊されたと判断された解析格子は、次の計算ステップでは家屋無しの解析格子として扱う。家屋は複数の解析格子で表現されており、破壊限界を超えた部分のみが破壊と判断されるため、半壊・一部破壊家屋などが評価可能である。

4. 結果と考察

図-5にCase1で得られた土石流流下後の住宅地での地盤高さの変化量の平面分布を被災後の写真と重ね合わせたものを示す。図中に青色で示されている地点は家屋が破壊されたと判断された地点である。一方、家屋が存在するにも係わらずコンターが示されていない領域は、家屋が破壊されなかった地点である。図に示すように、溪流出口の直下流に位置する家屋領域Aでは、全て青色となっており、この領域の全ての家屋が全壊したという解

析結果となっている。実際、現地においてもこの領域の家屋は全て全壊となっている。さらに下流の家屋領域Bは、一部の家屋が全壊し、半壊家屋も存在している。図-3に示した被災後の写真を見ると、この領域は全壊家屋と半壊家屋が存在しており、半壊家屋は計算と同様に、家屋領域の東側（土石流の主流に近い側）で破壊が発生していることがわかる。さらに下流の家屋領域Cを見ると、全壊と判定された家屋は無いが、一部損壊している家屋が見られる。この領域についても図-3に示した被災後の写真から、一部損壊している家屋が見られ、計算結果と一致していることがわかる。なお、家屋破壊限界応力は 800kN/m を全ての木造家屋に適用した。これは、溪流出口付近の地盤勾配が約 10 度であることを考慮すると、例えば、土石流の流速が約 10m/s 、流動深が約 3.5m で家屋が破壊される。このように、本解析モデルによって土石流で全壊・半壊する可能性のある家屋を評価することがある程度可能であると考えられる。

図-6にCase1と家屋の破壊を考慮していないCase2の住宅地での土石流の深さの時空間的な変化を示す。Case2のように、家屋の破壊を無視すると、家屋の上流域の多くに顕著な土砂の堆積域が形成されるため、氾濫範囲が狭くなることがわかる。また、家屋領域Aが破壊されなかったため、土石流の主流が西側の家屋の少ない領域に移動しており、実現象と大きく異なる結果となった。

図-7に家屋の存在を無視したCase3の住宅地での土石流の深さの時空間的な変化を示す。家屋を考慮しないことにより、土石流は扇形に広く薄く流れ、土石流扇状地を形成していることがわかる。また、Case1と比較すると土石流の氾濫域が大きく異なっており、宅地においては、家屋の存在を考慮した解析の必要性が高いことがわかる。Case1とCase3の図中に表示されている黄色い点の場所に着目すると、Case1では土石流は流れてきていないが、Case3では土石流が流れてきていることがわかる。土砂災害警戒区域の設定に用いられる土石流の氾濫

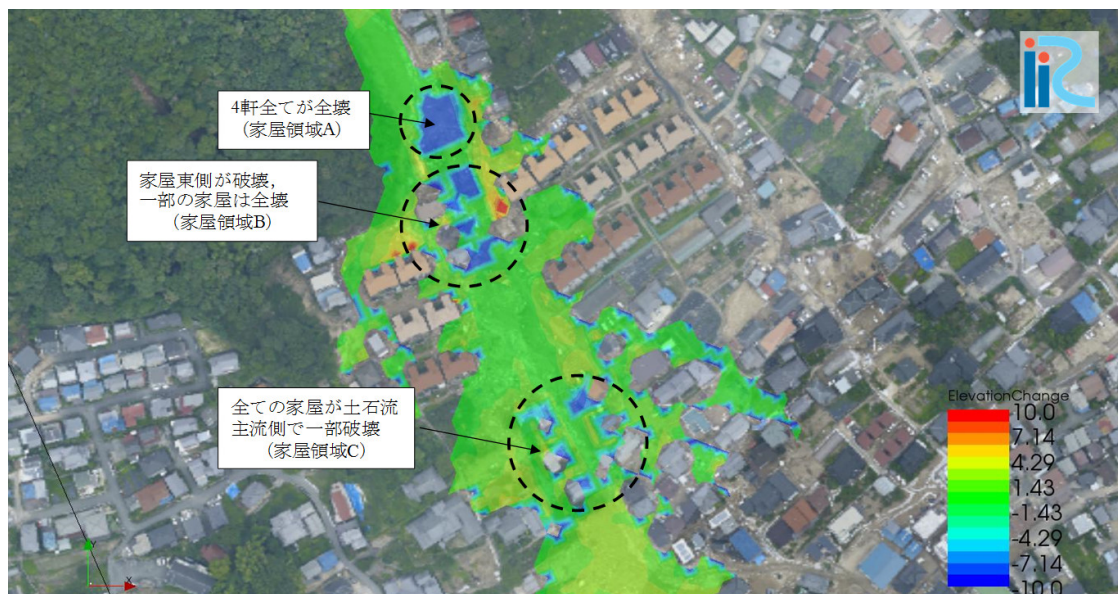


図-5 家屋の破壊状況 (Case1)

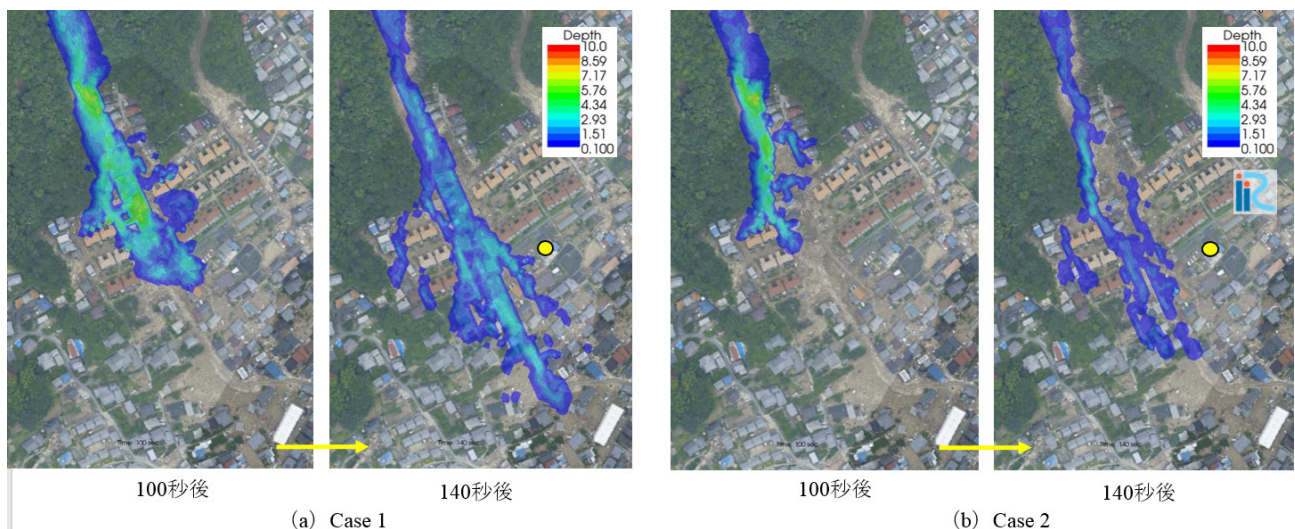


図-6 家屋の破壊が土石流の流動深に与える影響 (経過時間は崩壊開始からの時間)

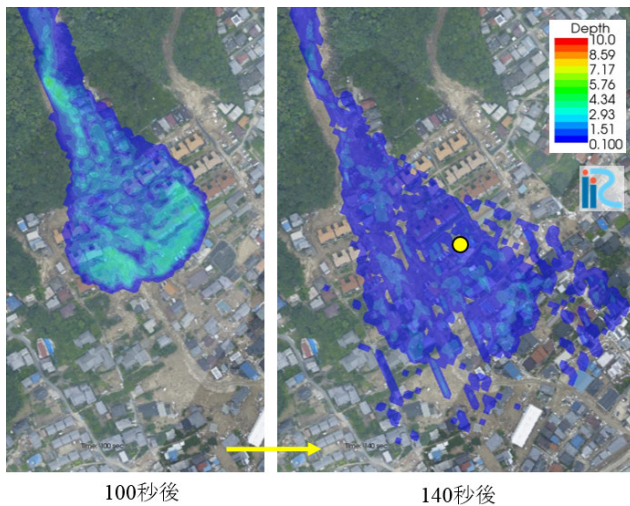


図-7 家屋非考慮の場合の土石流の流動深 (Case3)

域は、Case3 の氾濫域と比較的近い。つまり、土砂災害警戒区域として指定されている領域においても家屋の存在によって土石流が流れてこない場所が広く存在することになる。これらの情報は、避難をする上で非常に重要な情報である。つまり、一般に、土石流発生時は非常に強い雨が降っているため、遠方への避難は困難である。そのため、土砂災害警戒区域内の安全な場所について家屋を考慮した数値シミュレーションによって把握し、遠方への避難が困難な場合に少しでも生存率を高めるための近くの避難候補地を決定する際、非常に有効である。

5. 結論

宅地内の家屋の一部が全壊・半壊した2014年の広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流を対象とし、家屋の破壊過程を考慮した平面二次元の土石流数値シミュレーションを実施し、家屋の存在が土石流の氾濫域に与える影響を検討した。その結果、本数値シミュレーションモデルによって、家屋の半壊・全壊の状態を比較的良く再現でき、土石流で全壊・半壊する可能性のある家屋を評価することがある程度可能と考えられる。また、家屋

の破壊を無視すると、家屋の上流域の多くに顕著な土砂の堆積域が形成されるため、土石流の流下方向の氾濫範囲が狭くなることが明らかとなった。さらに、家屋を考慮しない数値シミュレーションでは、土石流は扇形に広く薄く流れて土石流扇状地を形成した。その結果、家屋を考慮した場合とは氾濫域が大きく異なった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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，Vol.69，No.5，pp.3-10，2017.
- 3) 佐藤智，今村文彦，首藤伸夫：洪水氾濫の数値計算および家屋被害について—8610号台風による吉田川の場合—，第33回水理講演会論文集，pp.331-336，1989.
- 4) 高橋保，中川一，加納茂紀：洪水氾濫による家屋流失の危険度評価，京都大学防災研究所年報，No.28，B-2，pp.455-470，1985.
- 5) 国土交通省：洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）＜参考資料1＞，pp.viii-xiii，2015.
- 6) 独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター：20万分の1日本シームレス地質図.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.

(2017.9.29受付)

NUMERICAL SIMULATION OF DEBRIS FLOW CONSIDERING DESTRUCTION OF HOUSES

Hidetoshi NAKAMOTO, Hiroshi TAKEBAYASHI, Hideki MIYATA and Masaharu Fujita

A lot of houses were destructed by the debris flow in Yagi 3 Chome, Asaminamiku, Hiroshima in 2014. In this study, two dimensional debris flow numerical simulation considering destruction process of houses is performed and effect of houses on the inundation area of debris flow is discussed. The developed numerical analysis model can reproduce the conditions of complete/partial destruction of houses. If the houses in the inundation area are neglected, debris flow spreads widely and forms debris flow alluvial fan. As a result, the difference of inundation area between with house case and without house cases becomes large. This information must be important for evacuation act, when it is difficult to evacuate to far refuge under heavy rain conditions.