

兵庫県豊岡市出石地区における流木を伴う洪水氾濫検討

Flood Runoff Analysis with Consideration of Drift Woods at Izushi-cho, Toyooka City

井上雄登¹・山田脩策²・藤本将光³・里深好文⁴

Yuto Inoue, Shusaku Yamada, Masamitsu Fujimoto and Yoshifumi Satofuka

¹立命館大学大学院 理工学研究科環境都市専攻 博士課程前期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

² (株)熊谷組 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2番1号)

Kumagai Gumi Co.,Ltd.

³立命館大学准教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Ritsumeikan University

⁴立命館大学教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Ritsumeikan University

Recently, flood and sediment disasters due to heavy rain have been increasing. Land use in boundary areas between mountains and plains is a factor of the risk of damage increase. Izushi area, Toyooka City is one such place, but it is also designated as a Important Preservation District for Groups of Traditional Buildings, and the conservation of the district is crucial. Therefore, we verified the effectiveness of an existing flood bypass, and further examined the case where the driftwoods stopping facility installed at the entrance of the bypass was clogged in the event of a flood disaster beyond expectations.

Keywords: drift woods, flood bypass, flood simulation, Important Preservation District for Groups of Traditional Buildings

1. はじめに

近年、我が国では想定を超える大雨が多く発生しており、それに伴う水・土砂災害が増加している。2019年台風19号では、1都12県に大雨特別警報が発令され、大規模な河川氾濫や土砂災害に見舞われた。被害状況は少なくとも死者66名、行方不明者13名、重軽傷者398名と報告されている。特に中山間地域では、河川近傍などの災害危険度の高いエリアに住居区域が拡大しているため、このような災害に対して、脆弱な土地利用となっている。また、この災害で流木が橋脚に詰まり、土砂が氾濫したケースが見られた¹⁾。このような流木災害は近年多数報告されている。本研究で対象としている兵庫県豊岡市出石町は、かつて出石城下三千軒と呼ばれるほど活気ある城下町が形成され、現在「伝統的建造物群保存地区」に選定されている。そのこともあり、この地域はハード面の対策として砂防堰堤や流木止め、水門、放水路などが設置されている。近年では流木を伴う土石流・河川氾濫の研究が進められている²⁾³⁾⁴⁾。対象地では放水路に流木が流入することを防ぐため、放水路手前に流木止めを設置している。しかし、我々が現地調査を行った際に、流木止めが閉塞した場合、大きな被害が生まれる可能性があると考えた。これまで、本研究対象地では洪水氾濫解析が実施されてきたが、流木を考慮した土石流・河川氾濫に関する数値シミュレーションおよび既存の流木対策の効果検討が行われていない⁵⁾⁶⁾。また、歴史都市で見られる細い街路を持つ地域においては詳細な地形データ(1mメッシュDEM)を用いた洪水氾濫の検証が必要となるが、1mメッシュのDEMデータを中山間地域の市街地に適応した事例はない。そこで、本研究では詳細な地形データを用いて既存の放水路の効果検討に加え、想定を超える災害に対して、放水路入り口に設置されている流木止めが閉塞した場合の洪水氾濫状況を解析することを目的とする。

2. 研究対象地

(1) 対象地位置

本研究では、兵庫県の北部に位置する豊岡市出石町を対象地とする。図1に赤線で示す出石川と青線で示す谷山川を対象河川とする。出石川は1級河川円山川水系の1次支川であり、流域面積が約225.0km²の1級河川である。河床勾配は、上流部では1/50～1/100程度で急勾配であるが、中流部では1/300～1/500と緩やかである。そのため、豪雨時中流部では増水しやすい構造である。出石川は、豊岡市但東町の南東端にその源を発し、豊岡市出石町の中心市街地部を通り、豊岡市の市街地部で円山川に合流する。谷山川は1級河川円山川水系の2次支川であり、流域面積が約6.33km²の1級河川である。谷山川は、出石町の市街地内を流れ出石川に合流しており、市街地付近は河床勾配が緩やかである。

(2) 対象地における既存の対策

対象地において2020年11月9日、10日に土砂災害の対策状況を現地調査した。

谷山川の上流部には、4つの砂防施設が見られた。現地調査を行った4つの砂防施設すべての堆砂池が、土砂で埋まっており、大量の土砂がそのまま下流へ流される危険性があることが確認できた。

また、対象地域には、図1のように谷山川の水を出石川に排水することで、度重なる水害被害を解消するため、谷山川トンネル放水路が設置されている。谷山川が増水した際、トンネル放水路の入口付近にある小さな水門で図3に示すように流下する流量の調節を行い、谷山川下流で氾濫被害が起きることを防いでいる。表1に谷山川放水路の諸元を示す。このトンネル放水路は、表1のように100m³/sの水を流せるように設計されている。また、谷山川トンネル放水路入り口には土砂や流木が詰まった場合、街に氾濫してしまう危険性が高いため、流木止めが設置されている(図2)。しかし、流木止めに流木が溜まることで疎通障害を原因とした氾濫が起きる危険性があり、検討する必要がある。

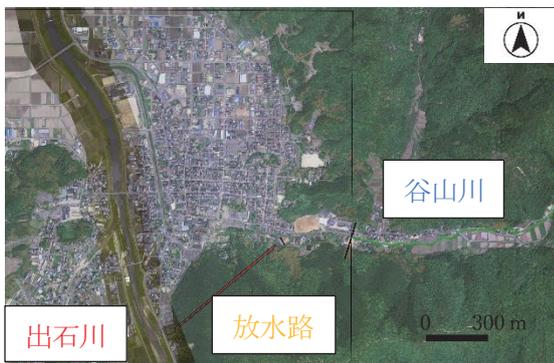


図1 出石町と対象河川



図2 放水路入り口部の流木止め



図3 流木止めの設定箇所

表1 谷山川放水路の諸元

トンネル延長	645.4m	計画流量	130m ³ /s
実測直径	約8.0m	流域面積	5.29km ²
縦断勾配	1/500	計画確率年	100年
計画高水	100m ³ /s	全体施工延長	906.8m

3. 数値解析

本研究は土石流数値シミュレーションシステム「HyperKANAKO」を用いておこなった。「HyperKANAKO」とは、DEM (Digital Elevation Model) 等の詳細な地形データを利用することで従来よりも正確なシミュレーションを行うことができ、GIS とシミュレーション計算プログラムを連携させることによって計算結果等に地理的な情報を付加させ、より利用しやすい情報提供が可能な仕組みを持っている。本研究では、地形データは兵庫県に提供していただいた1mメッシュの数値標高モデル (DEM) を用いた。

(1) 流量の算出

本研究で使用する確率雨量を、豊岡市の1926～2019年雨量データを基に、岩井法⁷⁾を用いて求めた(表2)。岩井法は雨量の確率計算に用いられる手法の1つであり、日本では標準法とされているため採用した。次に、岩井法で求めた各確率年の時間雨量と短時間特性係数から降雨強度式を求める。短時間確率降雨強度式算定の一般式形はクリーブランド型であり、兵庫県豊岡市でもこの式が採用されているため、本研究でもクリーブランド型を採用した。降雨強度式に洪水到達時間 t を代入し、平均降雨強度を計算した。洪水到達時間 t は以下の式1-4から計算し、計算結果は68分であった。最後に合理式5と6を用いてピーク流量を算出した。豊岡市の1926～2019年の10分間雨量と時間雨量、そして時間雨量を用いて計算した流量の結果を表3に示す。

洪水到達時間は以下の式から算出される。

$$t = t_1 + t_2 \quad (1)$$

ここで、 t_1 : 流入時間(分)、 t_2 : 流出時間(分)

$$t_1 = \sqrt{\frac{A}{A_0}} t' \quad (2)$$

ここで、 A : 対象流域面積(km²)、 A_0 : 流域面積の基準値、 t' : 標準流入時間(=30分)

$$I = \frac{H_1 - H_2}{L} \quad (3)$$

ここで、 I : 河床勾配、 H_1 : 最上流地点の標高、 H_2 : 流域出口の標高、 L : 河道長(m)

$$\text{クラークの式} \quad t_2 = \frac{L}{W} \quad (4)$$

ここで、 L : 河道長(m)、 W : 洪水の流下速度(m/s)

洪水ピーク流量の合理式は次式で表示する。

$$Q_p = \frac{1}{3.6} \times f \times r \times A \quad (5)$$

ここで、 Q_p : 洪水ピーク流量(m³/s)、 f : 流出係数、 r : 洪水到達時間内における平均降雨強度(mm/h)、 A : 流域面積(km²)

土石流ピーク流量の合理式は次式で表示する。

$$Q_{sp} = \frac{C_*}{C_* - C_d} \times Q_p \quad (6)$$

ここで、 Q_{sp} : 土石流ピーク流量(m³/s)、 Q_p : 洪水ピーク流量(m³/s)、 C_* : 堆積土砂の容積濃度(0.65)、 C_d : 土石流濃度(0.3)

式6にある土石流濃度 C_d は、式7で求められる。対象河川の谷山川の平均河床勾配が約2.51°と小さく、土石流濃度 C_d の値が0.3を下回ったため、本研究では0.3を使用する。

$$C_d = \frac{\rho \times \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \varphi - \tan \theta)} \quad (7)$$

ここで、 C_d : 土石流濃度、 σ : 砂礫の密度(kg/m³)、 θ : 河床勾配(°)、 ρ : 流体相密度(kg/m³)、 φ : 砂の内部摩擦

角(kg/m³)、C* : 河床の容積濃度(0.65)

表2 豊岡市の各確率年の10分間雨量と時間雨量

確率年	10分間雨量(mm)	時間雨量(mm)
1000	29.7	72.5
500	28.3	68.7
200	26.4	63.6
100	25.0	59.6
50	23.4	55.6
30	22.3	52.5
20	21.3	49.9
10	19.5	45.3

表3 本研究で使用する流量

確率年 \ ピーク流量	洪水時 (m ³ /s)	土石流時 (m ³ /s)
50年確率	68.1	126.5
200年確率	78.0	144.9
1000年確率	89.1	165.4

(2) 計算条件

表4に示すように対策条件と降雨条件を組み合わせた9つのケースにおいてシミュレーション計算を行う。確率雨量は谷山川放水路の諸元(表1)を基に計画流量より小さい50年確率、計画流量より大きい200年確率、そして、想定外雨量を検討するための1000年確率を今回選択した。今回は氾濫に関する検討のため、表3で示したように50年確率、200年確率、1000年確率でそれぞれ3ケースの解析を行う。ただし、流木止めが閉塞していない場合は各確率年の土石流・洪水の両ピーク流量を検証するが、流木が詰まることを想定したcase3、case6、case9は、土石流ピーク流量⁸⁾のみを検証する。シミュレーション計算時間については、すべてのケースで降雨継続時間は1800secとするが、全体時間は流木止めが閉塞しない場合は2100sec、閉塞した場合は2700secとする。基本的に計算時間は2700secとしたが、閉塞しないケースでは2100sec以降は氾濫した水が抜けるため、最大氾濫域の比較が困難となるため、今回閉塞しないケースは2100secとする。土砂濃度は、0.30とする。図4にハイドログラフの一例を示す。

表4 地形条件と降雨条件

case	流木止めの閉塞	降雨条件	土石流ピーク流量(m ³ /s)	洪水ピーク流量(m ³ /s)	計算時間(s)
case1	×	50年	126.5		2100
case2	×	50年		68.1	2100
case3	○	50年	126.5		2700
case4	×	200年	144.9		2100
case5	×	200年		78.0	2100
case6	○	200年	144.9		2700
case7	×	1000年	165.4		2100
case8	×	1000年		89.1	2100
case9	○	1000年	165.4		2700

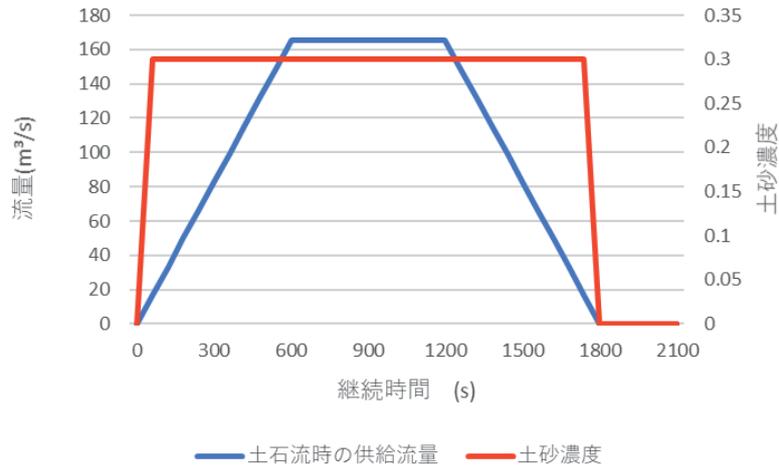


図4 使用するハイドログラフの一例（1000年確率土石流ピーク流量の場合）

4. 解析結果と考察

9つのケースの解析結果を図5～図13に示す。今回示すここでは、氾濫現象が比較しやすく、流量をすべて与え終わる1800secの結果を示した。

(1) 流木止めの有無に関する検討（50年確率雨量のcase1とcase3の比較）

50年確率雨量の土石流ピーク流量を与えた場合の流木止めの有無による氾濫規模について考察を行う。50年確率の土石流ピーク流量は、谷山川トンネル放水路の計画流量130 m³/s（表5）の範囲内の流量である。そのため、流木が詰まっていない場合（case1）は図5のようにほとんど氾濫することなく、出石川へ放水できていることがわかる。一方、流木が詰まった場合（case3）、放水路で放水できなくなった水が図6のように街に氾濫していることがわかる。また、放水路付近で氾濫だけでなく、一部の水が谷山川を流れ、カーブの箇所で氾濫していることも確認できた。このように放水路によって出石川へ放水できる流量であったとしても、流木を伴う災害が発生し、流木止めが詰まった場合、街に氾濫し、被害が発生する危険性があると考えられた。

表5 谷山川放水路の諸元

トンネル延長	645.4m	計画流量	130m³/s
実測直径	約8.0m	流域面積	5.29km²
縦断勾配	1/500	計画確率年	100年
計画高水	100m³/s	全体施工延長	906.8m



図5 case1における1800秒の流動水深の結果



図6 case3における1800秒の流動水深の結果

(2) 流木止めが閉塞した場合の確率雨量の違いに関する検討 (case 3 と case 6 と case 9 の比較)

流木止めが詰まった場合、3つのケースでは同じ個所で氾濫が生じていることが示された。ピーク流量が異なるため、氾濫規模は1000年確率のcase 9が一番大きくなっているが、図16に示すように氾濫した水は街の道に沿って赤矢印の方向へ広がることが確認できた。流木止めが詰まることで、放水路の機能は低下することに起因していると考えられる。結果から、流木が放水路に侵入し、放水路の機能が低下しないために設置している流木止めが大量の流木が流れてきた場合、機能しない可能性があると考えられる。よって、今後は流木止めの設置場所についての検討が必要である。



図7 case 6における1800秒の流動水深の結果



図8 case 9における1800秒の流動水深の結果

(3) 流木止めが閉塞しなかった場合の確率雨量の違いに関する検討 (case 1 と case 4 と case 7 の比較)

200年確率と1000年確率の土石流ピーク流量では、20 m³/s程の違いがある。どちらの流量もトンネル放水路の計画流量より大きく、50年確率だけは計画流量を超えていない。1000年確率の市街地に氾濫した水の水位は、200年確率とそれほど変わらず、水の到達範囲のみが大きくなった(図9、図10)。1000年確率と200年確率で流量が大きく異なるわけではないことが要因の1つである。そのほかに考え得る理由は、次の2つがある。

- ・出石町の市街地は山沿いにあるため、出石高校から市街地にかけて、谷山川側から市街地内にかけて緩やかな勾配になっている。
- ・市街地の道に沿って通る排水道の場所の痕跡水位が大きくなっていることから、排水道により市街地の道路上の水が排水されている(図14、図15)。

以上の理由から、市街地で氾濫した水の水位が大きくなる前に、広範囲に氾濫した水が広がっていくと考えられる。



図9 case 4における1800秒の流動水深の結果



図10 case 7における1800秒の流動水深の結果

(4) 洪水ピーク流量に関する検討 (case 2 と case 5 と case 8 の比較)

洪水ピーク流量はすべての確率雨量で計画流量を超えていない。しかし、case 5 と case 8 では氾濫していることが分かる (図 12、図 13)。これは水だけが流下してきた場合、放水路の入り口が狭いため、流下してきた水の一部が放水路に流れ込まず、湛水することで街に氾濫してしまったと考えられる。

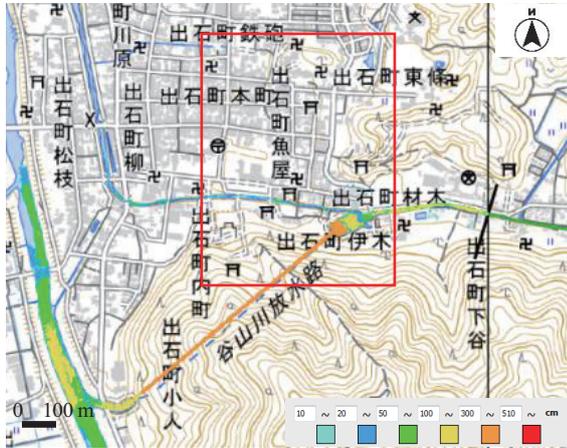


図 11 case 2 における 1800 秒の流動水深の結果



図 12 case 5 における 1800 秒の流動水深の結果

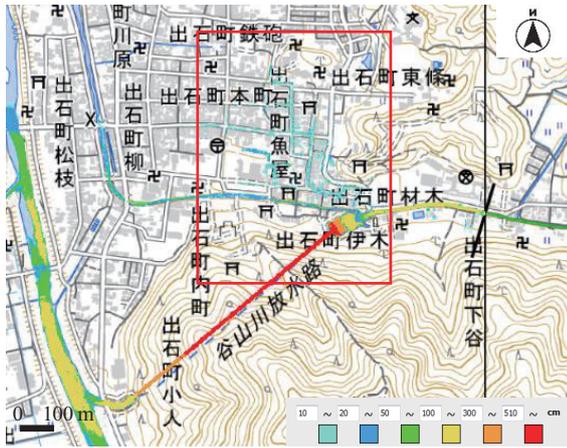


図 13 case 8 における 1800 秒の流動水深の結果

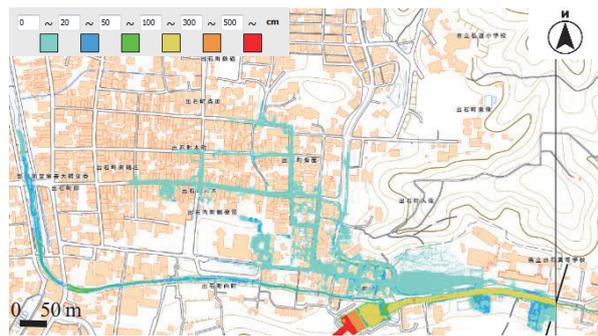


図 14 case 4 における市街地の痕跡水位の結果

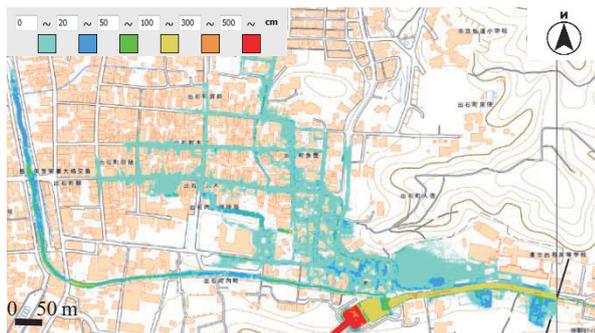


図 15 case 7 における市街地の痕跡水位の結果

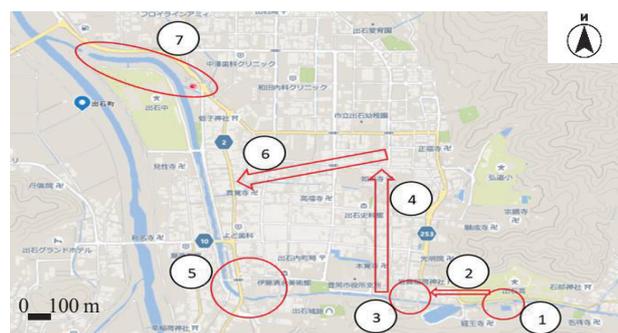


図 16 氾濫危険箇所と洪水の広がり方

5. まとめ

豊岡市の想定各確率年雨量を使い、出石町に設置されている谷山川トンネル放水路および放水路入り口付近に設置された流木止めについての効果検討を数値シミュレーションによって実施した。本研究では流木を伴う土石流または洪水氾濫が発生した場合、放水路で放水可能な流量であった場合でも、放水路入り口の流木止めに流木が詰まり、氾濫する可能性があることが確認できた。谷山川上流は倒木や今後の大雨で流木になる可能性がある樹木があ

り、流木が放水路まで流れてくることは十分考えられる。よって、現在の流木止めの位置では対策として十分ではないと考える。流木が現在の流木止めまで流出することが課題であるため、今後、施設配置について検討する必要があると考えられる。また、現地調査の結果から、谷山川上流域において施設を配置することが有効な対策になると考えられた。調査結果から得られた選定箇所において条件の異なる砂防堰堤や流木止めを設定した場合を想定し、シミュレーションを実施する予定である。

謝辞：本研究は、立命館大学歴史都市防災研究所の受託研究「豊岡市出石伝統的建造物群保存地区 防災計画策定調査分析事業」の一環として実施されたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 南雲直子・原田大輔・江頭進治：丸森町の土砂・洪水氾濫に関する現地調査と地形解析，日本地理学会発表要旨集，2020年度日本地理学会春季学術大会，2020.
- 2) 守屋博貴・二瓶泰雄・長谷部由莉・峯浩二・鮎本健治・矢野真一郎・渡辺豊・福田信行：平成29年九州北部豪雨による福岡県北川の流木災害の検討，土木学会論文集B1（水工学），Vol74，No.4，I_1195-I_1200，2018.
- 3) 末次忠司：平成29年7月九州北部豪雨と流木災害水害被害を助長する土砂・流木の影響，水利科学，62巻6号，pp.56-69，2019.
- 4) 大中臨・赤松良久・河野誉仁・山口皓平：平成30年7月豪雨における島田川水系東川の土石流・河川氾濫の複合災害の実態解明，土木学会論文集B1（水工学），Vol75，No.1，pp.260-269，2019.
- 5) 大藪政志・椿涼太・藤田一郎・川谷健：2004年10月出石川氾濫を対象とした現地調査に基づく高解像度氾濫解析，水工学論文集，第50巻，pp.685-690，2006.
- 6) 石森久仁子・土屋十圓：出石川流域における洪水流出予測と2004年台風23号出水時の氾濫解析，水工学論文集，第52巻，pp.817-822，2008.
- 7) 大塚祐治：確率計算の方法（岩井法），pp.1-26，株式会社沖橋エンジニアリング
- 8) 池田暁彦・水山高久・桜井亘・内田太郎・水野秀明：土石流ピーク流量の特性に関する考察，平成29年度砂防学会研究発表会概要集B，pp.112-113，2017.