

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04609

研究課題名（和文）RIM法による土石流内部の流木流下過程の解明と橋梁閉塞対策に関する特進研究

研究課題名（英文）Study on Convection of driftwood in debris flow using RIM method and measure against bridge clogging due to driftwood

研究代表者

岡本 隆明（Okamoto, Takaaki）

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：70599612

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではRIM法を用いて盛土崩壊時の土石流内部の流木の挙動を調べ、またパイピング発生時の土粒子の挙動を計測し、3フェーズに分けて、パイピングの発生位置や粒子速度を計測した。次に橋梁部での流木集積実験を行い、河道閉塞が発生する条件や流木長による流水阻害率の変化について調べた。幅の狭い河川での橋梁にかかる力の計測も行っている。流木による橋梁閉塞対策として増水時にのみ機能するわんど域を利用した捕捉施設を考案し、開口部の形状や対岸の水制の数を変化させることで効果的に流木を除去できるシステムについて実験的研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

RIM法から盛土崩壊時の土石流の流れ、流木が含まれるときの流木の挙動を調べた。また土石流の原因とされるパイピング現象についてフェーズ分けし、発生位置、土粒子の速度を明らかにした。流木閉塞が起きるときの径間長と流木長の比を明らかにし、橋梁閉塞の起きやすい河川を知るための有用なデータを得た。また流木対策として増水時にのみ機能するわんど域を利用した流木捕捉システムを考案し、対岸の水制も下部を透過型にして平水時に影響の少ない流木捕捉工で80%以上流木を除去することができた。

研究成果の概要（英文）：We investigated the woody debris motion in debris flow using RIM method when the embankment collapses. Second, we revealed the location of the point where a piping occurs and measured the sediment particle velocity at 3 phases. Third, we conducted the driftwood accumulation test at the bridge and examined the effect of the wood length on blockage ratio. We also measured the drag force exerted on the bridge when driftwood accumulates in a narrow river. Finally, we tested a new large wood retention system in which embayment zone is connected to main channel and woody debris is removed when water level rises. The laboratory flume experiments were conducted by varying the elevation of the embayment zone, entrance shape of embayment zone, installation angle of groyne, groyne position, number of groynes and Froude number. The results showed that the trapping probability is highly influenced by the entrance shape of embayment zone.

研究分野：河川防災学

キーワード：RIM法 土石流 パイピング 流木 橋梁閉塞 流体力 流水阻害率

1. 研究開始当初の背景

近年,集中豪雨が多発し,中小河川において,想定外の水害が生じている.山腹崩壊によって大量の流木が土砂とともに流出すると中小河川は河道埋塞し急激な水位上昇や流向変化を引き起こすため,水だけのハザードマップでは予想もしなかった箇所が氾濫し,水理工学的な知見に基づく十分な対策ができていないのが現状である.そこで本研究では実験水理を駆使してこの課題にアプローチする.本研究では水理模型実験により①RIM(屈折率マッチング)法を用いて土石流内部での流木の挙動を調べる,②流木閉塞の誘発しやすい橋梁を特定するためのデータを得る.さらに③河川の高水敷部を利用した流木集積を防ぐシステムを考案することを目的としてスタートした.



図1 盛土構造物崩壊時の土石流発生 (RIM 法)

2. 研究の目的

土石流発生時に流木がどの位置に集中して存在しているのか,中小河川においてどれぐらいの流木が流れてくると橋梁部で全面閉塞するのかの知見も得られておらず,また直線河道で河道阻害せずに流木を捕捉できるシステムも考案されていないので流木による水害に対して十分な対策ができていない.そこで本研究ではまず,RIM法を用いて盛土の崩壊実験を行い,土石流発生時の流木の挙動を調べる.またRIM法を用いてパイピング実験を行い,各フェイズごとの土粒子の流速を計測する.次に流下した流木による橋梁閉塞実験を行い,閉塞の条件を調べる.さらにわんどを高水敷化した流木捕捉システムに着目し,実験的研究を行う.

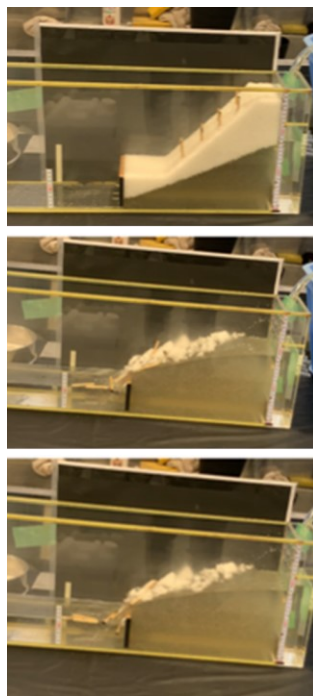


図2 流木混じり土石流の発生 (RIM 法)

3. 研究の方法

土石流のRIM法による計測:本研究ではヨウ化ナトリウム溶液と石英ガラスを用いて屈折率マッチング法による可視化計測を行った.石英ガラスを用いて盛土構造物を作成した.上流からヨウ化ナトリウム液を加えると,盛土構造物の飽和した領域では石英ガラスが液中で透明化され,間隙を移動する流体の動きを混入した気泡から調べることができる.ヨウ化ナトリウム溶液を加えると盛土の下部で溶液が噴き出し始めた.下部が崩落すると盛土上部も崩落し土石流となって流出した(図1).

盛土構造物の上部に樹木模型を設置して流木混じり土石流についても調べた.ヨウ化ナトリウム液を加えると,ヨウ化ナトリウムで飽和した領域が透明になっている.盛土下部で溶液が噴き出すが,上部では盛土の表層で崩壊が始まる.樹木は表層崩壊時に流出して流木となっている.比重が軽いので土砂に混じって下になることはなく表面を浮かんで流出した.表層の崩壊時に流出しているため土石流の先頭部に集中して流木が流れていくのが観察された.流木は土砂と混じりあって流出すると予測されたが,比重が軽いので浮かんで流出している(図2).

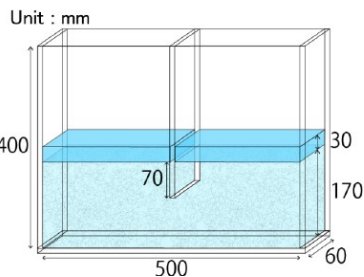


図3 止水矢板のパイピング現象の計測 (RIM 法)

パイピング現象のトリガーとなる水みちの発生やその後水みちが拡大し、地盤を侵食する過程において地盤ならびに地盤内部の流体挙動は明らかになっていない。RIM法による2次元止水矢板浸透模型実験において地盤内部を可視化し、パイピング現象における水みち発生・進展過程における流体の観測を行った(図3)。水位を地表面から30mmで保った状態を初期状態とし、その後、上流側の水位を20秒間で55mmの割合で上昇させ、パイピングが発生してから地盤の変状が停止するまで観察を行った。着色した石英粒子をトレーサーとして用いている。

橋梁閉塞実験：1ピア橋梁では側壁では橋脚前面のように流木が横向きに捕捉されないため、橋脚を2本以上有する橋梁とは異なった条件で閉塞する可能性が考えられる。1ピア橋梁の径間長に対してどれぐらいの長さの流木がくると流木閉塞するかの限界条件、部分閉塞、全面閉塞したときの遮蔽率(流水阻害率)の変化は明らかにされてない。また流木閉塞したときの橋梁にかかる力がどれだけ増大するかについては国内外でほとんど知見が得られていない。

そこで本研究では川幅の狭いところにある橋梁を想定して流木集積実験を行った(図4)。橋梁は1本橋脚を有する1ピア橋梁とした。流木長を系統的に変化させてせき上げ水深を計測することで、流木閉塞の限界条件や河道閉塞率を評価した。また流木塊を上から撮影し流木捕捉角を評価し、流木長による流木塊形状の変化を明らかにした。次にデジタルプッシュプルゲージを用いて流木集積によって橋にかかる力がどの程度大きくなるか調べた。

流木捕捉工の実験：湾曲部のない河川を想定して直線河道の片側にワンド、対岸に透過水制を設けて流木集積させる捕捉システムを考案した。ワンド境界部に越流堤を設けていない場合、平水時も主流部から水がワンド捕捉池内に流入し、ごみ等が入り込んで捕捉池の管理が難しくなるなど問題点が生ずると考えられる。本研究では室内水路実験(図5)を行い、ワンド型捕捉池を高水敷化し、洪水時にのみ本川と連結し氾濫水と流木が捕捉池に入り込む捕捉システムを提案する。さらに対岸の水制を小さくし、透過率を上げた上で捕捉率が上がるように改良を加えた。流木捕捉実験、PIV法による流速計測、トラッキング追跡による流木の移流速度計測を行い、高水敷の高さ、開口部の形状、水制の傾き、水制の個数、断面平均流速、流木長の流木捕捉率への影響を定量的に評価した。

4. 研究成果

画像解析によって得られた各Phaseにおける粒子の軌跡と粒子の移動速度を図6に示す。Phase1では、地表面から深さ約50~60mmの下流側止水矢板近傍で粒子が鉛直上向きに動き始め、地盤が微量に変形し始める。粒子が動き始めるこの位置を起点に水みちが発生していると考えられる。Phase2では、発生した水みちが上流側へと徐々に拡大することでPhase1よりも速い粒子の移動が見られる。Phase3では、下流側で発生・拡大した水みちが上流側へ完全に連通した状態における粒子の移動速度を示しており、粒子が矢板の真下を通過する点において最も速度が速くなることを示している

図7に $l/Br=0.65, 0.76, 0.81, 0.86, 0.97, 1.3$ における流木投入終了後の上から撮影した流木集積のスナップショットを示す。流木長の短い($l/Br=0.65, 0.76$)のケースでは、流木塊が形成されるが全面閉塞していない。流木塊が一定の大きさを超えると、上流側に大きくならなかつた。水面付近で流木は集積するが水面下は流木で塞がっておらず、水が通り抜けている。流木長の長い($l/Br \geq 0.81$)のケースでは全面閉塞し、流木塊は流木集積するたびに上流側に大きくなっていく。

図8に各ケースの流木集積時の堰上げ水深の最大値 H_{max} を示す。縦軸は流木集積時の堰上げ

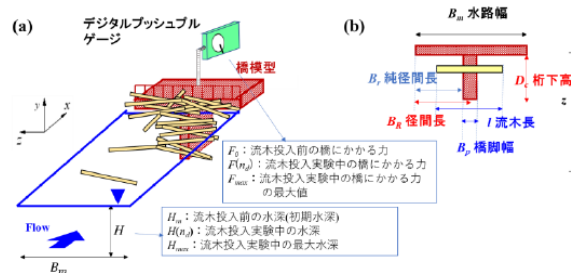


図4 流木による橋梁閉塞実験

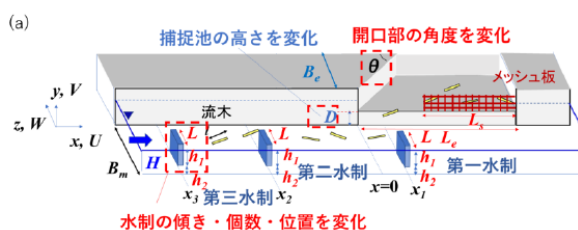


図5 わんど域を利用した流木捕捉工の実験

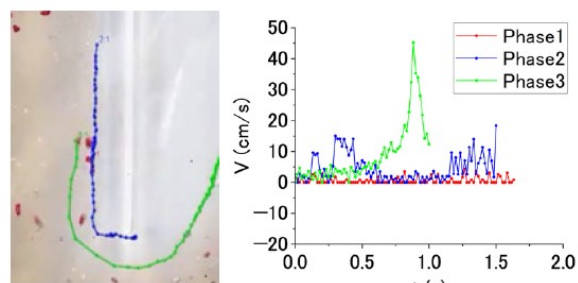


図6 パイピング発生時の土粒子の流速

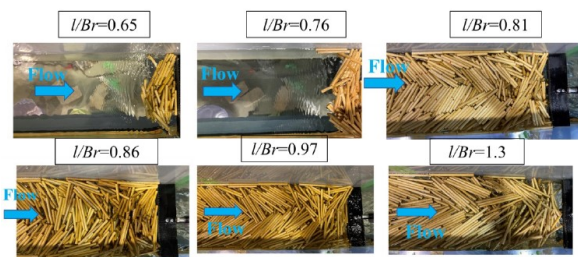


図7 橋梁閉塞時の流木塊の流木捕捉角度の変化(流木長さの影響)

水深の最大値 H_{max} を初期水深 H_m で無次元化している。せき上げ水深の最大値は 6 回の実験値を平均した。横軸は流木長さ l を橋脚の純径間長 Br で無次元化している。図 8 に河道閉塞率 (流水障害率) A_b/A を示す。 $l/Br=0.65, 0.76$ で H_{max}/H_m は低くなっている。これは流木長が短いケースでは全面閉塞しないためである。部分閉塞するケースの河道閉塞率は 38, 49%であった。

$l/Br=0.81$ より大きくなると全面閉塞するため、 H_{max}/H_m は急激に増加し、橋の上に越流している。河道閉塞率は 70%に達した。 $l/Br=0.86, 0.97$ で H_{max}/H_m は最大(河道閉塞率は 77%)となった。 $l/Br=0.97$ より大きくなると、 H_{max}/H_m は減少していく。これは長い流木ほど流木が沈下しにくくなり、底面付近で流木が集積しにくくなるためである。

捕捉池の高水敷高さの効果について PIV 流速計測結果から考察する。図 9 に捕捉池上流端付近の横断流速 W コンターと時間平均流速ベクトル図を示す。レーザー光を斜めから入れているため、図中点線部の第一水制の裏側で影になっている領域ではベクトルが算出できていない。

水制から捕捉池内部にかけて正值領域がみられる。水制で水はねされた流れが捕捉池内部に入り込んでいる。捕捉池の高水敷高さが高くなると、捕捉池に向かう流れが通水断面積が小さくなるため、捕捉池内部では正值が増加している。境界部 ($z/B_m=1.0$) では正值が減少している領域がみられるが、複断面の境界部でみられる斜昇流の影響だと考えられる。斜昇流の影響で高水敷高さが高いケースで捕捉率が減少したと推測される。

捕捉池の管理上洪水時にのみ流木が捕捉されるように設計することが望ましいが、捕捉池を高水敷化すると流木捕捉率が下がることがわかった。水制の向きや捕捉池形状を変化させて、捕捉率を上げる必要がある。

次に捕捉池の捕捉効率を上げるために高水敷高さ $D/H=0.6$ について開口部の形状を変化させて流木捕捉率を比較した(図 10)。第一水制の設置位置は $x_1/B_m=0.75$ とした。横軸は第二水制の流下方向位置 x_2 である。

流木捕捉池形状の効果が顕著にみられる。開口部 90 度では捕捉率は最大 $P_b=0.55$ であった。開口部を 90 度から斜めにする、すなわち開口部の角度 90 度から 21.8 度までは角度をつけることで流木捕捉率が増加して最大 $P_b=0.77$ であった。捕捉池の入り口から内部に斜めに向かう流れが発生するためである。

しかし、さらに角度をつけて開口部の角度 21.8 度から 11.3 度になると捕捉率は少し減少する。図には示していないが開口部の角度を 11.3 度以上に小さくすると捕捉率は減少する(開口部の角度 7.6 度で最大 $P_b=0.53$)。これは本実験条件では角度を 11.3 度以上に小さくすると、斜めに取り付けた板がメッシュ板の上流端より下流側になり、捕捉池内部で流木が通過する領域の断面積が小さくなるためである。

捕捉池の形状効果についてさらに考察するために図 11 に PIV 計測から得られた捕捉池開口部の横断流速 W コンターと時間平均流速ベクトル図を示す。第一水制、第二水制の設置位置はそれ

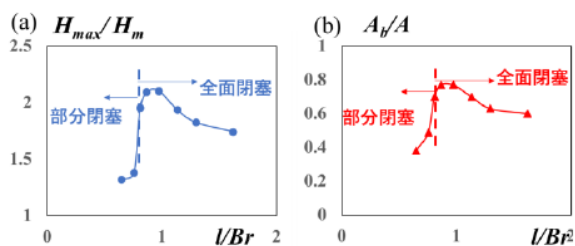


図 8 流木による橋梁閉塞時のせき上げ水深と河道閉塞率の変化

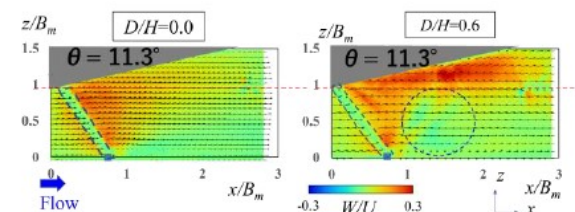


図 9 わんど域のかさ上げによる流れ構造の変化

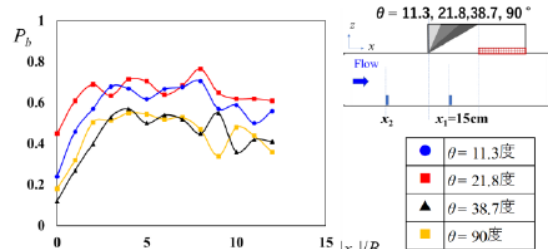


図 10 わんど開口部の角度による流木捕捉率の変化

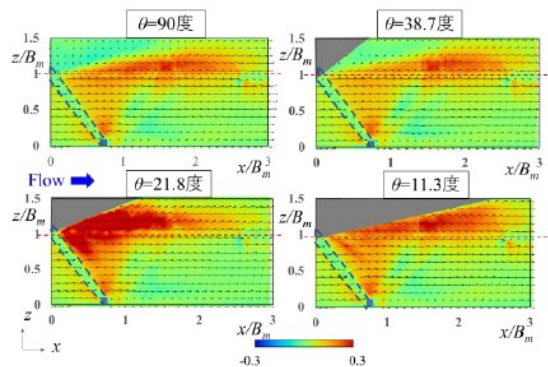


図 11 わんど開口部の角度による流れ構造の変化

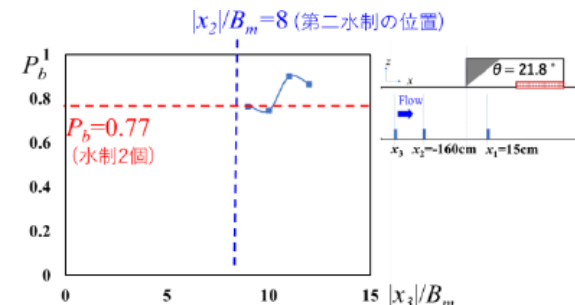


図 12 対岸の水制の数によるわんど域での流木捕捉率の変化

ぞれ $x_1=15\text{cm}$ ($x_1/B_m=0.75$), $x_2=-160\text{cm}$ ($x_2/B_m=-8$) とした。

開口部 90 度では水制から捕捉池内部にかけて正值領域がみられる。水制で水はねされた流れが捕捉池内部に入り込んでいる。捕捉池の上流側では負値がみられ、循環流の影響で捕捉池に向かう流れが弱くなっている。開口部 38.7 度にしても 90 度のケースと大きな差はみられない。循環流が捕捉池上流側で形成されている。

開口部 21.8 度にするると正值が大きくなっており、捕捉池に向かう流れが強くなっている。捕捉池内に隅切りを設置することで捕捉池上流で循環流が発生しなくなったためと考えられる。開口部 11.3 度にするると、21.8 度のケースより正值が小さくなっている。水制から捕捉池に向かう流れが隅切りにぶつかって弱められたと推測される。

さらに捕捉率を上げるために、第二水制の上流側に第三水制を設置して捕捉率を比較した。図 12 に上流側に第三水制を設置したときの捕捉池(開口部の角度は 21.8 度)内での流木捕捉率 P_b の変化を示す。横軸は第三水制の流下方向位置である。第一水制、第二水制の設置位置はそれぞれ $x_1=15\text{cm}$ ($x_1/B_m=0.75$), $x_2=-160\text{cm}$ ($x_2/B_m=-8$) とした。第三水制を流下方向位置 $x_3=-220\text{cm}$ ($x_3/B_m=-11$) に設置すると捕捉池内の流木捕捉率が最も大きくなり、 $P_b = 0.85$ となった。対岸に透過水制を 3 個設置することで捕捉池を高水敷化しても十分な捕捉効率を有することがわかった。

- 1) 夏目将嗣, 岡本隆明, 小高猛司, 李圭太: 止水矢板周りのパイピング現象における地盤侵食過程と流れの観察, 第 35 回中部地盤工学シンポジウム
- 2) 夏目将嗣、小高猛司・李圭太、岡本隆明: 屈折率マッチング法による止水矢板周りのパイピング現象の観測, 第 58 回地盤工学研究発表会
- 3) 岡本隆明, 松本知将, 田中健太, 山上路生: 流木長が橋梁閉塞過程に与える影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.78, pp. I_583-I_588, 2022
- 4) Taka-aki Okamoto, Kenta Tanaka, Kazumasa Matsumoto, Tomohiro Someya (2020) Influence of velocity field on driftwood accumulation at a bridge with a single pier. Environmental Fluid Mechanics, Springer 21(3) 693-711 2021.
- 5) 岡本隆明, 松本知将, 木村一郎, 田中健太, 山上路生, 渡辺力: 洪水時にのみ機能するワンド型流木捕捉池 システムの高度化に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, pp. I_355-I_360, 2021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 岡本 隆明, 松本 知将, 田中 健太, 山上 路生	4. 巻 78(2)
2. 論文標題 流木長が橋梁閉塞過程に与える影響に関する実験的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_583-I_588
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto T, Tanaka K, Matsumoto K and Someya, T.	4. 巻 21
2. 論文標題 Influence of velocity field on driftwood accumulation at a bridge with a single pier.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environmental Fluid Mechanics, Springer	6. 最初と最後の頁 693-711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岡本 隆明・松本 知将・木村一郎・田中 健太・山上 路生・渡辺 力	4. 巻 Vol.77, No.2
2. 論文標題 洪水時にのみ機能するワンド型流木捕捉池システムの高度化に関する実験的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_355-I_360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山上 路生・角 哲也・小柴 孝太・高田 翔也・岡本 隆明・長坂 香織	4. 巻 Vol.77, No.2
2. 論文標題 沈木の限界掃流力に関する基礎的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_823-I_828
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡本 隆明・松本 知将・山上 路生
2. 発表標題 流木沈下メカニズムと橋梁部での全面閉塞の限界条件に関する研究
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中 健太・岡本 隆明・松本 知将
2. 発表標題 1 ピア橋梁での流木集積過程と表面流況の変化に関する実験的研究
3. 学会等名 第40回日本自然災害学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本 隆明・木村一郎・松本 知将・田中 健太・山上 路生・渡辺 力
2. 発表標題 増水時にもみ機能するワンド型流木捕捉池システムの高度化に関する実験的研究
3. 学会等名 令和3年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本隆明、山上路生
2. 発表標題 わんど域を利用した流木捕捉システムに関する研究
3. 学会等名 令和5年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 紀國開, 岡本隆明, 山上路生, 松本知将
2. 発表標題 河道湾曲部に設置した流木捕捉池に関する実験的研究
3. 学会等名 2023年度 関西土木工学交流発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 夏目将嗣、岡本隆明、小高猛司
2. 発表標題 RIM法を用いた2次元止水矢板浸透模型実験によるパイピング進展過程の流体の観測
3. 学会等名 令和5年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 夏目将嗣、小高猛司・李圭太、岡本隆明
2. 発表標題 屈折率マッチング法による止水矢板周りのパイピング現象の観測
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 夏目将嗣 , 岡本隆明 , 小高猛司 , 李圭太
2. 発表標題 止水矢板周りのパイピング現象における地盤侵食過程と流れの観察
3. 学会等名 第35回中部地盤工学シンポジウム
4. 発表年 2023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
---------	---------