

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05029

研究課題名（和文）山間地の谷間にある住宅地での土砂災害に対する最適な避難経路の設定の開発

研究課題名（英文）Development of a system for selecting safe routes of evacuation from landslides and floods in villages in valleys

研究代表者

水野 秀明（MIZUNO, HIDEAKI）

九州大学・農学研究院・准教授

研究者番号：80356104

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、流砂による暗渠の閉塞メカニズムを水路実験と数値計算に基づいて明らかにした。水路実験の結果より、暗渠が屈曲したり湾曲したりする場合、流砂が暗渠内で減速し、停止し、暗渠を閉塞することが分かった。3次元数値計算を行なって、暗渠内の流れを解析したところ、屈曲したり湾曲したりするなど、暗渠の形状が変化する地点の上流側において、流れの速度が急激に減少するとともに、流れの圧力が急激に上昇することが分かった。これにより流砂は進行方向とは逆向きに抗力と圧力を受け、減速し、停止すると推定できた。従って、暗渠のある住宅地内で安全な避難経路は、洪水時に暗渠が満管となる可能性の高い区間を外した方が良い。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土石流や洪水等の水と土砂の流れを予測する数値計算手法はハザードマップを作成する基本技術で、溪流や河川などの開水路を対象として開発されてきた。この場合、流れの表面に作用する圧力は大気圧と等しく、一般的にゼロとして取り扱う。しかしながら、近年、道路が都市部だけでなく、山間部にも整備され、溪流を暗渠等で跨ぐようになった。そのような道路も含めて安全な避難路を選ぶためには、数値計算手法は開水路だけでなく暗渠も適用できなければならない。つまり、流れの表面に作用する圧力がゼロより大きい場合にも計算できるようにする必要が生じた。本研究はそのような状況も対応できる計算手法を提案し、その再現性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, we clarified the mechanism of blockage of culverts by sediment flow such as bed loads based on flume experiments and numerical simulations. The results of the flume experiment showed that when the culvert bends or curves, sediment flow slows down in the culvert, stops, and blocks the culvert. Three-dimensional numerical simulations were performed to analyze the flow in the culvert, and it was found that the velocity of the flow decreases sharply, and the pressure of the flow rises sharply on the upstream side of the point where the shape of the culvert changes, such as bending and curving. As a result, it was estimated that the sands were subjected to drag and pressure in the opposite direction of travel, slowed down, and stopped. Therefore, as a safe evacuation route in a residential area with a culvert, it is better to remove the section where the culvert is likely to fill up during a flood.

研究分野：砂防工学

キーワード：流砂 暗渠 数値計算 2次元浅水流方程式 有限体積法 水路実験

1. 研究開始当初の背景

山間地の谷間で発達した住宅地では、小さな溪流を道路下の暗渠内に流し込むことで、その上を道路の空間として活用することが多い。しかし、そのような地域で豪雨が生じると、流砂が暗渠内へと流れ込んで堆積し、暗渠を閉塞してしまうこともある(写真-1, 2)。そのような状況が発生すると、地域の住民は安全に避難できなかつたり、土石流や崩壊、洪水に巻き込まれたりする可能性が高まる。そのような事態を回避するためには、豪雨中に閉塞する可能性のある暗渠を予め抽出し、避難経路から外すことや、閉塞の生じない暗渠に改良するなどといった対策が必要となる。

上記のような暗渠は短距離を直線状に配置されていることもあるが、多くの場合で湾曲や屈曲したり、他の暗渠と合流したりするなど、複雑な線形となる。そのため、豪雨時の暗渠の中では、流水が跳水やせき上げ背水、攪乱波等の水理学的な現象を引き起こし、流れの水深や速度が急激に変化すると推測される。そのような変化が生じると、流砂に作用する力が急激に変化するため、土砂が急激に停止することも考えられる。しかしながら、現在のところ、暗渠内での流砂の停止メカニズムは明らかにされておらず、閉塞の生じる暗渠を抽出する手法は確立できていない。

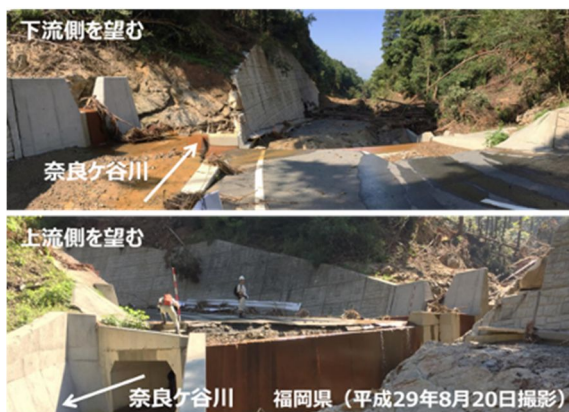


写真-1 暗渠の閉塞により損傷した道路の事例



写真-2 林道の暗渠の閉塞事例

(写真の出典) 江藤 稚佳子, 原 教介, 水野 秀明 (2021): 暗渠内における流れと流砂の停止過程, 砂防学会誌, Vol.73, No.5, p.38-43

2. 研究の目的

本研究の目的は、流砂による暗渠の閉塞過程を水路実験により明らかにする。次いで、その閉塞過程を再現するための数理モデルと計算プログラムを開発し、水路実験と計算結果を比較し、現象の再現性を明らかにする。次いで、豪雨時に暗渠の閉塞が起こる形状的な条件を明らかにし、閉塞の生じる暗渠を抽出する手法を開発するとともに、その結果に基づいて避難に適さない道路区間の抽出方法を提案することとする。

3. 研究の方法

(1)暗渠内における流砂の挙動と暗渠の閉塞過程の解明

計測は九州大学森林保全実験棟内に設置してある実験水路を用いる。実験水路内に設置する暗渠の模型を強化ガラスにより製作する。実験水路内に暗渠の模型を設置し、その模型の下流側に暗渠内の水深を調節するための堰を設置する。実験水路の上流側より水を給水し、暗渠の模型内で開水路の流れと管路の流れを再現した後、流砂に見立てたガラスビーズを実験水路の上流側より供給する。ガラスビーズは時間をおいて1個ずつ実験水路に供給する。それらのガラスビーズをビデオカメラで撮影し、その挙動を追跡する。

さらに、同じ実験水路と暗渠の模型を用いて、ガラスビーズを所定の割合で実験水路の上流側より供給して、暗渠の閉塞過程を再現する。その際、ビデオカメラでガラスビーズの動きを撮影し、暗渠の閉塞過程を明らかにする。

(2)暗渠内の水の動きを再現する数理モデルと計算プログラムの開発と再現性の検証

暗渠の形状およびその上下流の地形が流れに及ぼす影響の解明と閉塞の生じる暗渠を抽出する手法の基本的な技術となる。暗渠内の水の動きを再現する数理モデルを開発するとともに、その数理モデルを有限体積法で離散化した計算プログラムを開発する。

まず、上記(1)で実施した水路実験の結果より、暗渠内と暗渠の上流側と下流側における流れの深さを計測する。計測結果を3次元数値計算により再現し、圧力と流速ベクトルの空間分布を推定する。

次いで、質量保存則と運動量保存則を鉛直方向に積分して2次元浅水流方程式を誘導するとともに、有限体積法により離散化して計算プログラムを開発する。計算プログラムによる計算結果と水路実験の結果を比較し、その再現性を検証する。なお、2次元浅水流方程式は、土砂災害

や洪水のハザードマップに多く用いられている。

(3) 流砂が暗渠を閉塞する可能性のある条件の解明

山間地の谷間の住宅地における土砂災害時の安全な避難経路の設定に向けて、流砂の堆積により閉塞する可能性の高い暗渠の条件を整理する。上記(2)の研究成果に基づいて、流砂が暗渠を閉塞する条件を、暗渠の形状や暗渠の上下流の地形に着目して明らかにする。その成果に基づいて、避難に適さない道路区間を抽出する手法を提案する。

4. 研究成果

(1) 暗渠内における流砂の挙動と暗渠の閉塞過程の解明

図-1 は実験に用いた水路の概要である。水路は幅 3cm、高さ 3cm で、長さ 1.0m のアクリル製である。投入口から 0.5m の区間は開水路で、それより下流側は管水路とした。実験に際しては所定の水とビーズを水路に取り付けた投入口より供給した。

図-2 は管水路の入り口(図中の inlet)より下流側における水面と堆砂面の時間変化を示したものである。時間が経つにつれて、堆砂面が高くなり、水面が冠水路の天井に到達した(満管)ことがわかる。このことから、流砂が管水路内で急激に停止し、堆積し始めたことで、暗渠を閉塞したことが明らかとなった。

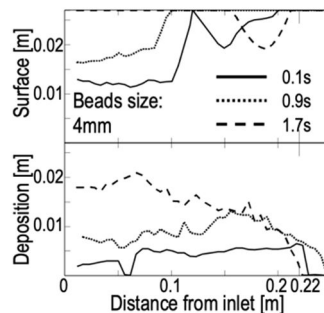
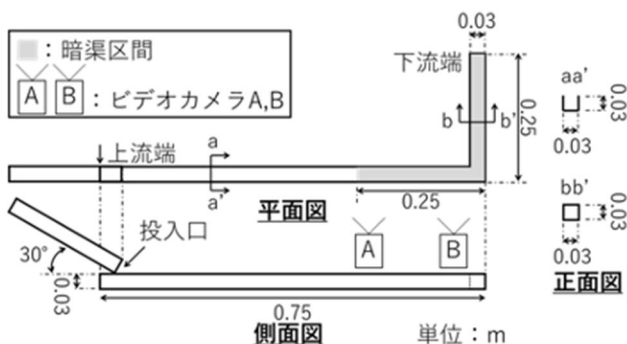


図-1 実験に用いた水路の概要

図-2 水面と堆砂面の時間変化

(図の出典)江藤 稚佳子, 原 教介, 水野 秀明(2021):暗渠内における流れと流砂の停止過程, 砂防学会誌, Vol.73, No.5, p.38-43

(2) 暗渠内の水の動きを再現する数値モデルと計算プログラムの開発と再現性の検証

図-3 は質量保存則と運動量保存則を 3次元で有限体積法により離散化し、実験で得られた水面の位置を再現した結果である。計算に際しては、水と空気の二層流として計算した。図中の は単位体積当たりの水の占める割合を意味する値である。その値が 1 の場合、水が空間全てを満たす状態、0 の場合、空気が空間全てを満たす状態を意味する。図中の赤線はビデオ映像より読み取った水面である。この値と実験での水面の位置を比較すると、概ね計算結果は実験結果を再現できたと言える。

図-4 は流速ベクトルの向き、速度ベクトルの長さ、圧力を示したもので、水路の底面から鉛直上方に 3.0mm, 6.0mm, 9.1mm の位置における値の空間分布を示したものである。流速ベクトルの向きは水路の下流方向から反時計回りを正としたものである。水面が水路の天井と接した、管水路の入り口から 0.1m だけ下流の地点で、速度ベクトルの長さが急激に小さくなり、圧力が急激に大きくなることが分かった。これにより、流砂が管水路内に流れ込んだ際、流砂は水の流れの速度が減少したことによる上流向きの抗力、水の圧力が急激に上昇したことによる上流向きの圧力を受けていたと推定できた。これは、流砂が暗渠内で停止し堆積することで暗渠を閉塞するメカニズムであると推定できた。

本研究では上記(1)で示した 90 度に屈曲する水路と、屈曲の代わりに円弧(湾曲部)で接続した水路の 2 種類で実験を行った。

図-5 は後者の実験に用いた水路の概要である。水路は高さ 5cm、幅 5cm のアクリル製である。この場合、図-6 に示すように、湾曲部の下流側において、水面が水路の天井に接して満管状態となった。

図-6 は図-5 に示した水路実験の再現計算を 3次元で実施した結果である。図中の水面の計算結果は図-3 で用いた の値を 0.5 とした場合のものである。図より、計算結果は実験結果を概ね再現できたことがわかる。

図-7, 8 は、質量保存則と運動量保存則を鉛直方向に積分して誘導した 2次元浅水流方程式を、図-5 の実験に適用した結果で、前者は水路の下流側を見て左側(左岸側)、後者は右側(右岸側)である。図中に示した計算結果の水面は実験結果のものとは比べて 0.4m ほど下流で水路の天井に接した。このように、水面の計算結果は実験結果を十分に再現できておらず、再現性が芳しくなかった。これは、本研究で作成した計算アルゴリズムが、水面が水路の天井に接している箇所とそうでない箇所の境界部分を適切に計算できなかったため、今後、物理学的に適切な仮定を加えて改良する必要がある。

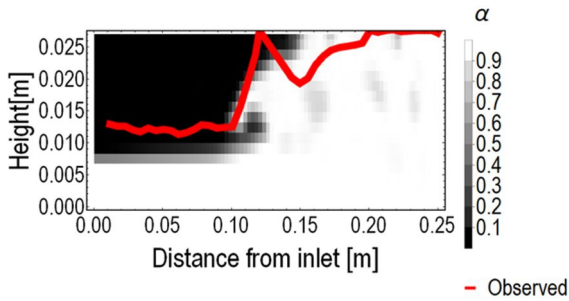


図-3 3次元計算による流れの再現結果
(図の出典)江藤 稚佳子, 原 教介, 水野 秀明(2021):暗渠内における流れと流砂の停止過程,
砂防学会誌, Vol.73, No.5, p.38-43

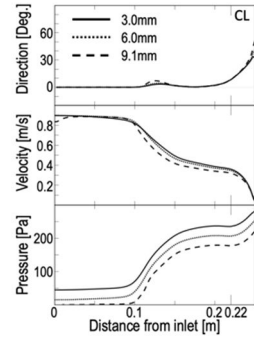


図-4 3次元計算による速度・圧力の推定
(図の出典)江藤 稚佳子, 原 教介, 水野 秀明(2021):暗渠内における流れと流砂の停止過程,
砂防学会誌, Vol.73, No.5, p.38-43

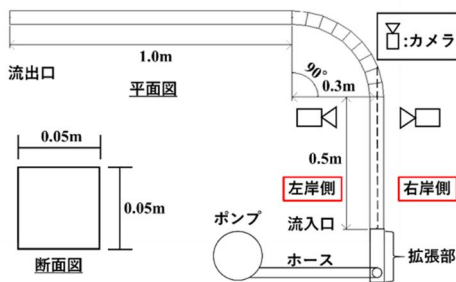


図-5 実験水路の概要

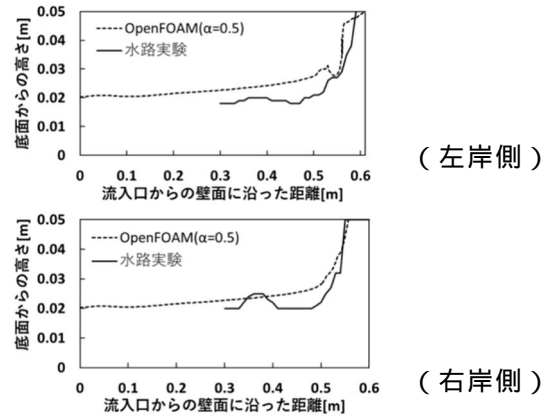


図-6 3次元計算による水面の再現結果

(図の出典)原教介、江藤稚佳子、水野秀明(2022):3次元数値解析による暗渠閉塞機構についての考察、令和4年度砂防学会研究発表会概要集、p.457-458

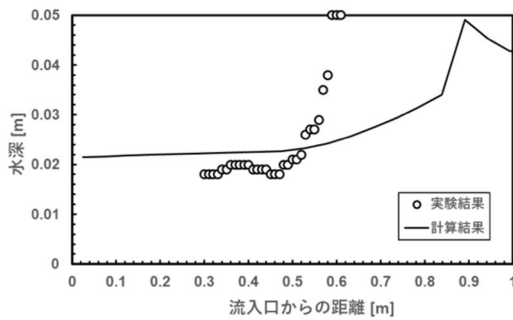


図-7 2次元計算による水面の再現結果

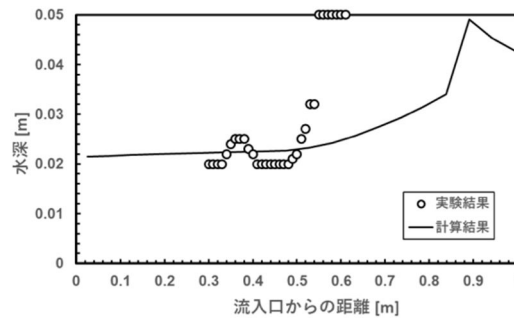


図-8 2次元計算による水面の再現結果 (右岸側)

(図の出典)江藤稚佳子、原教介、水野秀明(2022):満管と未満管が混在する流れの再現方法の検討、令和4年度砂防学会研究発表会概要集、p.469-470

(3)流砂が暗渠を閉塞する可能性のある条件の解明

上記(2)で述べたように、暗渠内で満管状態となると、流れの速度は減速し、その圧力は上昇する。すると、流砂が進行方向と逆の方向に力を受けるため、停止し堆積する。その結果、暗渠が閉塞するまで、流砂が堆積し続ける。このようなメカニズムで流砂は暗渠を閉塞することが分かった。山間地の谷間の住宅地における土砂災害時の安全な避難経路を設定するためには、想定した降水量とそれに伴う洪水の規模に応じて、暗渠が満管状態になる区間を見つければ良い。本研究では、3次元計算は暗渠内の水の流れを精度良く再現できることが分かった。一方で、2次元浅水流方程式を適用した場合には、再現精度があまり良くないことが分かった。土砂災害や洪水のハザードマップが2次元浅水流方程式等を適用して作成することを考えると、今後、改良を行なっていく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 江藤稚佳子、原教介、水野秀明	4. 巻 73
2. 論文標題 暗渠内における流れと流砂の停止過程	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 砂防学会誌	6. 最初と最後の頁 38-43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11475/sabo.73.5_38	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 原教介、江藤稚佳子、水野秀明
2. 発表標題 2017年大分県津久見市における土砂流出とそれに伴う暗渠の閉塞機構の考察
3. 学会等名 令和3年度砂防学会研究発表会概要集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江藤稚佳子、原教介、水野秀明
2. 発表標題 浅水流方程式による暗渠内の流砂の停止過程の再現
3. 学会等名 令和3年度砂防学会研究発表会概要集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原教介、江藤稚佳子、水野秀明
2. 発表標題 3次元数値解析による暗渠閉塞機構についての考察
3. 学会等名 令和4年度砂防学会研究発表会概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江藤稚佳子、原教介、水野秀明
2. 発表標題 満管と未満管が混在する流れの再現方法の検討
3. 学会等名 令和4年度砂防学会研究発表会概要集
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------