

流木の回転を考慮した流木対策工に関する研究

2019 年

原 田 紹 臣

目 次

緒 論	1
第1章 不透過型砂防堰堤の流木捕捉機能	
1.1 概説	7
1.2 堆砂条件の違い等が流木捕捉機能に与える影響	10
1.3 流木捕捉状況の違いに基づく流木発生機構	15
1.4 まとめ	21
第2章 不透過型砂防堰堤における流木捕捉機能の高度化	
2.1 概説	23
2.2 流木捕捉工の設置位置の違い等が流木捕捉機能に与える影響	25
2.3 部分透過型砂防堰堤における流木捕捉機能	35
2.4 前庭部における流木捕捉機能の高度化	44
2.5 まとめ	61
第3章 コンクリート・スリット堰堤の流木捕捉機能とその高度化	
3.1 概説	63
3.2 開口条件の違い等が流木捕捉機能に与える影響	64
3.3 スリット部における流木捕捉機能の高度化	73
3.4 まとめ	83
第4章 地形条件を活用した流木対策工	
4.1 概説	85
4.2 土地利用を考慮した流木捕捉工の提案	86
4.3 地形条件の変化等が流木捕捉機能に与える影響	88
4.4 まとめ	95
第5章 木除杭の流木対策機能とその高度化	
5.1 概説	97
5.2 杭の設置条件の違い等が流木対策機能に与える影響	100
5.3 まとめ	122
結 論	124

緒 論

近年、林業の衰退による山林の荒廃や地球温暖化の影響を受けた集中豪雨等による斜面崩壊¹⁾に伴って流木が流出し、下流域において多大な被害が報告されている。特に、我が国は国土の約4分の3が山地であり、その大部分が森林に覆われているため、山腹崩壊や溪岸崩壊による多量の流木の発生及び流出が懸念される。また、流木は河川横過部の橋梁や箱渠の上流等で閉塞することが多く、橋梁の損傷や流出、閉塞箇所上流部における洪水氾濫の原因となることが、これまでの災害事例より報告されている^{2), 3), 4)}。

一方、従来の不透過型砂防堰堤における流木捕捉機能の一部不足が指摘⁵⁾され、鋼材の併用による流木捕捉機能を強化する考え方⁶⁾が設計マニュアル⁷⁾等において示された。なお、平成29年7月に九州北部で発生した豪雨災害^{8), 9), 10)}では、多くの不透過型砂防堰堤において流木の殆どを捕捉出来ず、下流において多くの被害を受けた一方で、一部の不透過型砂防堰堤において顕著に流木を捕捉した事例¹¹⁾が報告された。これらの報告を踏まえて、今後、不透過型砂防堰堤の流木捕捉機能やその対策手法について更なる議論が必要であると考えられる。また、今回の災害を受け、溪流から下流河川区域まで含めた総合的流域における流木対策の方向性や事業の推進¹²⁾が示され、流域全体における合理的な流木対策技術の確立が急務な課題となっている。

流木に関する研究としては、下流域での流木による災害の実態や流下・停止等の流木運動機構、砂防堰堤や柵状構造物での流木捕捉等について、基礎的な実験や解析により、佐々木¹³⁾、水原^{14), 15)}、水原ら^{16), 17)}、瀬尾ら¹⁸⁾、石川ら^{19)~23)}、松村ら²⁴⁾、土井ら²⁵⁾、堀口ら²⁶⁾により報告されてきた。また、橋梁や河道の狭窄部における流木の閉塞や流木の挙動と、これらの対策に関して、実験や解析により、足立・大同²⁷⁾、後藤ら²⁸⁾、清水・長田²⁹⁾、渋谷ら³⁰⁾、石野ら³¹⁾により報告されてきた。一方、下流域における杭水制や分散堆積工について、Schmocker, L. and Weitbrecht, V³²⁾、関沢ら³³⁾、設計マニュアル³⁴⁾により提案されてきた。さらに、橋梁における流木対策として、古くから木除杭が経験的に用いられており、竹林³⁵⁾は洪水時における木除杭の対策効果について報告するとともに、杭による流木の流向制御に関する機能の可能性について指摘している。これらの報告によると、これらの構造物における流木の閉塞有無に関して、その直上前における流木軸の方向（向き）が重要であることが考えられる。

実務の現場において、流木捕捉効果の高い構造物を計画及び設計するためには、土石流及び流木の発生・流出機構や運動、現地状況に応じた施設配置位置、土地利用・維持管理も考慮した合理的な方策や考え方に基づいて、更に詳細に検討する必要があると考えられる。さらに、流木被害を軽減するための流域全体としての対策を流域特性に応じて合理的に講じるためには、上流域から下流域までにおける各対策工において懸念される課題や配慮事項に関して、体系的に把握しておく必要がある。その際、水の流れによる流木の回転に伴う流木の構造物における閉塞への影響については、重要な論点であると考えられる。さらに、山地河川における土砂や流木の流出過程に関しては未解明な点が多く残されているため、行政担当者や設計実務担当者はマニュアルに応じた画一的な検討だけでなく、様々な条件を十分に考慮した更なる詳細な検討が望まれる。

そこで、効果的に流木対策施設の効果を発揮させるために、著者は実際に発生した流木発生及び捕捉状況を現地調査等に基づいて整理し、不透過型砂防堰堤における流木捕捉機構につ

いて考察するとともに、鋼材による不透過型砂防堰堤における流木捕捉機能の高度化や、近年に提案された部分透過型砂防堰堤の流木捕捉機能に関して、室内実験により研究を行ってきた^{36)~38)}。また、これまで殆ど議論されてこなかった緩勾配区間である掃流区間におけるコンクリート・スリット堰堤における流木処理機能やその高度化、土地利用や維持管理等を考慮した流木処理の考え方、さらに、伝統的な橋梁における流木対策技術の一つである木除杭の高度化に関して研究を行ってきた^{36), 39)~40)}。

本論文は、砂防施設管理者や実務の設計担当者が効果的に流木対策について、更に詳細に検討するための重要な知見の一つとして、流木捕捉実態等の事例を示した上で、上流域から下流域までにおける被害を軽減するための各流木対策工の検討における留意点や対策手法の高度化に関して、特に、流木の回転に着眼した研究の成果を中心にとりまとめたものであり、次の5章から構成されている（図-a.1）。

第1章では、平成29年度九州北部豪雨災害において発生した流木の流出に関して、現地の既設不透過型砂防堰堤における流木の捕捉状況や施設周辺の痕跡等より、流木の発生や流出に関する機構等について考察する。

第2章では、不透過型砂防堰堤における鋼材を用いた流木対策の機能向上を目的に、室内の水路実験によって、流木の回転や堆積機構を考慮した流木対策の計画や設計における留意点について考察する。さらに、既設不透過型砂防堰堤における流木捕捉機能の高度化を目的に、流木の回転に着眼した堰堤直下流の前庭部（副堰堤）における流木対策工の付加構造について提案するとともに、流木の回転に関する機構について考察する。

第3章では、掃流区間における既設砂防堰堤の流木対策機能を考慮した流木対策計画の策定を目的に、これまで殆ど議論されてこなかったコンクリート・スリット堰堤における流木処理機能及びその高度化に関して、実験により考察する。

第4章では、九州北部豪雨災害において発生した流木流出機構や今後の維持管理に着眼して、流域の地形特性を考慮した新たな流木対策方針や配慮について示すとともに、提案する流木対策工の流木捕捉効果に関して、室内の急拡水路実験により、上下流の勾配変化等に伴う流速の変化が与える影響について考察する。

第5章では、古くから橋梁における流木等の対策として用いられてきた木除杭の機能について実験により考察するとともに、優位と考えられる杭の配置形式や構造について提案する。

最後に、本論文の研究成果を要約して結論としている。

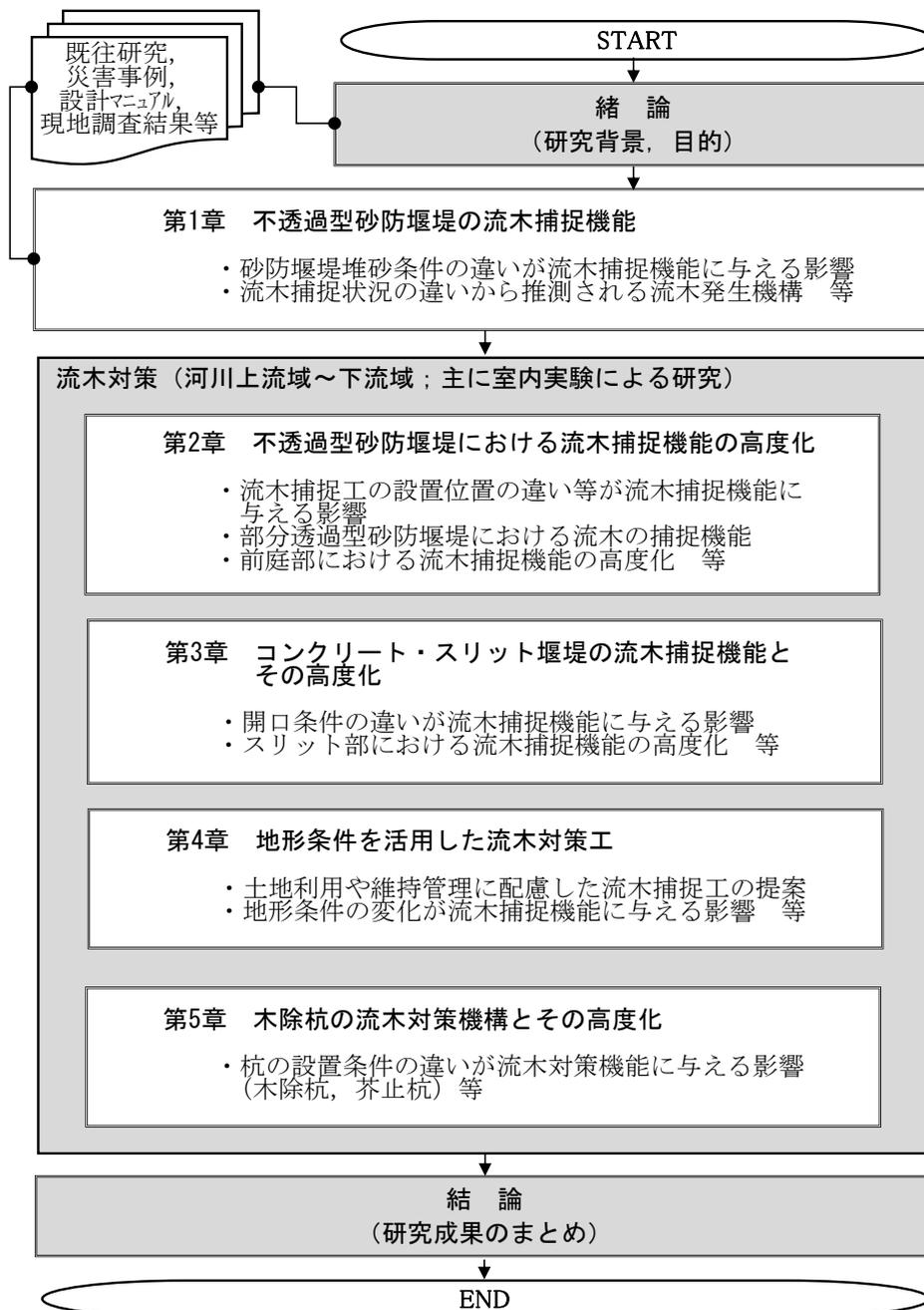


図-a.1 本研究の流れ (主な内容)

参考文献

- 1) 藤田正治：気候変化が土砂災害の素因・誘因に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol.65，No.1，pp.14-20，2012.
- 2) 石川芳治：山地小溪流からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究，京都大学博士学位論文，1990.
- 3) 石野和夫，橋丸大史，玉井信行：2004年7月18日福井水害における流木の橋梁への影響調査結果，土木学会第61回年次学術講演会，Vol.2，pp.9-10，2006.
- 4) 足立昭平，大同淳之：流木に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，Vol.1，pp.41-49，1957.
- 5) 藤村直樹，黒岩智恵，泉山寛明，赤澤史顕，水野秀明：不透過型砂防堰堤による流木の捕捉と流出に関する実験報告書，土木研究所資料，Vol.4331，2016.
- 6) 国土交通省 砂防部：事務連絡，流木対策の実施（当面の対応），2015.
- 7) 国土交通省 砂防部：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，国総研資料，Vol.904，2016.
- 8) 地盤工学会：平成29年7月九州北部豪雨緊急災害報告会資料，2017.
- 9) 鈴木健吾，篠原麻太郎，守屋博貴，二瓶泰雄，長谷部由莉，五十川周，矢野真一郎，赤松良久：平成29年九州北部豪雨による福岡県朝倉市 山の神ため池の決壊・洪水氾濫状況，土木学会論文集B1（水工学），Vol.74，No.4，pp. I_1183-1186，2018.
- 10) 堀 俊和，泉 明良，正田大輔：平成 29 年 7 月九州北部豪雨での被災ため池に関する調査報告書，2017.
- 11) 国土交通省：【施設効果事例】須川第1砂防堰堤（福岡県朝倉市），http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_kyushu_gouu/，2017（閲覧日：平成30年12月1日）.
- 12) 国土交通省 砂防部：事務連絡，平成29年7月九州北部豪雨災害を踏まえた今後の砂防事業における流木対策，2017.
- 13) 佐々木八郎：砂防ダム付近における流木阻止に関する実験的研究，信州大学工学部紀要，Vol.13，pp.59-89，1962.
- 14) 水原邦夫：砂防ダムと流木（Ⅰ）－流木群の堆積開始と運動機構－，新砂防，Vol.28，No.2，pp.17-24，1975.
- 15) 水原邦夫：砂防ダムと流木（Ⅱ）－流木群の堆積開始と運動機構－，新砂防，Vol.28，No.3，pp.17-23，1975.
- 16) 水原邦夫，南 哲夫，武居有垣：流木の阻止に関する基礎的研究（Ⅰ），新砂防，Vol.32，No.2，pp.10-16，1979.
- 17) 水原邦夫，武居有垣，南 哲夫：流木の阻止に関する基礎的研究（Ⅱ），新砂防，Vol.32，No.3，pp.9-16，1980.
- 18) 瀬尾克美，水山高久，大場 章，上原信司：土石流と共に流出する流木の運動と捕捉工に関する実験的研究，土木技術資料，Vol.26，No.2，pp.9-13，1984.
- 19) Ishikawa, Y. and Mizuyama, T.: An experimental study on permeable sediment control dams as a countermeasure against floating logs, *6th Congress Asian and Pacific Regional Division International Association for Hydraulic Research, proceeding*, Vol. II -2, pp.723-730, 1988.
- 20) 石川芳治，水山高久，鈴木浩之：崩壊・土石流に伴う流木の実態と調査法，土木技術

- 資料, Vol.31, No.1, pp.23-29, 1989.
- 21) 石川芳治, 水山高久, 福澤 誠: 土石流に伴う流木の発生及び流下機構, 新砂防, Vol.42, No.3, pp.4-10, 1989.
 - 22) 石川芳治, 水山高久, 福澤 誠: 砂防ダム及び流木止めスクリーンによる流木捕捉効果, 土木技術資料, Vol.31, No.9, pp.41-47, 1989.
 - 23) 石川芳治, 水山高久, 浅井信秀: 流木の衝突による鋼材の変形に関する実験的研究, 新砂防, Vol.42, No.5, pp.11-20, 1990.
 - 24) 松村和樹, 橋田芳朗, 葛西俊一郎: 格子型砂防ダムによる流木捕捉効果, 砂防学会誌, Vol. 43, No.3, pp.9-12, 1990.
 - 25) 土井康弘, 南 哲行, 山田 孝, 天田高白: 満砂状態の不透過型砂防ダムによる流木捕捉機構に関する実験的研究, 砂防学会誌, Vol. 52, No.6, pp.49-55, 2000.
 - 26) Horiguchi, T., Shibuya, H., Katsuki, S., Ishikawa, N. and Mizuyama, T.: A basic study on protective steel structures against wooden debris hazards, *International Journal of Protective Structures*, Vol. 6, No.2, pp.191-215, 2015.
 - 27) 足立昭平, 大同淳之: 流木に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, Vol.1, pp. 41-49, 1957.
 - 28) 後藤仁志, 酒井哲郎, 林 稔: 粒子法による流木群の堰止め過程の Lagrange 解析, 水工学論文集, Vol.45, pp.919-924, 2001.
 - 29) 清水義彦, 長田健吾: 流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験, 水工学論文集, Vol.51, pp.829-834, 2007.
 - 30) 渋谷 一, 堀口俊行, 香月 智, 大隅 久, 石川信隆: 円形柱集合体要素を用いた個別要素法による根付き流木の捕捉シミュレーション, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No.2, pp.I_323-334, 2011.
 - 31) 石野和夫, 橋丸大史, 玉井信行: 2004年7月18日福井水害における流木の橋梁への影響調査結果, 土木学会第61回年次学術講演会, No.2, pp.9-10, 2006.
 - 32) Schmocker, L. and Weitbrecht, V.: Driftwood, risk analysis and engineering measures, *Journal of Hydraul Engineering*, Vol. 139, pp.683-695, 2013.
 - 33) 関沢元治, 佐々木誠, 松田浩一, 市山 誠, 石原正義: 北上川下流域における流木捕捉計画と杭水制による流木捕捉工について, 河川技術論文集, Vol.11, pp.423-428, 2005.
 - 34) 国土交通省 砂防部: 土石流・流木対策設計技術指針 解説, 国総研資料, Vol.905, 2016.
 - 35) 竹林洋史: 2013年9月京都・滋賀水害調査報告, 自然災害科学, Vol.33, No.1, pp.5-16, 2014.
 - 36) 原田紹臣, 木村一郎, 中谷加奈, 里深好文, 水山高久: 流木の流出特性を考慮した流木対策に向けた提案, 河川技術論文集, Vol.24, pp.203-208, 2018.
 - 37) 原田紹臣, 高山翔揮, 里深好文, 水山高久, 中谷加奈: 不透過型砂防堰堤における鋼製部材を用いた流木対策工の捕捉機能に関する基礎的な実験, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, No.4, pp.I_1351-1356, 2017.
 - 38) 原田紹臣, 高山翔揮, 中谷加奈, 里深好文, 水山高久: 既設不透過型砂防堰堤における流木対策の高度化に関する提案, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.I_1219-1224, 2018.
 - 39) 原田紹臣, 中谷加奈, 木村一郎, 里深好文, 水山高久: 掃流区間におけるコンクリー

- ト・スリット堰堤の流木処理機能に関する提案, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.4, pp.I_1075-1080, 2018.
- 40) 原田紹臣, 内藤秀弥, 里深好文, 水山高久, 小杉賢一郎: 橋脚における木除杭及び芥留杭の機能に関する基礎的な実験, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp.301-306, 2016.

第1章 不透過型砂防堰堤の流木捕捉機能

1. 1 概説

豪雨による斜面崩壊等に伴って発生した流木は巨石等の挙動とは異なって下流まで流下し、橋梁等へ被害を与えることが知られている¹⁾。なお、これまでの不透過型砂防堰堤における流木捕捉機能の不足が指摘²⁾されたことを受け、一般的に流木捕捉効果の高いと考えられる透過型砂防堰堤³⁾への改良や、鋼材による流木捕捉機能の付加（強化）が進められてきている⁴⁾。

このような背景の中、平成29年7月に発生した九州北部豪雨災害では、一部の流域において既設の不透過型砂防堰堤が流木を殆ど捕捉せずに流木が下流域まで流出してしまい、家屋や橋梁等に多大な被害を与えた事例⁵⁾が報告されている（写真-1.1）。なお、被災した直上流に存在するため池（図-1.1）へ多量の流木が流入し、設備（余水吐）における流木閉塞に伴った排水機能の低下によって、ため池堤防が越流決壊した^{6) 7)}。なお、この要因の一つとして、更にその上流に設置されていた不透過型砂防堰堤（例えば、図-1.2や図-1.3）等において、殆どの流木が捕捉されなかったことによるものと考えられている。一方、隣接する流域に存在する一部の不透過型砂防堰堤（須川第一砂防堰堤）において顕著に流木を捕捉された事例⁸⁾が報告（図-1.4）されたことを受け、今後、不透過型砂防堰堤の流木捕捉機能に関して更なる議論が必要であると考えられる。また、今回の災害を受け、溪流から河川区域まで含めた流域における緊急的な流木対策の方向性や事業の推進⁹⁾が示され、下流域も含めた捕捉効果の高い流木対策技術の立案が急務な課題である。

そこで、本章では今後の効果的な流木対策の推進⁹⁾における有益な基礎資料の一つとして、九州北部豪雨災害において発生した流木の流出機構や不透過型砂防堰堤の流木捕捉機能に関して考察する。



写真-1.1 流木の流出による下流域における被害の事例
 (平成 29 年 7 月九州北部豪雨；奈良ヶ谷川流域)⁵⁾



図-1.1 奈良ヶ谷川下流で被災した上流に存在するため池（山の神ため池）の
 災害前後における状況^{6), 7)}に加筆



図-1.2 山の神ため池の更に上流における不透過型砂防堰堤の捕捉状況（被災直後）



図-1.3 その他の流域で被害を受けた上流における不透過型砂防堰堤の捕捉状況（被災直後）



図-1.4 災害後における不透過型砂防堰堤（妙見川：須川第一砂防堰堤）の流木捕捉状況⁸⁾

1. 2 堆砂条件の違い等が流木捕捉機能に与える影響

本研究において調査対象とする流域の位置図を図-1.5に示す。図-1.5に示すとおり、調査対象溪流は、顕著に流木を捕捉した不透過型砂防堰堤（須川第一砂防堰堤：図-1.4）が位置する妙見川流域（筑後川水系桂川）と、その流域に隣接するとともに上流に設置された不透過型砂防堰堤（2基）において流木を殆ど捕捉せずに下流ため池（図-1.1）へ多量の流木が流入し、その堤防決壊に伴って更にその下流域に多大な被害を与えた奈良ヶ谷川流域の2溪流を対象とする。

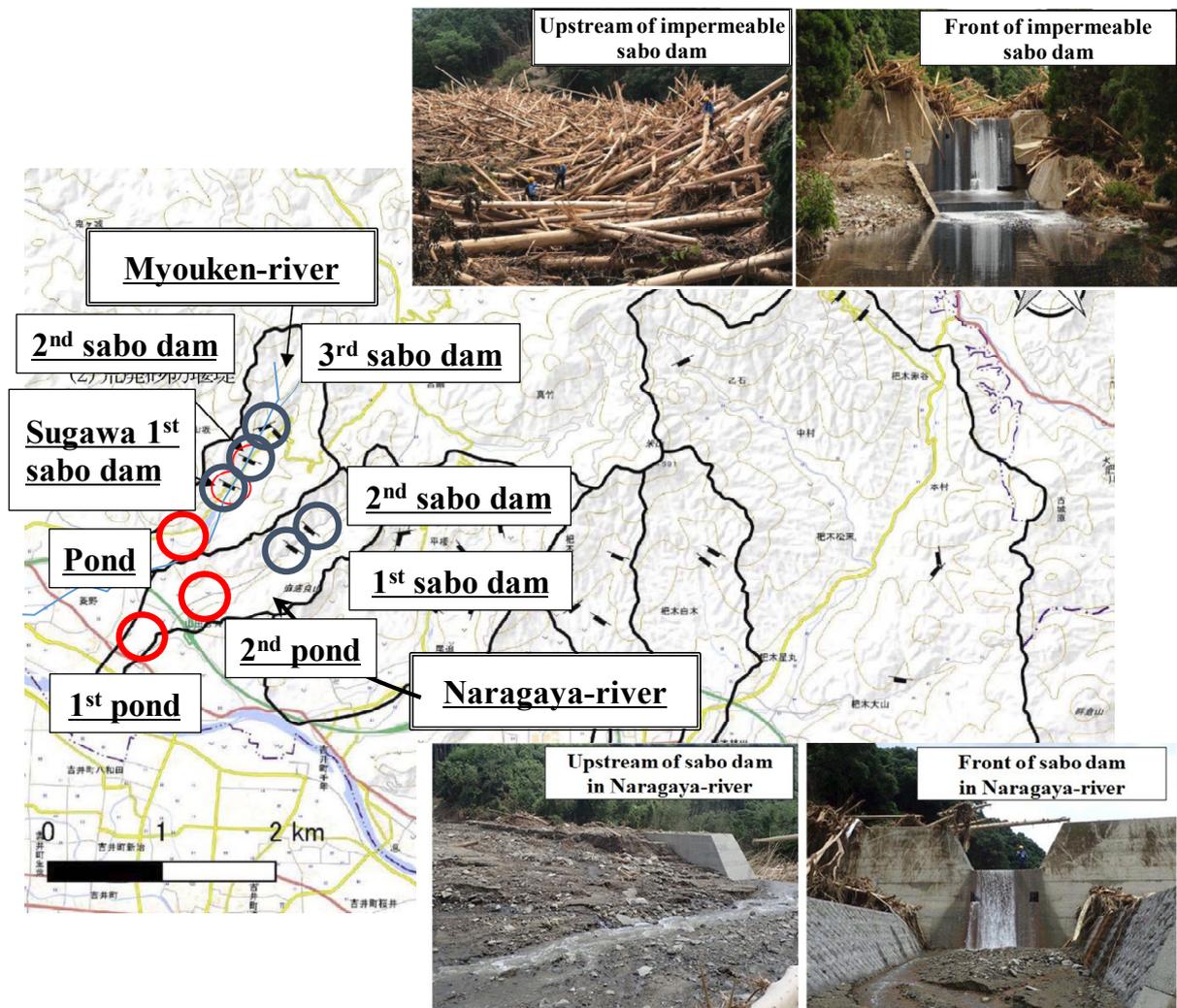


図-1.5 対象とする流域位置図（福岡県朝倉市妙見川及び奈良ヶ谷川流域）

妙見川流域（須川第一砂防堰堤）及び奈良ヶ谷川流域において議論の対象とする既設の不透過型砂防堰堤や、それらの土砂や流木の土砂捕捉状況等の概要を表-1.1に示す。表-1.1に示すとおり、今回顕著に捕捉した須川第一砂防堰堤（図-1.4）以外のその他の不透過型堰堤（例えば、図-1.2）は災害前において未満砂であったことより、土砂や流木流出前の不透過型砂防堰堤での堆砂状況（流出前における堆砂の有無）の違いは、流木捕捉に対して直接的に影響を与えないことが考えられる。一方、須川第一砂防堰堤以外の不透過型砂防堰堤における災害後の堆砂状況は全て満砂であった（例えば、図-1.3）。

表-1.1 対象とする既設砂防堰堤における流木捕捉状況と土砂の堆砂状況との関係

	Myouken-river			Naragaya-river	
	Sugawa 1 st sabo dam	2 nd sabo dam	3 rd sabo dam	1 st sabo dam	2 nd sabo dam
Debris wood capture	<u>Captured</u>	Non-captured			
Deposited sand condition (before)	Non-full sediment (<<100%)				Full sediment
Deposited sand condition (after)	<u>Non-full sediment</u>	Full sediment >>100%			
Stream slope	≈ 1/25	≈ 1/20	≈ 1/15	≈ 1/15	≈ 1/15
Dam height (m)	8	10	10	8	6
Dam length (m)	75	50	65	50	30
Water-through width of dam (m)	<u>8</u>	5	2	4	4
Dam type	Impermeable type sabo-dam				
Basin area (km ²)	1.8			1.2	
Geological type	Mafic schist			Pelitic schist	
Tree type	Cedar, cypress <i>et al.</i>			Cedar, cypress <i>et al.</i>	

ここで、**図-1.4**に示される捕捉された流木群の下面は**図-1.6**に示すとおり、災害後も自然な状態で湛水（水深2m程度）しており、貯水池で見られる一般的な湛水部におけるデルタ堆砂¹⁰が確認された。なお、**表-1.1**に示されるとおり、流木を顕著に捕捉した須川第一砂防堰堤（最下流堰堤：**図-1.4**）においては、災害時に十分な土砂が到達していなかった。この要因としては、上流域に存在する複数の不透過型砂防堰堤等において多量の土砂が捕捉されたことと、須川第一砂防堰堤の堆砂域付近における河床勾配が他の砂防堰堤付近における地形と比較して緩勾配であったことによるものと考察される。また、流木の流下及び捕捉に関して、現地調査より流木等の流下痕跡（衝突痕跡）を災害後の河床高から約2から5m程度の高さの位置において確認しており、土砂が堆積した後にそれらの上部を流木が通過したものと考察される（**図-1.7**）。

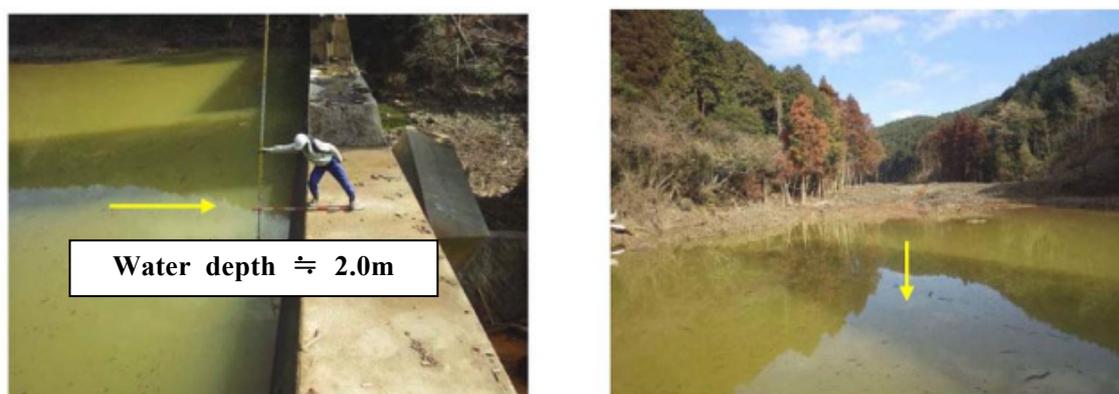


図-1.6 須川第一砂防堰堤の直上流における堆砂（湛水）状況

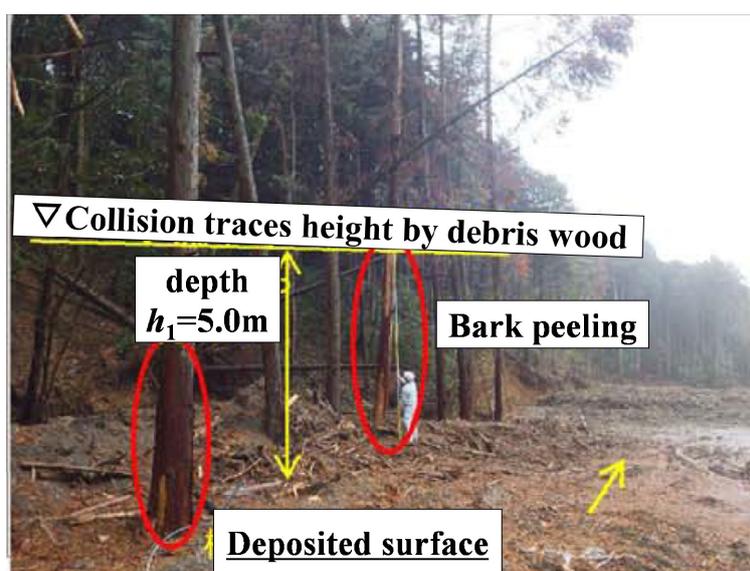


図-1.7 須川第一砂防堰堤上流域における流木等の流下痕跡状況

なお、未満砂状態で湛水している不透過型砂防堰堤における流木捕捉機能に関して、既往研究¹⁾によると、不透過型砂防堰堤の湛水部に流入した流木は湛水面で発生する平面的な渦流の影響を受けて、最終的に多くの流木が湛水部で捕捉される機構（図-1.8）が知られている。この要因として、壁体直上流付近において流れの横断方向へ回転しながら流木が輸送されるものと考察される。一方、不透過型砂防堰堤において水通し幅が狭い場合、一般的に水通し部での流木の捕捉率が大きくなることが考えられるが、表-1.1に示されるとおり、今回の事例では水通し幅の違いが流木の捕捉状況に対して殆ど影響を与えないことが分かった。

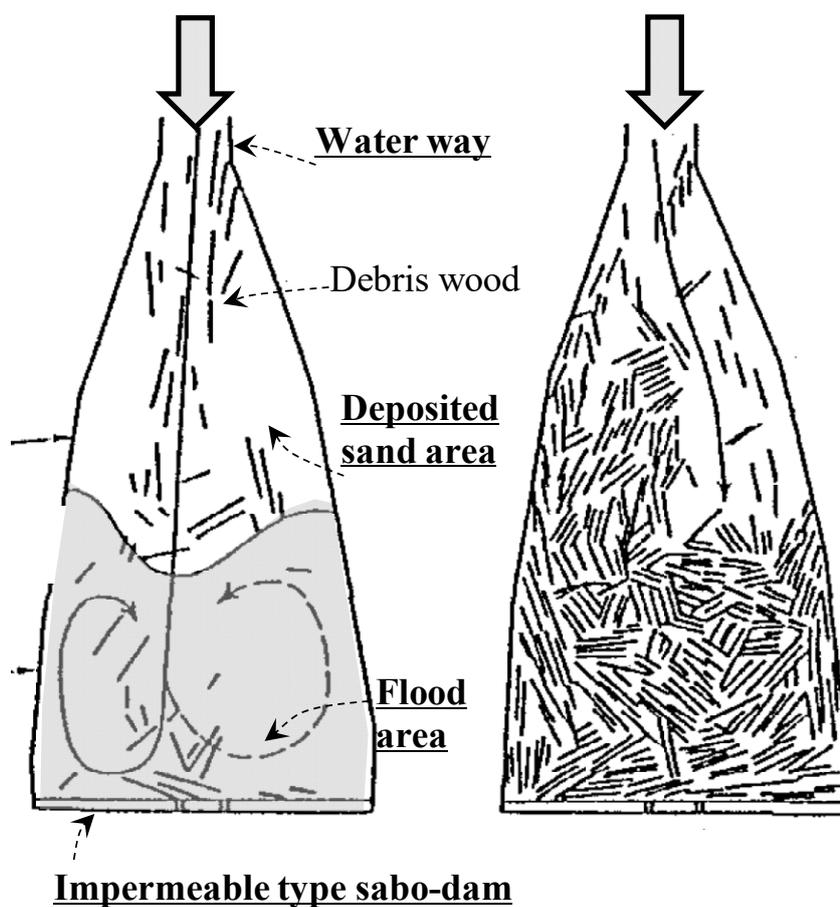


図-1.8 これまでの報告による不透過型砂防堰堤（未満砂）における流木捕捉の概要平面図¹⁾

一般的に、貯水池の湛水部内における土砂と流木の堆積や挙動に関して、上流から水とともに流下してきた土砂と流木は湛水面（水面勾配の変化位置）付近でそれぞれ分離する現象が知られている。これより、土砂はデルタ堆砂¹⁰⁾により湛水部内の上流域で堆積するとともに、流水と一緒に分離した流木は不透過型砂防堰堤（壁体）の直上流で発生する背水（堰上げ）による鉛直二次流の影響を受けて浮遊や回転し、多くの流木が捕捉される機構が考えられる。つまり、須川第一砂防堰堤における流木捕捉機能は、堰堤の直上流に存在した湛水部での回転等による流木挙動の影響を受けたものと考察される。

ただし、表-1.1に示されるとおり、災害前に未満砂であった不透過型砂防堰堤（3基）においても同様に、流木が流出してくる前においても湛水部が存在していた時間が存在したと考えられる。しかしながら、須川第一砂防堰堤以外の砂防堰堤（表-1.1）の堆砂域（土中部含む）には流木が殆ど捕捉されていなかったことより、更なる整理が必要である。

1. 3 流木捕捉状況の違いに基づく流木発生機構

一般的に、樹木も含めた斜面の移動（崩壊）に関して、土塊が一体となって滑動する現象（例えば、図-1.9）が知られている¹¹⁾。この要因の一つとして、土塊内部のせん断抵抗等による影響が考えられ、樹木の根系が土塊内部におけるせん断抵抗力に影響（図-1.10）を与えることが報告^{12),13)}されている。そこで、不透過型砂防堰堤の流木捕捉機構や流木の発生機構に関して、更に考察を加えるものとする。

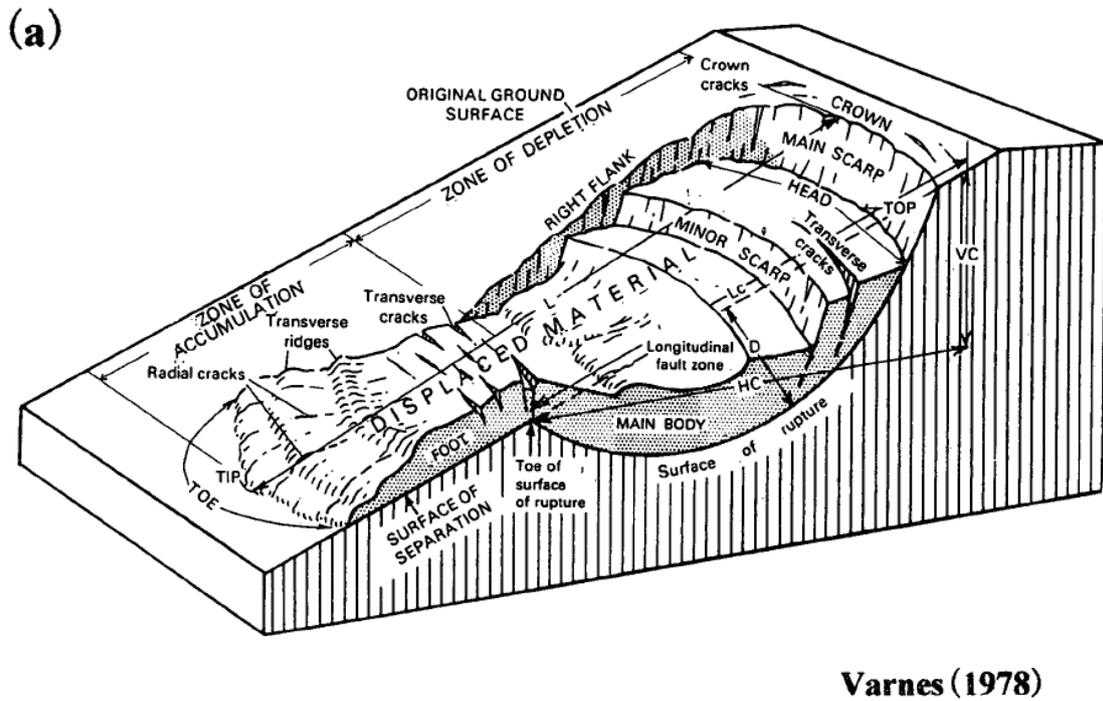


図-1.9 一般的な地すべり地等における斜面土塊の移動¹¹⁾

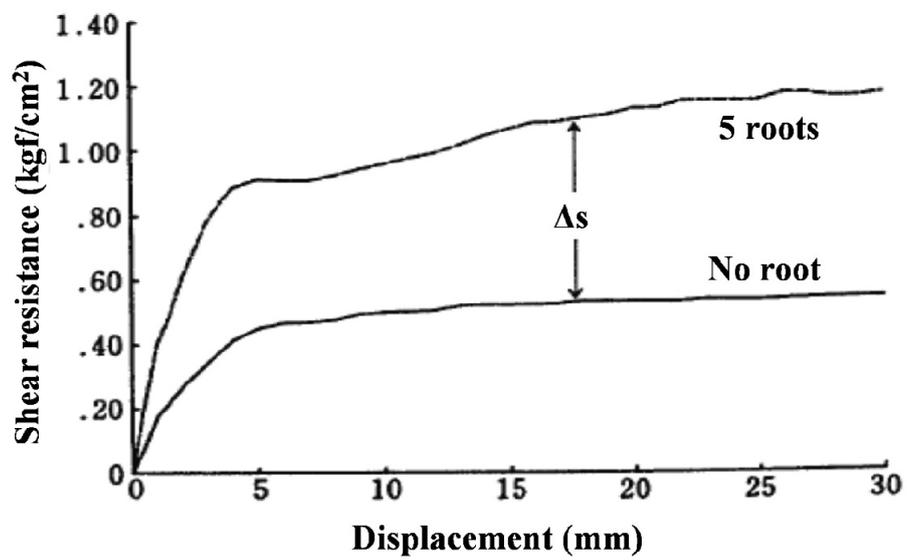


図-1.10 根系の有無によるせん断抵抗力の違い¹²⁾

今回の現地状況より、流木の発生源となっている斜面は深さ1~2m以深で多く崩壊しており、これらの斜面土塊は樹木の根系によるせん断抵抗力の影響を受けて、流木と土塊はそれぞれ分離せずにそのまま下方へ滑動¹⁾することが一般的に考えられる(図-1.11)。さらに、これらの土塊の土壌成分が流水の影響により先行して段階的に侵食されて下流に流出し、最終的に、流木が土塊から分離して下流へ流出する過程が考察される(図-1.12)。

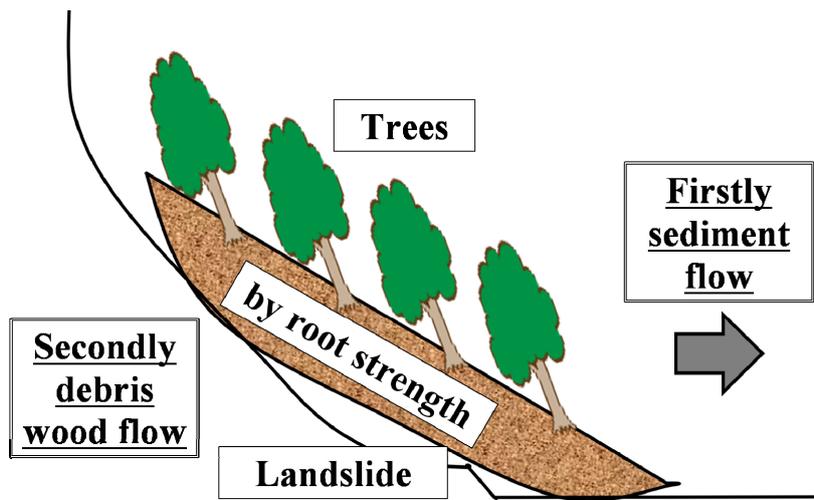


図-1.11 斜面崩壊時における土砂及び流木の挙動に関する概要図(斜面崩壊時)

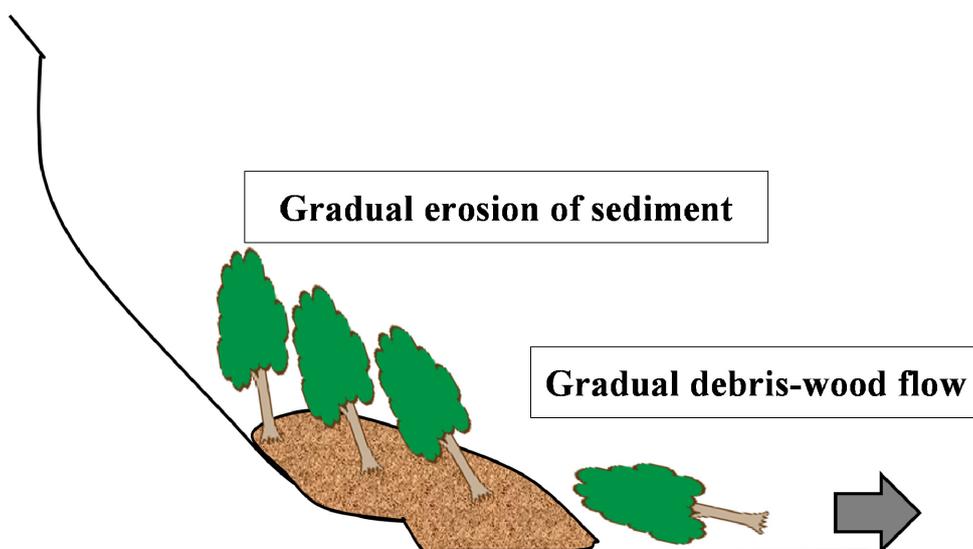


図-1.12 斜面崩壊後における土砂及び流木の流出過程に関する概要図

次に、設計マニュアル³⁾において示されている土石流の流下に伴って発生する溪岸における流木の流出機構に関する概要を以降に示す。なお、図-1.11に示される斜面の移動・崩壊と同様に、一般的に溪床上の土石流通過（図-1.13）に伴う河床侵食（河床低下）が発生する（図-1.14）。

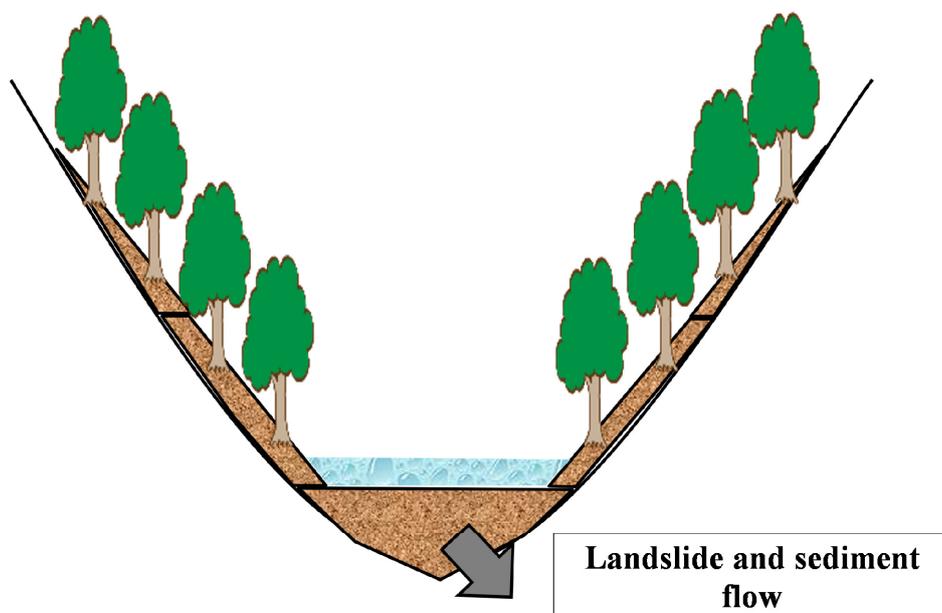


図-1.13 溪岸における土砂及び流木流出過程に関する概要図 その1（土石流通過時）

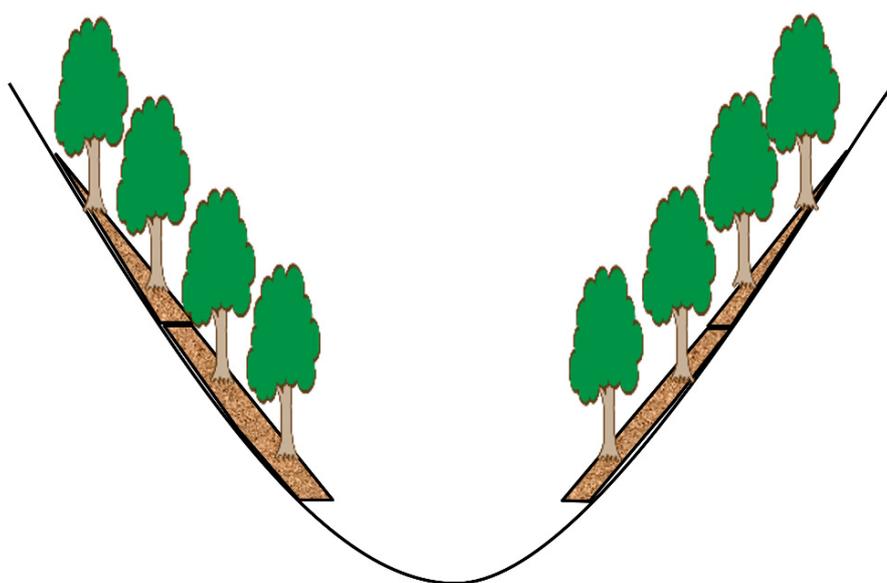


図-1.14 溪岸における土砂及び流木流出過程に関する概要図 その2（河床低下時）

さらに，河床低下により溪岸斜面が不安定となり，樹木とともに斜面土塊が溪床に移動し，その後の流水による根系周辺における土壌の侵食や分離（離脱）により土砂が先行して下流へ流出し，最終的に，単体化した流木が下流へ流出する過程が考察される（図-1.15）。

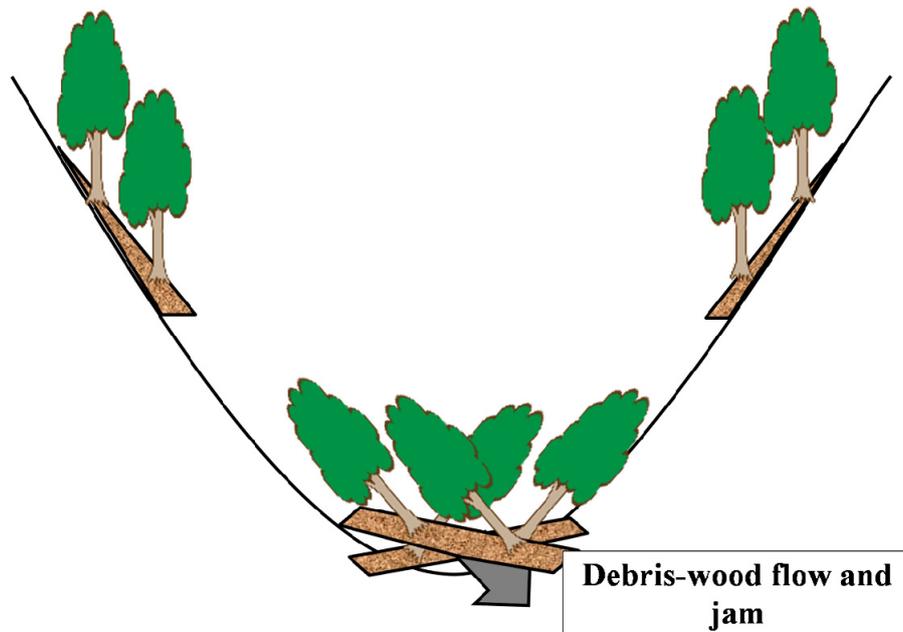


図-1.15 溪岸における土砂及び流木流出過程に関する概要図 その3
(溪岸崩壊及び流木流出時)

表-1.1に示される流木捕捉の違いに関する更なる整理として、これらの土砂や流木の生産過程や発生時期の違いより、図-1.16に示すとおり、上流域の不透過型砂防堰堤が流木の流下前に先行して流出した土砂により既に満砂となり、その後流下してきた多量の流木はこれらの満砂になった不透過型砂防堰堤上部をそのまま通過（図-1.7）したことが、須川第一砂防堰堤以外の不透過型砂防堰堤において流木を捕捉しなかった要因の一つとして考察される。これらより、土砂と流木が同時に発生しないことが考えられるため、今後、設計者は様々な流木の発生過程について配慮する必要性が示された。

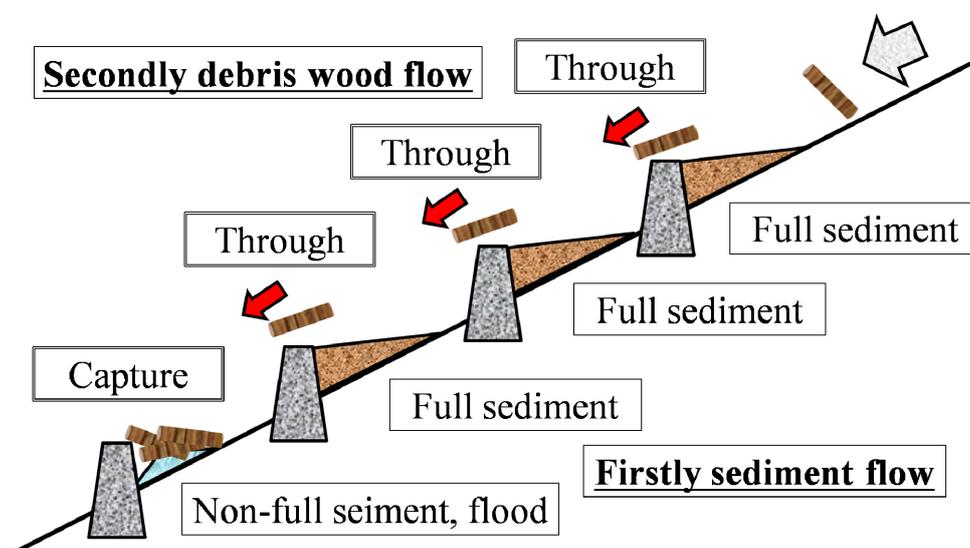


図-1.16 妙見川上流域（須川第一砂防堰堤）における砂防堰堤群の土砂及び流木捕捉過程に関する概要図

1. 4 まとめ

今後の効果的な流木対策推進のために、九州北部豪雨災害において発生した流木流出に関して、既設不透過型砂防堰堤における流木等の捕捉状況や施設周辺の痕跡等より、不透過型砂防堰堤における流木の捕捉機能や流木の流出・発生機構（土砂と流木の発生過程等）について考察した。

本章で得られた成果を、以下に要約する。

- 1) 九州北部豪雨災害における流木捕捉事例や既往研究より、流木の流下時に不透過型砂防堰堤の直上流部において湛水部が存在する場合、これらの流れの影響を受けた流木の挙動や回転運動等の影響より、不透過型砂防堰堤においても顕著に流木を捕捉できることが明らかとなった。
- 2) 調査対象とした不透過型砂防堰堤（5施設）における土砂や流木の捕捉状況、既往知見（例えば、根系の緊縛力によるせん断抵抗力）より、流木は土砂と同時に発生及び流下しない可能性が示され、今後の流木対策に際して、設計担当者は流木の発生時期についても考慮する必要性が明らかとなった。

参考文献

- 1) 石川芳治：山地小溪流からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究，京都大学博士学位論文，1990.
- 2) 藤村直樹，黒岩智恵，泉山寛明，赤澤史顕，水野秀明：不透過型砂防堰堤による流木の捕捉と流出に関する実験報告書，土木研究所資料，Vol.4331, 2016.
- 3) 国土交通省 砂防部：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，国総研資料，Vol.904, 2016.
- 4) 国土交通省 砂防部：事務連絡，流木対策の実施（当面の対応），2015.
- 5) 地盤工学会：平成29年7月九州北部豪雨緊急災害報告会資料, 2017.
- 6) 鈴木健吾，篠原麻太郎，守屋博貴，二瓶泰雄，長谷部由莉，五十川周，矢野真一郎，赤松良久：平成29年九州北部豪雨による福岡県朝倉市 山の神ため池の決壊・洪水氾濫状況，土木学会論文集B1（水工学），Vol.74, No.4, pp. I_1183-1186, 2018.
- 7) 堀 俊和，泉 明良，正田大輔：平成29年7月九州北部豪雨での被災ため池に関する調査報告書，2017.
- 8) 国土交通省：【施設効果事例】須川第1砂防堰堤（福岡県朝倉市），http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_kyushu_gouu/，2017（閲覧日：平成30年12月1日）.
- 9) 国土交通省 砂防部：事務連絡，平成29年7月九州北部豪雨災害を踏まえた今後の砂防事業における流木対策，2017.
- 10) Chaishi, T., Kikuchi, T. and Maeda, S.: Accumulation of sediments in a reservoir and its countermeasures “A Case Study of SAKUMA Dam”, *Journal of Japan Society of Engineering Geology*, Vol.43, No.5, pp.316-319, 2002.
- 11) Varnes, D, J.: Slopes movement types and processes, *Landslide analysis and control, special reports*, No.176, pp.11-33, 1978.
- 12) 阿部和時：森林の持つ斜面崩壊防止機能，日本緑化工学会誌，Vol.31, No.2, pp.330-337, 1991.
- 13) 阿部和時：根系の引抜き抵抗力によるせん断補強強度の推定，日本緑化工学会誌，Vol.16, No.4, pp.37-45, 1991.

第 2 章 不透過型砂防堰堤における流木捕捉機能の高度化

2. 1 概説

不透過型砂防堰堤における流木捕捉機能の不足が指摘¹⁾され、鋼材の併用による流木対策機能を強化する考え方が設計マニュアル等^{2), 3)}において示された(例えば, 図-2.1)。その考え方の一つは, これまで多く採用されてきた不透過型砂防堰堤の直下流における前庭部(副堰堤: 例えば, 写真-2.1)に, 鋼製部材を用いて流木を捕捉する構造³⁾である。ただし, 本構造はこれまで緩勾配区間の掃流区間における考え方を参考に流用されたものであり, 流木捕捉機構や主堰堤(本堤)からの落水等の流れの変化が流木捕捉機能に与える影響等に関して着眼的な研究は殆ど存在しない。一方, 不透過型砂防堰堤上部の天端部分に鋼製部材を併設したハイブリッド構造(例えば, 写真-2.2)が提案されている²⁾。ただし, 本構造は設計マニュアル³⁾で示されている部分透過型砂防堰堤と類似した構造である。しかしながら, これまで, 部分透過型砂防堰堤は全国的にも施工実績が少ないとともに, 流木の捕捉機構等に関しては殆ど知られていない。これらの背景より, 今後の効果的な流木対策の計画や設計に際して, これらの構造における流木の捕捉機能に関する更なる理解が急務である。

そこで, 室内の水路実験によって, 流木の回転や堆積機構を考慮した流木対策の計画や設計における留意点について考察する。

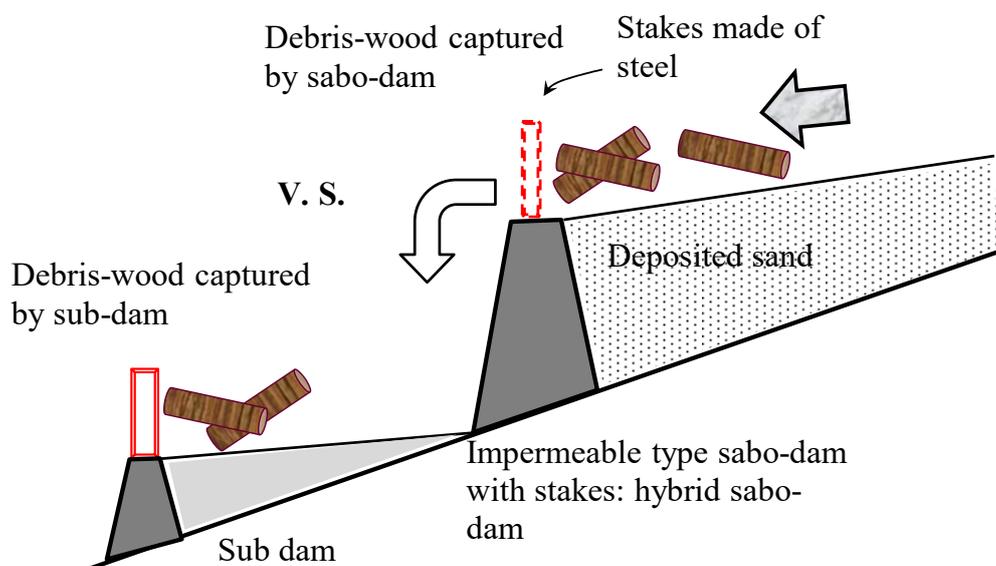


図-2.1 不透過型砂防堰堤における流木対策方針の概要^{2), 3)}



写真-2.1 不透過型砂防堰堤の前庭部（副堰堤）における一般的な流木捕捉工⁴⁾



写真-2.2 不透過型砂防堰堤と鋼製透過型部材を併設させた一般的なハイブリッド構造（部分透過型砂防堰堤）⁴⁾

2. 2 流木捕捉工の設置位置の違い等が流木捕捉機能に与える影響

不透過型砂防堰堤に鋼製部材の透過型砂防堰堤を併設させた対策施設（部分透過型砂防堰堤：写真-2.2）における流木捕捉機能に関して、これまで一般的に多く採用されてきた前庭部（副堰堤：写真-2.1）での流木捕捉工の捕捉機能との比較により、考察する。

実験に使用した副堰堤及び部分透過型砂防堰堤の水路をそれぞれ図-2.2 及び図-2.3 に示す。図-2.2 及び図-2.3 に示すとおり、実規模に対して約 1/100 程度の縮尺を想定して傾斜させた水路（長さ 3m, 幅 20cm）の上流から水 (Q_1)、流木（ただし、円柱材料、流木長 l_1 :8cm, 乾燥状態での比重:約 0.75）、土砂（珪砂）を供給し、下流部に設置した各流木捕捉工により閉塞（捕捉）された流木等の本数をそれぞれ計測している。なお、流木の投入については、手動により流木軸の投入方向が全方向（面内水平方向）に対して平均的になるように留意して一定間隔で投入するものとし、土砂については供給ホッパーにより一定量で投入している。水路の傾斜角は土石流区間での流木対策を想定し、10 度以上³⁾としている。また、実験水路長に関して、水路長を 1m から 5m まで変化させた予備実験において顕著な差が無いことを事前に確認している。実験水路床には流水を安定させるために細砂を接着している。流木捕捉鋼材（高さ h_1 ）の間隔 l_2 は、設計マニュアル³⁾ や既往研究⁵⁾ を参考に、流木長 l_1 の 2 分の 1 としている。

各不透過型砂防堰堤については、満砂時における捕捉機能に着眼して事前に堰堤背面に土砂を投入しておくものとし、その堆砂勾配は予備実験により流水により河床変動（土砂侵食、堆積）を生じさせない安定した勾配としている。実験開始後に供給する土砂量については、不透過型砂防堰堤における最大の土砂調節量を把握するため、十分に下流へ流出する量（土砂調節量の 4 倍程度）とし、流量及び投入速度は河床勾配により影響を受ける流水中の土砂濃度³⁾ が最大となる量（土砂供給箇所の河床において堆積しない最大土砂量）の一定としている。流木供給時間は土砂供給時間と同じとするとともに、流木の投入方向については偏りが生じないように配慮している。また、副堰堤の上流堰堤水通し幅 l_3 （図-2.2）は、設計マニュアル³⁾ を参考に、流木長 l_1 の 1/1.3 倍としている。

各条件の違いが流木捕捉機能に与える影響を把握するため、水路勾配 θ_1 、上部からの供給流量 Q_1 、流木供給本数 n_w 、供給土砂の種類（ただし、珪砂 1 号から 4 号までの一様砂礫または各同量による混合材料）、鋼材の杭間隔 l_2 、流木径 ϕ_2 を変化させて、それぞれの条件での各対策工における流木捕捉量 n_{dc} を比較している。なお、供給流量 Q_1 (1.0, 1.7, 2.4 l/s) に応じたフルード数は、水路勾配 θ_1 (10, 15, 20 度) の違いにより、それぞれ 1.0~1.5, 1.3~2.0, 1.6~2.2 程度であった。

実験条件を表-2.1 に示す。なお、手動での流木投入による影響を低減するため、実験は同じ条件にて 3 回実施している。

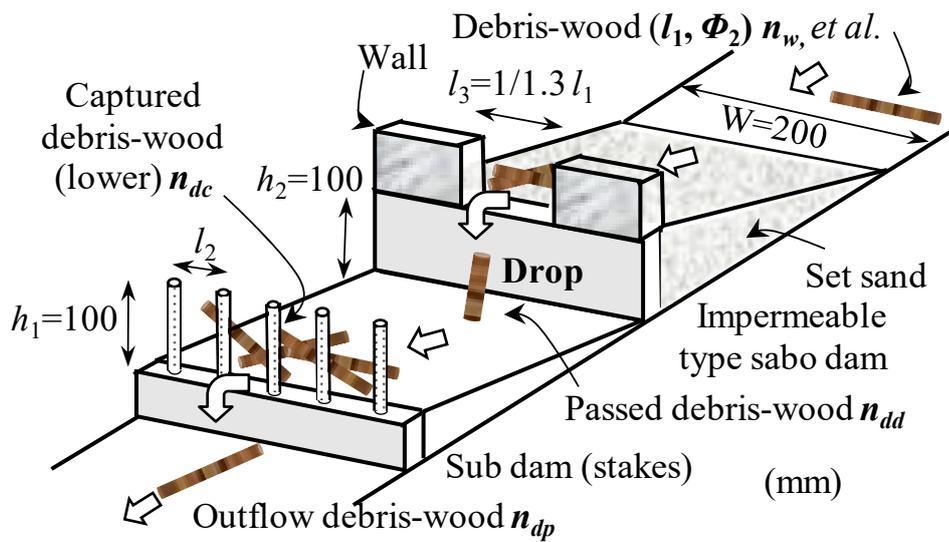


図-2.2 実験水路の概要（前庭部：副堰堤における流木捕捉工）

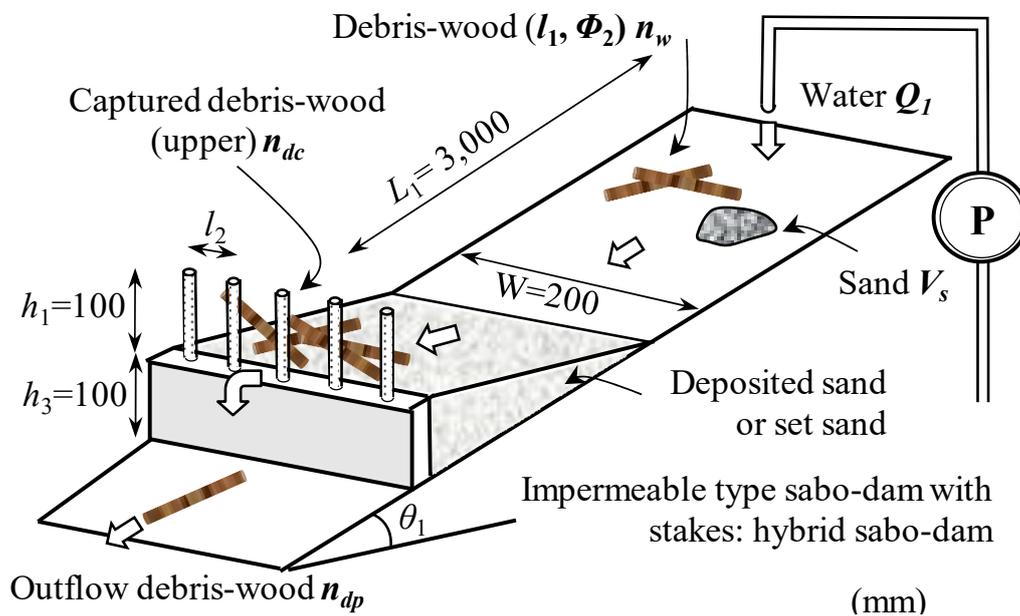


図-2.3 部分透過型砂防堰堤（本堤における流木捕捉工）の概要

表-2.1 実験条件

CASE	Dam type	θ_1 (deg.)	Q_1 (ℓ/s)	n_w	Φ_2 (mm)	l_2 (cm)
1-1	Sub dam (lower)	10	1.7	200	2	4
1-2		15				
1-3		20				
1-4		15	1.0			
1-5			2.4			
1-6			1.7	5		
1-7				100		
1-8		500				
2-1	Hybrid Sabo-dam (upper)	10	1.7	200	2	4
2-2		15				
2-3		20				
2-4		15	1.0			
2-5			2.4			
2-6			1.7	5		
2-7				2		
2-8		5				
2-9		100	2	4		
2-10		500				

※ Dam type : 流木捕捉工の設置位置

θ_1 (deg.) : 水路勾配

Q_1 (ℓ/s) : 上部からの供給水量

n_w : 流木供給本数

Φ_2 (mm) : 流木径

l_2 (cm) : 鋼材の杭間隔

実験結果における各対策工の流木捕捉効果に関して、部分透過型砂防堰堤（図-2.3）での流木捕捉率 f_{c1} 、副堰堤（図-2.2）での流木捕捉率 f_{c2} 、下流への各流木流出率 f_{dp} は、それぞれ、

$$f_{c1} = n_{dc} / n_w \quad (2-1)$$

$$f_{c2} = n_{dc} / n_{dd} \quad (2-2)$$

$$f_{dp} = n_{dp} / n_w \quad (2-3)$$

と表される。ここに、 n_{dc} は各流木対策工で捕捉された流木の本数、 n_w は流木の供給本数、 n_{dd} は本堤から下流へ落下した流木の本数、 n_{dp} は対策工を通過して下流へ流出した流木の本数（図-2.2）である。

以降に条件の違いが各流木捕捉機能に与える影響に関して考察する。

流木捕捉工の設置位置（部分透過型砂防堰堤 Upper：図-2.3，副堰堤 Lower：図-2.2）及び水路勾配 θ_1 の違いによる流木捕捉率 f_c の変化を図-2.4 に示す。なお，図中の数字（分子及び分母）は式 (2-1) から式 (2-2) までに示す観測された各流木の本数を表しているとともに，破線はその 3 回の実験結果の分散傾向を示している。なお，そのバラツキは 15%程度までであった（以降もほぼ同じ傾向）。図-2.4 に示すとおり，部分透過型砂防堰堤による流木捕捉効果 f_{c1} は，副堰堤 f_{c2} と比較して顕著に高いことが分かった（約 2 倍程度）。

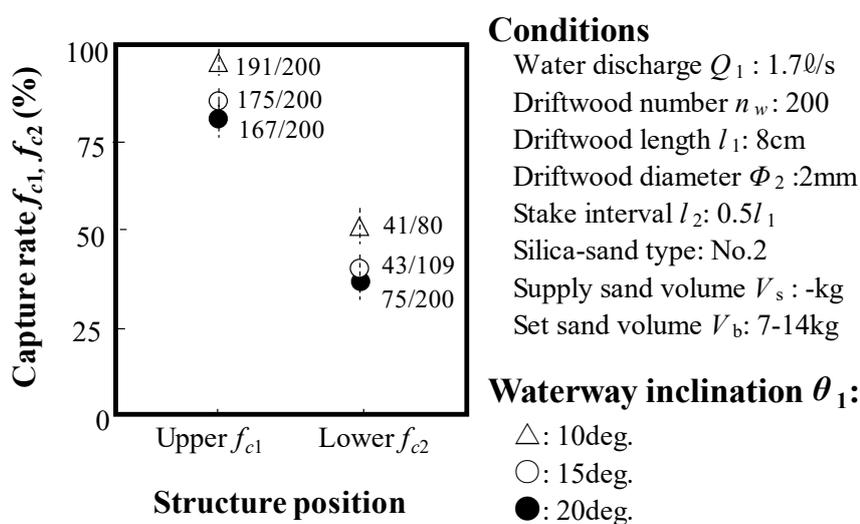


図-2.4 流木捕捉工の設置位置及び水路勾配の違いによる流木捕捉率の変化

ここで、副堰堤（図-2.2）での流木捕捉に関して、実験により観測された前庭部付近における流木の挙動及び回転の概要（平面図）を図-2.5 に示す。図-2.5 に示すとおり、本堤部の堆砂区間を経由して、上流の本堤から落差に伴って水及び流木が落下する際に顕著に流木が流れ方向（ $\theta_i \gg$ ）に回転し、そのまま下流の流木捕捉工（鉛直杭）間を通過したものと考えられる。なお、水路勾配 θ_1 （図-2.2 及び 2.3）が急になるに伴って、両構造とも流木捕捉率 f_c が低下することが分かった。これは、流速やフルード数が大きくなるに伴って、流木が不透過型砂防堰堤や対策工までの流下途中に流水方向（ $\theta_i \gg$ ）へ回転し、そのまま対策工を通過する傾向が顕著になることによるものであった。

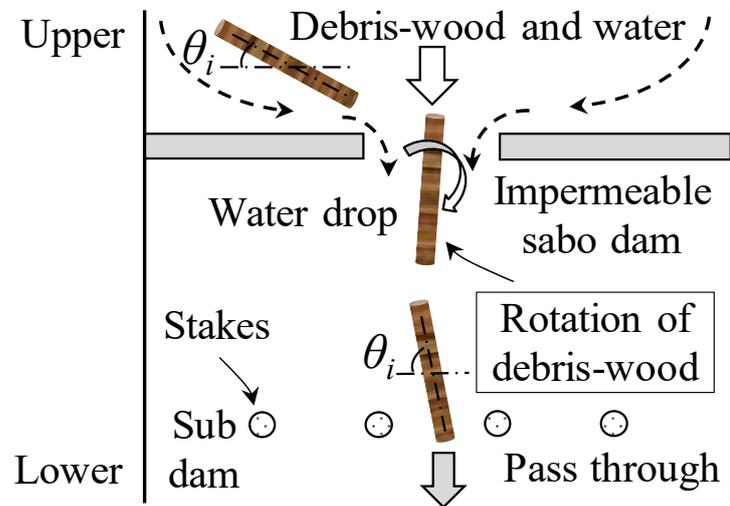


図-2.5 前庭部における流木の挙動及び回転の概要（平面図）

さらに、各流木捕捉工の設置位置及び水路勾配 θ_1 の違いによる下流への流木流出率 f_{dp} の変化を図-2.6 に示す。水路勾配 θ_1 が急になるに伴って堆砂域より上流の水路通過時に流木の軸方向が流れ方向に回転するため、最終的な下流への流木流出率 f_{dp} が顕著に大きくなったと考察される(図-2.6)。なお、供給流量 Q_1 の違いによる実験(図-2.7)においても、同様に流量増加による流速やフルード数等が大きくなるに伴って流木が流水方向へ回転することが分かった。

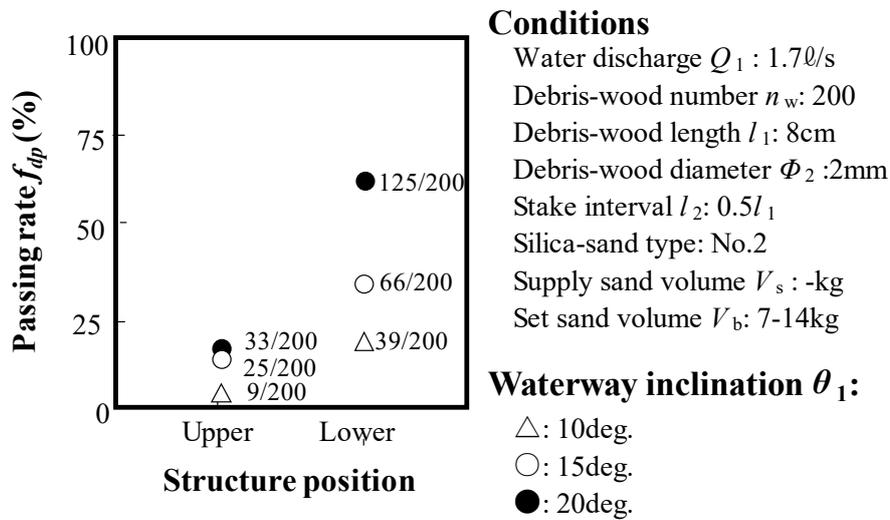


図-2.6 流木捕捉工の設置位置の違いによる流木流出率の変化

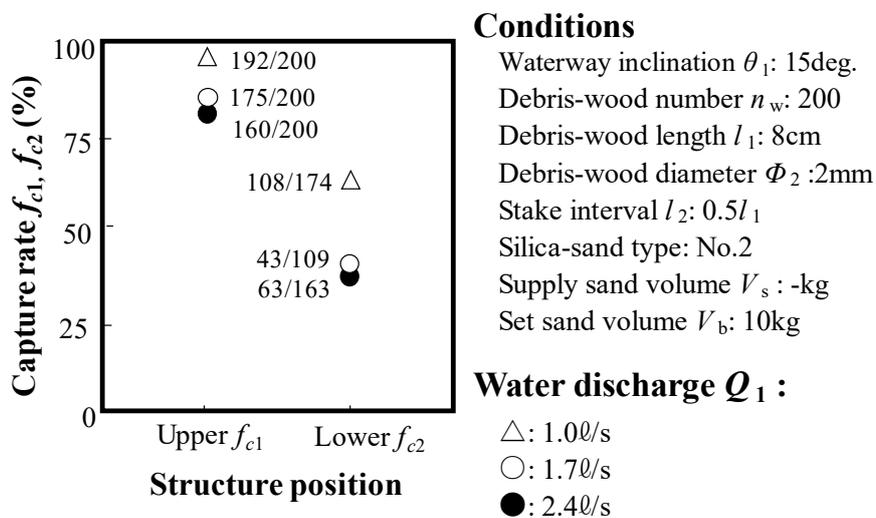


図-2.7 供給流量の違いによる流木捕捉率の変化

供給する流木径 Φ_2 の違いによる各流木捕捉率 f_c の変化を図-2.8 に示す。図-2.8 示すとおり、流木径 Φ_2 が小さい場合、流木捕捉率 f_c も流木径に応じて小さくなることが分かった。これは、流木径 Φ_2 (流木の体積) が小さくなるに伴って水の流れの変化に敏感に反応し、本堤からの落水時において顕著に流木が回転してしまうことによるものであった。

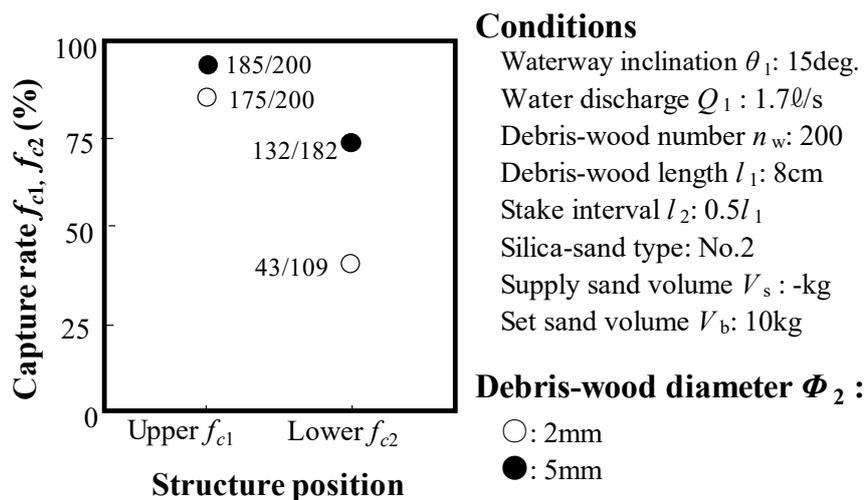


図-2.8 流木径の違いによる流木捕捉率の変化

一方、副堰堤における鋼材（杭）間隔 l_2 の違いによる流木捕捉率 f_c の変化を図-2.9 に示す。図-2.9 に示すとおり、流木径 Φ_2 が小さい場合、流木捕捉率は杭間隔 l_2 の違いによる影響を顕著に受けた。これは、流木の体積が小さい場合、前述と同様に、落差急流部において流木が流れ方向へ顕著に回転したことによるものであった。

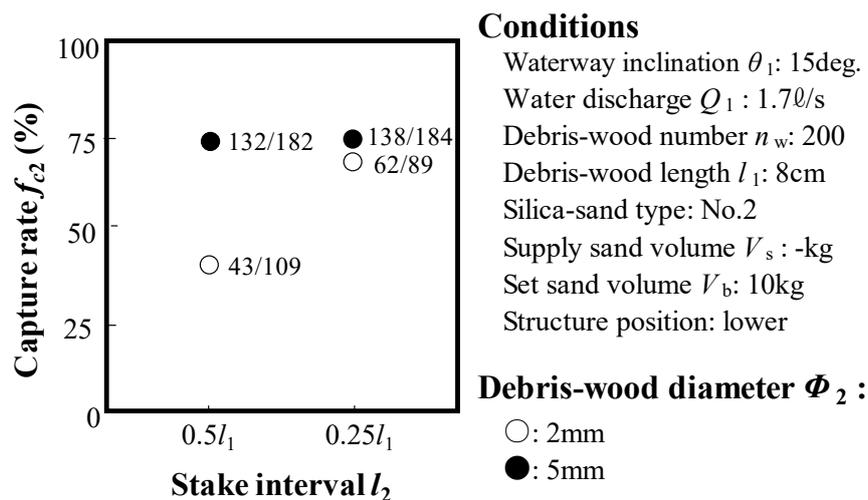


図-2.9 流木捕捉工の杭間隔の違いによる流木捕捉率の変化（下流前庭部）

最後に、一般的な実現象を参考に最大と考えられる流木本数までにおける流木供給本数 n_w の違いによる各流木捕捉率 f_c の変化を図-2.10 に示す。図-2.10 に示すとおり、流木供給本数 n_w が増えるに伴って、流木捕捉率 f_c が大きくなることが分かった（特に、500 本）。これは、先行の流木が杭部において捕捉されるに伴って、その後続により流下する流木の閉塞率が高くなることによるものであった。

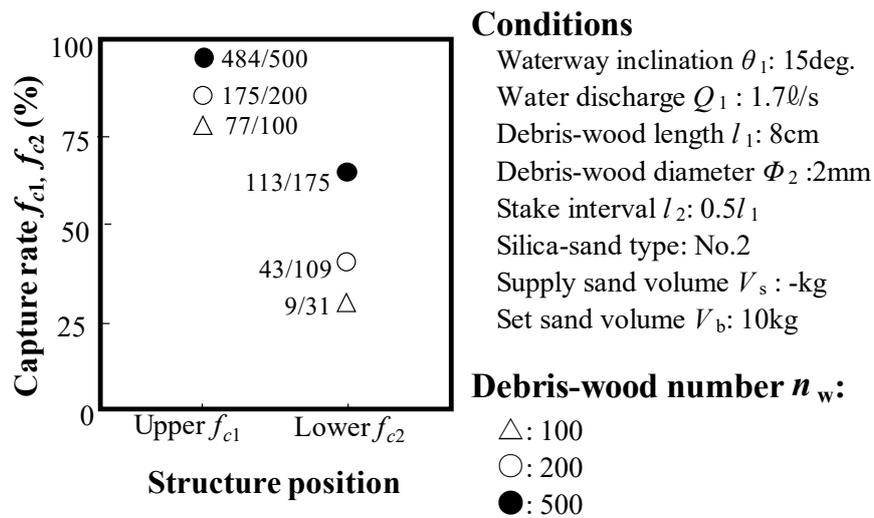


図-2.10 流木供給量の違いによる流木捕捉率の変化

2. 3 部分透過型砂防堰堤における流木捕捉機能

近年，土石流対策の更なる高度化を目的に，不透過型砂防堰堤における除石管理（未満砂状態に確保するための除石管理）の必要性³⁾や，従来までの土石流発生時における土砂調節効果の確実性について指摘されている．そこで，除石に関して一般的に有利で，これまで捕捉機能について殆ど議論されてこなかった部分透過型砂防堰堤（不透過型砂防堰堤に流木捕捉工を付加させたハイブリッド構造：図-2.3）に関して，除石管理有（未満砂状態での捕捉）と除石管理無（満砂状態での捕捉）との違いによる，部分透過型砂防堰堤における各流木捕捉効果の変化等について考察する．

実験に使用した部分透過型砂防堰堤の水路は，同様の水路（図-2.3）としている．なお，実験条件についても同様に，水路勾配 θ_1 ，上部からの供給流量 Q_1 ，流木供給本数 n_w ，供給土砂の種類（ただし，珪砂1号から4号までの一様砂礫または各同量による混合材料），流木径 ϕ_2 を変化させて，それぞれの条件における流木捕捉量 n_{dc} を比較している．また，これまで元河床勾配 θ_1 により推定されていた不透過型砂防堰堤における土石流発生時の土砂堆積勾配 θ_d ³⁾（土砂調節時の計画堆砂勾配：河床勾配 θ_1 の 2/3）に関して，給砂条件の違いによる影響についても比較している．最後に，流木の形状（枝付き：写真-2.3）や投入条件（群集状体での投入）の違いによる流木捕捉効果の変化について把握している．

実験条件を表-2.2 に示す．なお，手動での流木投入による影響を低減するため，実験は同じ条件にて3回実施している．

表-2.2 実験条件

CASE	Managed type	θ_1 (deg.)	Φ_2 (mm)	n_w	Q_1 (ℓ/s)		
3-1	Managed dam	15	3.0	100	1.7		
3-2		10					
3-3		20					
4-1	Unmanaged	15	4.0	100	1.7		
4-2			3.0				
4-3			1.0				
4-4			2.5				
4-5		10	4.0				
4-6			3.0				
4-7			1.0				
4-8			2.5				
4-9		20	4.0				
4-10			3.0				
4-11			1.0				
4-12			2.5				
4-13		15	3.0			200	1.0
4-14						500	
4-15						200	1.7
4-16						500	
4-17						200	2.4
4-18						500	

※ Managed type : 除石管理の有無

θ_1 (deg.) : 水路勾配

Φ_2 (mm) : 流木径

n_w : 流木供給本数

Q_1 (ℓ/s) : 上部からの供給水量



写真-2.3 枝付き流木

部分透過型砂防堰堤（図-2.3）における除石管理の有無（除石有: Managed dam, 除石無: Unmanaged dam）の違いによる流木流出率 f_{dp} : 式 (2-3) の変化を図-2.11 に示す。図-2.11 に示すとおり、除石有の場合における流木流出率 f_{dp} は除石無に比べて低かった。実験によると、除石有の場合、初期段階での流木は不透過構造である堰堤直上流背面において、鉛直流等の影響を受けて各方向に回転しながら捕捉工を通過せずに浮遊して流動（図-1.8）し、その後、段階的に湛水域において上流から進行する堆砂デルタに取り込まれていくことが分かった（図-2.12）。一方、除石管理無において水路勾配が急な場合、流れ方向へ回転した流木はそのまま流木対策工の杭間を通過することが分かった。これより、同様に、流木流出率 f_{dp} は流れの変化に伴う流木の回転による影響を受けているものと考えられる。

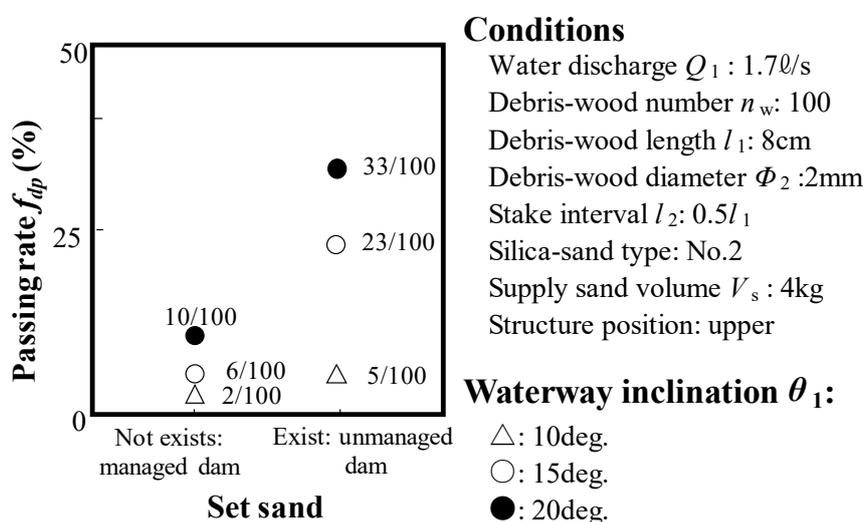


図-2.11 除石管理の有無（満砂または未満砂）の違いによる流木流出率の変化（ただし、部分透過型砂防堰堤の場合）

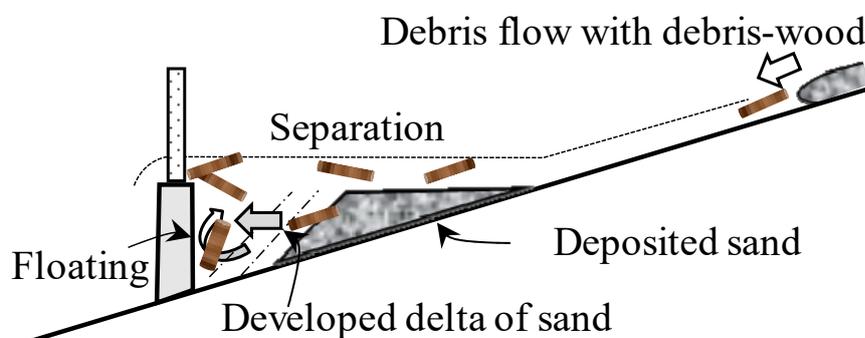


図-2.12 除石管理有（未満砂）における流木及び土砂捕捉の概要

部分透過型砂防堰堤の除石管理無（満砂）における鋼材（杭）による捕捉（a：図-2.13）及び土砂堆積（Deposited sand）に取り込まれる流木（b）による流木捕捉率 f_c の違いを図-2.14 に示す。図-2.14 に示すとおり，除石管理無の場合において捕捉された流木の殆どは杭による捕捉（a）であり，一方，土砂調節内で取り込まれた流木（b）は全体の約 2%程度であった。ここで，流木と土砂との流動に関して，除石管理無（図-2.13）及び除石管理有（図-2.12）ともに，流木と土砂の比重の違いによる影響を受けたものと考察され，それぞれ土砂と流木とが分離して挙動することが分かった。なお，堆砂域の勾配変化点（図-2.13）を中心に土砂の堆積が開始するとともに，同地点付近より流木が土砂と分離し，そのまま下流へ流下することが明らかとなった。

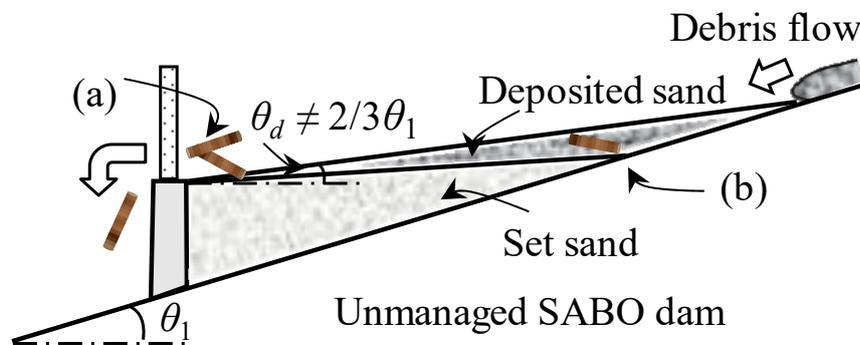


図-2.13 除石管理無（満砂）における土砂調節時の堆砂概要

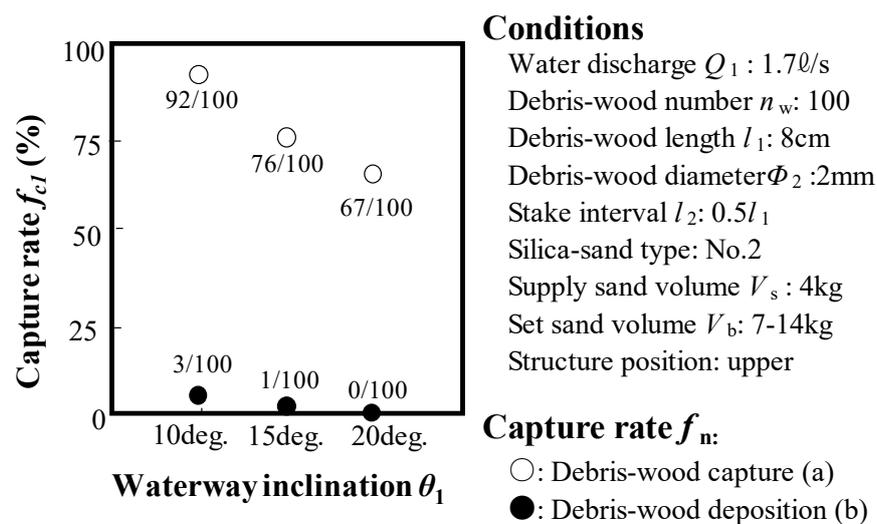


図-2.14 水路勾配の違いによる流木捕捉率等の変化（除石管理無）

一般的に、供給する土砂の粒径の違いが堆砂勾配に影響を与えることが考えられるため、給砂条件（珪砂の種類）の違いによる部分透過型砂防堰堤の除石管理無（満砂）の場合での土石流発生時における土砂堆積勾配 θ_d （図-2.13）の変化を図-2.15 に示す。図-2.15 に示すとおり、堆砂勾配 θ_d は水路勾配 θ_1 だけでなく、給砂条件（粒径）の違いにも影響を受けることが分かった。さらに、水路勾配 θ_1 との関係について、単一な珪砂の場合、これまでの知見（河床勾配のみを用いて部分透過型砂防堰堤の堆砂域における計画堆砂勾配 θ_d を設定）³⁾ だけでは決定されないことが分かった。

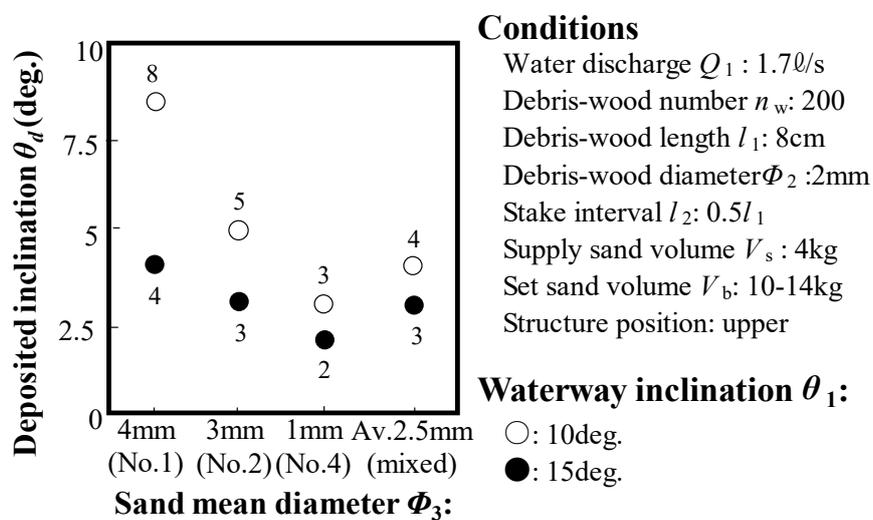


図-2.15 供給砂形状（珪砂の種類）の違いによる堆砂勾配の変化（除石管理無）

部分透過型砂防堰堤の除石管理無における流木量 n_w の違いによる流木捕捉高の変化を図-2.16 に示すとともに、流木捕捉工における流木捕捉機構の概要を図-2.17 に示す。ただし、流木捕捉高は、最大流木捕捉高 $h_{d\ max}$ と堆砂域における水深 h_w との割合で示している（図-2.17）。図-2.16 に示すとおり、供給流木量 n_w や流量 Q_1 の違いによる流木捕捉高（比）の変化は殆ど確認されなかった。なお、最大流木捕捉高 $h_{d\ max}$ は、捕捉された範囲全体において、水深 h_w の約 1.0 から 1.2 倍程度までであった（図-2.17）。これは、捕捉された流木の堆積間における透水性が高く、捕捉された流木の上部を越流することがなかったため、水深程度 h_w 付近までしか流木は捕捉されなかったことによるものであった。

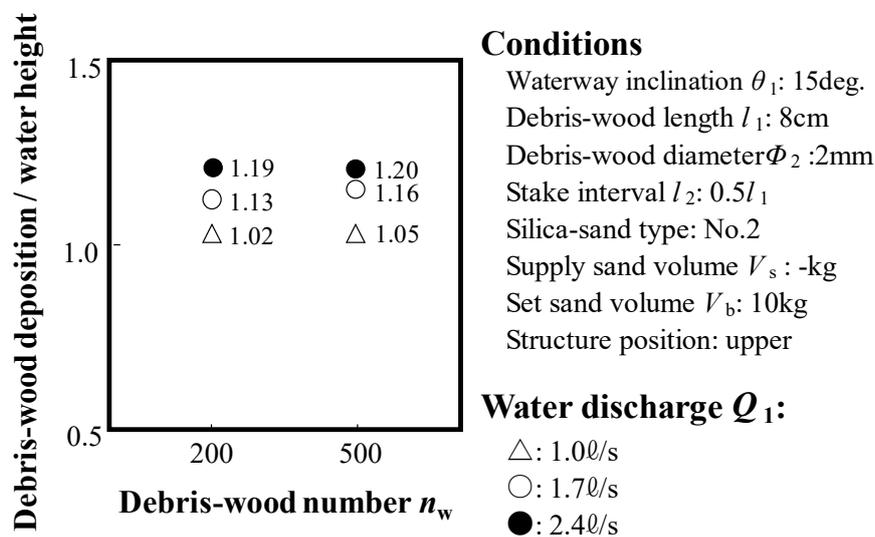


図-2.16 流木量の違いによる流木堆砂高の変化

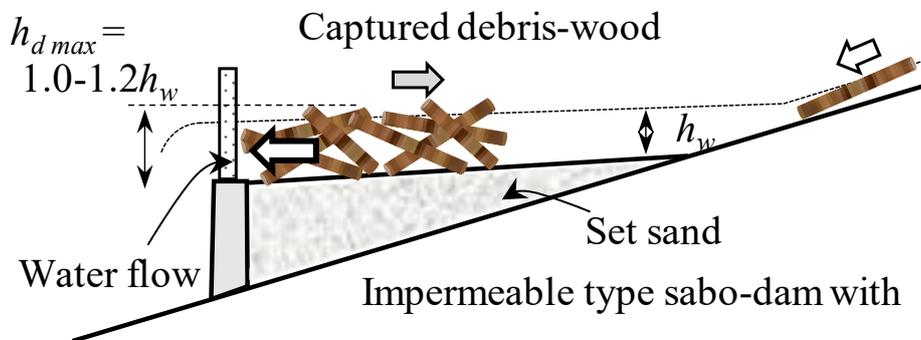


図-2.17 流木捕捉工における流木捕捉機構の概要（除石管理無）

部分透過型砂防堰堤の除石管理無における流木量の違いによる杭での流木捕捉本数 (a: 図-2.13), 土砂堆積内の流木捕捉本数 (b) 及び土砂調節量 (ただし, 土砂調節量 f_{ds} : Sand deposition/実験開始後からの土砂供給量 V_s) の変化を図-2.18 にそれぞれ示す. 図-2.18 に示すとおり, 流木の捕捉量 f_{cl} (n_{dc}) が増えるに伴って, 土砂調節量が顕著に増加している. これは, 流木堆積間を通過する水の流速が流木との摩擦の影響により低減し, 土砂が流木堆積間に捕捉されて堆積 (閉塞) するため, 流木量に応じて土砂調節量が増加したことによるものであった.

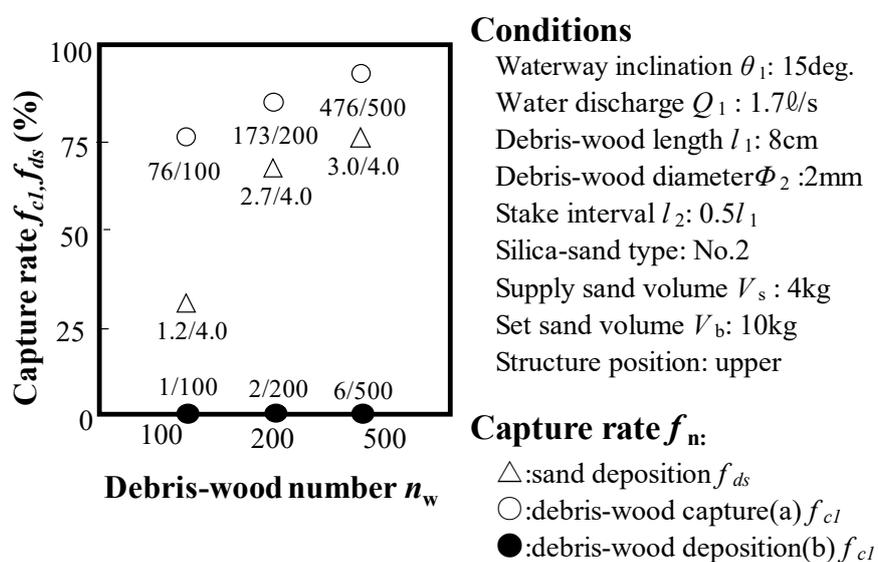


図-2.18 流木量の違いによる流木捕捉率及び土砂調節率の変化 (除石管理無)

最後に、流木の形状（枝付き流木：写真-2.3）や投入条件（群集状体での投入）の違いによる流木捕捉率 f_{cl} の変化を図-2.19 に示す。図-2.19 に示すとおり、枝付き流木や群集状体での供給における流木捕捉率（閉塞率） f_c は一般的に閉塞されやすい形状であることが知られており、本実験においても顕著な差は存在していないが、同様の傾向を得られている。

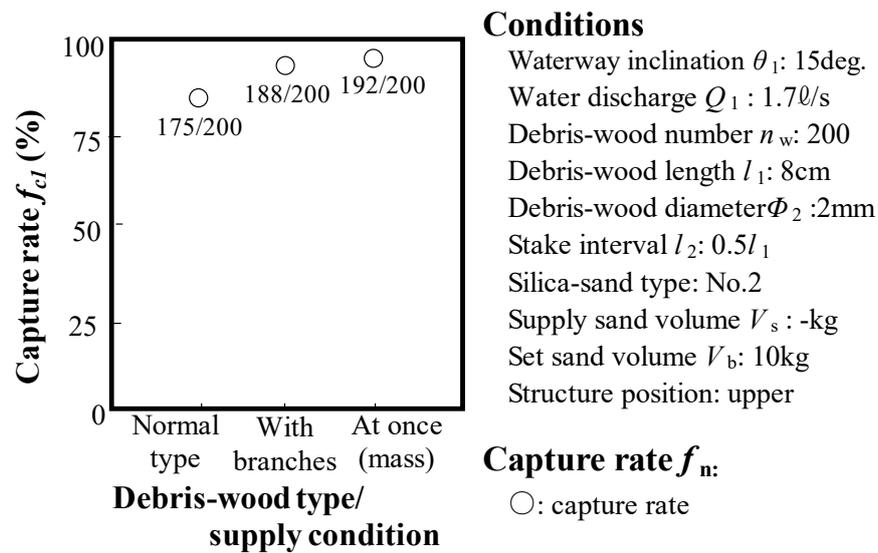


図-2.19 流木の形状及び供給方法の違いによる流木捕捉率の変化

2. 4 前庭部における流木捕捉機能の高度化

前述までも示すとおり，国土交通省より全国における砂防施設の管理者に対して，既設の砂防堰堤を有効に活用した流木対策の実施⁶⁾（例えば，流木の捕捉効果を高めるために不透過型砂防堰堤を透過型砂防堰堤や部分透過型砂防堰堤に改良，前庭保護工における流木捕捉工の設置等）について示された（**図-2.1**）．ただし，不透過型砂防堰堤の透過型砂防堰堤等への改良工事に際しては，堰堤上流部に堆砂している多量の土砂除去を目的とした掘削工事が必要となり，一般的に大規模な施工となる．一方，本堤における大規模な改良工事や，日常的な維持管理による下流からのアクセスでの流木除去が可能な効率の観点から，本堤直下流の前庭保護工（副堰堤：**写真-2.1**）における流木捕捉工による対策が望まれる．ただし，**図-2.5**に示されるとおり，不透過型砂防堰堤（本堤部）の水通しを流木が過通する際，流木が水平面内の流れ直角方向（ $\theta_i = 0^\circ$ ）から流れ方向（ $\theta_i = 90^\circ$ ）に回転するため，副堰堤に設置された流木捕捉杭の間をそのまま通過してしまうことが懸念され，更なる流木捕捉機能の高度化（工夫）が望まれる．

一般的に，砂防堰堤における捕捉等に関して，流木は土砂と比較して比重が一般的に小さいため，流水中の流木は流れの変化による影響を顕著に受けるとともに，水面付近での水平面内の回転を伴った移動が考えられる．また，不透過型砂防堰堤や前庭部を通過する水の流れは一般的に複雑であると考えられ，これらの流れの特性を考慮した効果的な流木対策工の立案（高度化）が望まれる．しかしながら，不透過型砂防堰堤の前庭部における流木捕捉効果の高度化に関する提案や流木の回転機構に着眼した流木捕捉に関する研究は殆ど存在しない．

そこで，前節に引き続いて，砂防堰堤（本堤部及び前庭部）における流木の回転移動に着眼し，既設不透過型砂防堰堤を活用した流木捕捉工における機能の高度化（流木の回転を制御させる新たな構造：越流堰）について提案する．さらに，本実験結果により有効な越流堰構造について示すとともに，流れの影響を受けた流木の回転機構について考察を加えるものとする．

実験に使用した不透過型砂防堰堤（本堤部）及びその前庭部（副堰堤等）に流木捕捉工（捕捉杭）を設置した水路を図-2.20 に示す。図-2.20 に示すとおり，前節までと同様に，実規模に対して約 1/100 程度の縮尺を想定して傾斜させた水路（長さ 3m，幅 20cm）の上流から水（ Q_1 ），流木（ただし，円形材料，流木長 l_1 ：8cm，乾燥状態での比重：約 0.75，手動により投入：時間あたりの投入本数が概ね 1 本/0.5 秒）を供給し，本堤部の水通し部，前庭部（副堰堤）に設置した流木捕捉工（捕捉杭：高さ h_1 10cm，径 Φ_1 5mm）によりそれぞれ閉塞（捕捉）された流木等の本数を計測している。流木の投入については，流木の供給条件（初期の投入方向）の違いが捕捉率に影響を与えないように配慮するため，流木の方向を流れの水平面内において全方向にほぼ同じ割合となるように留意して投入している。水路の傾斜角は土石流区間（10 度以上）を基本とするとともに，本堤部の水通し幅（ l_3 ：図-2.20）は設計マニュアル³⁾を参考に流木長 l_1 の 1/1.3 倍としている。本堤部の落差高（堰堤高） h_2 は一般的な堰堤高程度までとし，流木捕捉杭（高さ h_1 ）の間隔（ l_2 ）は，設計マニュアル³⁾を参考に流木長（ l_1 ）の 1/2 を標準としている。

本堤部の不透過型砂防堰堤については，満砂時における流木捕捉の場合に着眼して堰堤背面に土砂（珪砂 2 号： $d \approx 3\text{mm}$ ）を事前に投入しておくものとし，予備実験を参考に流水時に比較的安定していると思われる堆砂勾配（河床変動が生じない勾配）としている。なお，予備実験において，流水への土砂混入，流木への枝の付加，水路長（1m から 5m 間）ならびに流木投入速度（1 本/1 秒，1 本/0.5 秒）の違いが実験結果に顕著に影響を与えないことを事前に確認している。

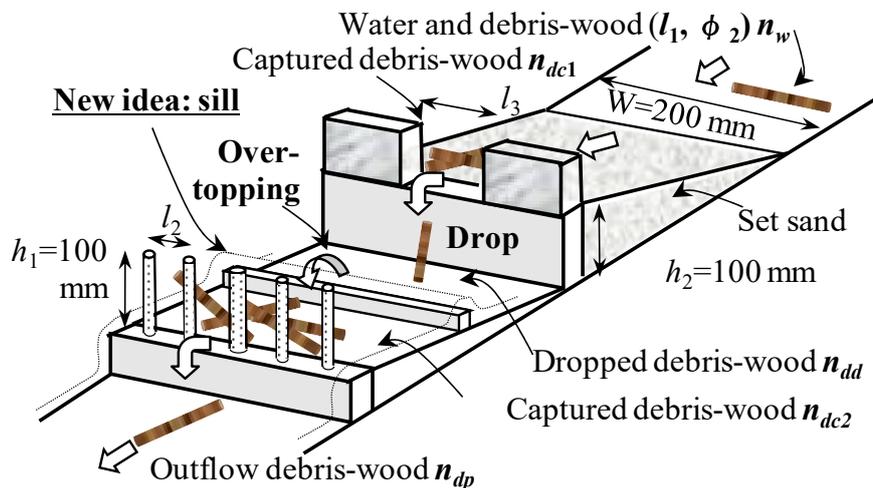


図-2.20 実験水路の概要（前庭部：副堰堤における流木捕捉工での高度化提案）

本研究において、流木の回転を制御させることにより前庭部での流木対策工における捕捉機能の向上を目的に、前庭部内に新たに越流堰の併設を提案する。なお、提案する越流堰は本堤からの落水部（水衝部）より下流に併設するものとし、有効な越流堰の構造や配置を把握するため、それぞれ設計条件を変化させている（図-2.21）。図-2.21 に示すとおり、断面形状に関しては四角部材と半円形との違いを比較するとともに、捕捉杭や越流堰との配置をそれぞれ変化させている。また、越流堰の高さ（ h_3 ）は、前庭部における水深（約 1cm）程度を基本に、それぞれ変化させている。

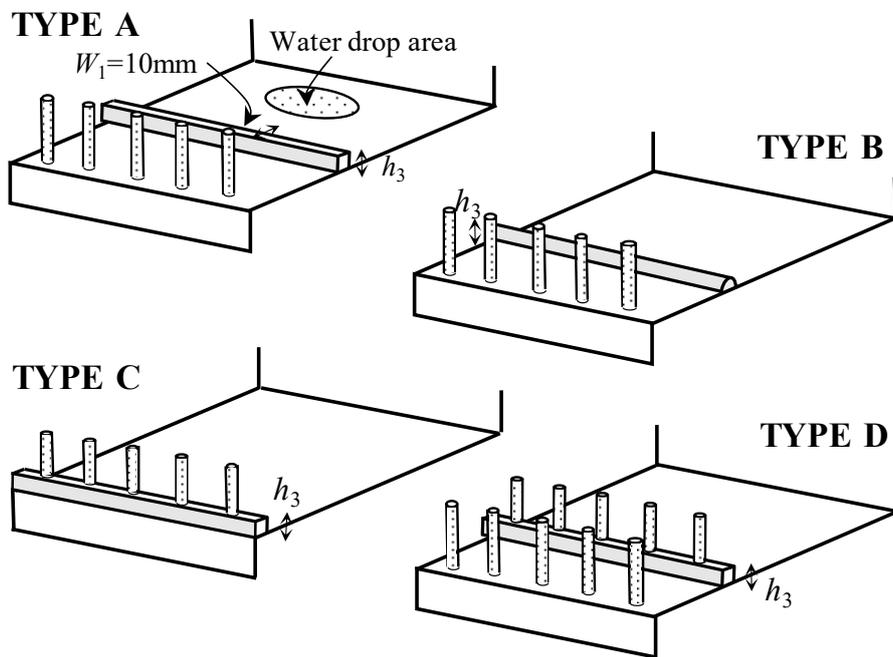


図-2.21 提案する越流堰と流木捕捉杭との配置形式

各条件の違いが流木の回転や捕捉機能に与える影響を把握するため、水路勾配 θ_1 、上部からの供給流量 Q_1 、流木供給本数 n_w 、鋼材の杭間隔 l_2 、流木径 ϕ_2 を変化させて、それぞれの条件での流木捕捉量 n_{dc} を比較している。一方、供給流量 Q_1 (0.5, 1.0, 1.7ℓ/s) に対して、フルード数は、水路勾配 θ_1 (5, 10, 15 度) に応じて、それぞれ、0.8~1.2, 0.8~1.5, 1.3~1.8 程度であった。

実験条件を表-2.3 に示す。なお、手動での流木投入による影響を低減するため、実験は同じ条件にて3回実施している。

実験結果における各流木捕捉効果に関して、本堤部における水通し部での捕捉率 f_{c1} 、前庭部における流木捕捉杭による流木捕捉率 f_{c2} 、下流への流木流出率 f_{dp} は、

$$f_{c1} = n_{dc1} / n_w \quad (2-4)$$

$$f_{c2} = n_{dc2} / n_{dd} \quad (2-5)$$

$$f_{dp} = n_{dp} / n_w \quad (2-6)$$

と表される。ここに、 n_{dc1} は水通し部で捕捉された流木の本数、 n_w は流木の供給本数、 n_{dc2} は前庭部における捕捉杭で捕捉された流木の本数、 n_{dd} は水通しを通過した流木の本数、 n_{dp} は捕捉杭を通過して下流へ流出（落下）した流木の本数である（図-2.20）。以降に条件の違いが各流木捕捉機能に与える影響や、提案する越流堰の構造に関して考察する。

表-2.3 実験条件

CASE	Sill type	Φ_2 (mm)	θ_1 (deg.)	n_w	h_3 (cm)	l_2 (cm)	Q_1 (ℓ/s)
5-1	— (Nothing)	1	10	200	—	—	
5-2		2					
5-3		5					
5-4	A	1	10	100	1.0	4	1.0
5-5			5				
5-6							
5-7							
5-8							
5-9			B				
5-10			C				
5-11			D				
5-12	A	1	15	200	0.5	2	
5-13					2.0		
5-14					1.0		
5-15							
5-16	—	10			—	—	0.5
5-17	(Nothing)						1.7

※ Sill type : 越流堰の構造形式 (図-2.21)

Φ_2 (mm) : 流木径

θ_1 (deg.) : 水路勾配

n_w : 流木供給本数

h_3 (cm) : 越流堰の高さ (図-2.21)

l_2 (cm) : 鋼材の杭間隔

Q_1 (ℓ/s) : 上部からの供給水量

越流堰の提案に先立って、先ず、従来の流木捕捉工（越流堰の設置前）における流木径 Φ_2 の違いによる捕捉杭による捕捉率 f_{c2} の変化を図-2.22 に示す。なお、図中の数字（分子及び分母）は式 (2-4) から (2-6) までに示す観測された各流木の本数を表している。図-2.22 に示すとおり、流木径 Φ_2 が細くなるに伴って、捕捉率 f_{c2} が顕著に低下することが分かった。これは、流木径 Φ_2 が細かい場合、流れ（例えば、流速の変化や乱流）の影響を強く受け、水通しからの落水に伴って、多くの流木が流れ方向に向かって回転し、そのまま捕捉杭の間を通過してしまったことによるものであった（図-2.5）。なお、流量の違いによる捕捉杭による捕捉率 f_{c2} の変化を図-2.23 に示す。図-2.23 に示されるとおり、レイノルズ数 Re の違いによる捕捉率 f_{c2} の顕著な違いは確認されなかった。

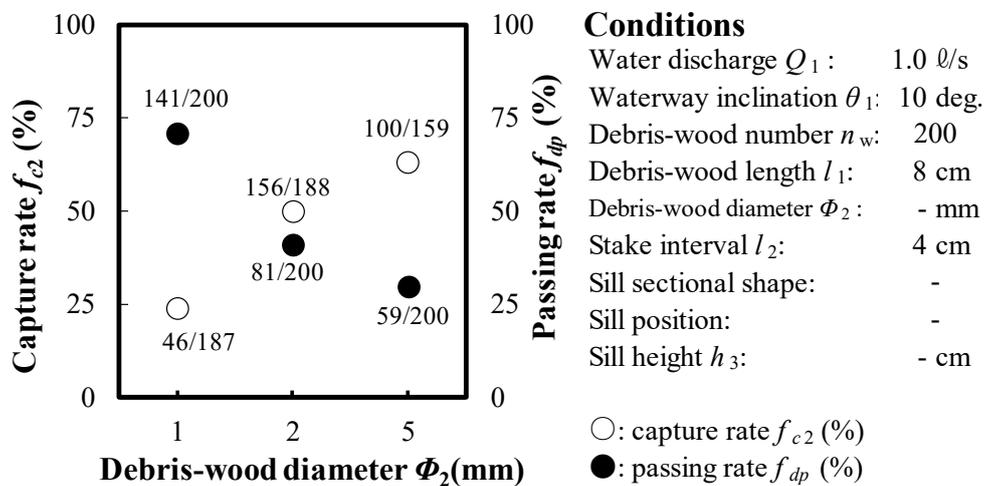


図-2.22 流木径の違いによる流木捕捉率等の変化

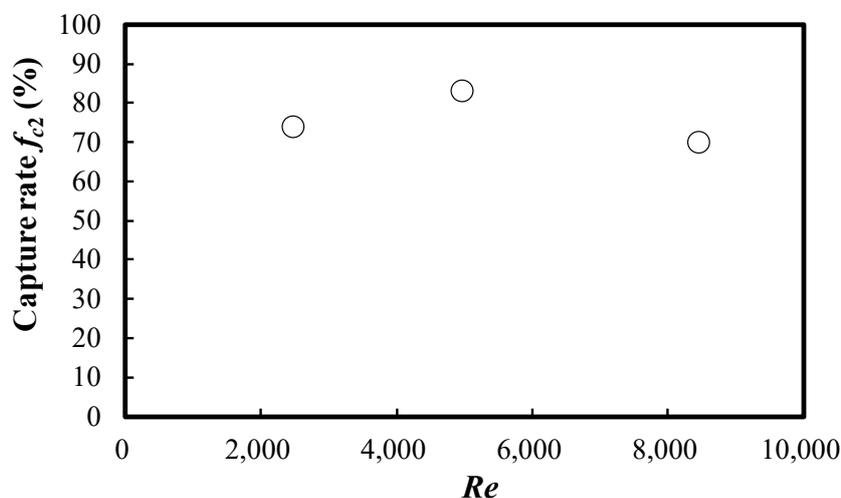


図-2.23 流量（レイノルズ数）の違いによる流木捕捉率等の変化

次に、提案する越流堰の設置有無の違いによる捕捉率 f_{c2} の変化を図-2.24 に示す。図-2.24 に示すとおり、捕捉杭に越流堰（TYPE A：図-2.21）を併用して設置した場合、捕捉杭における捕捉率 f_{c2} が顕著に改善（向上）することが分かった。

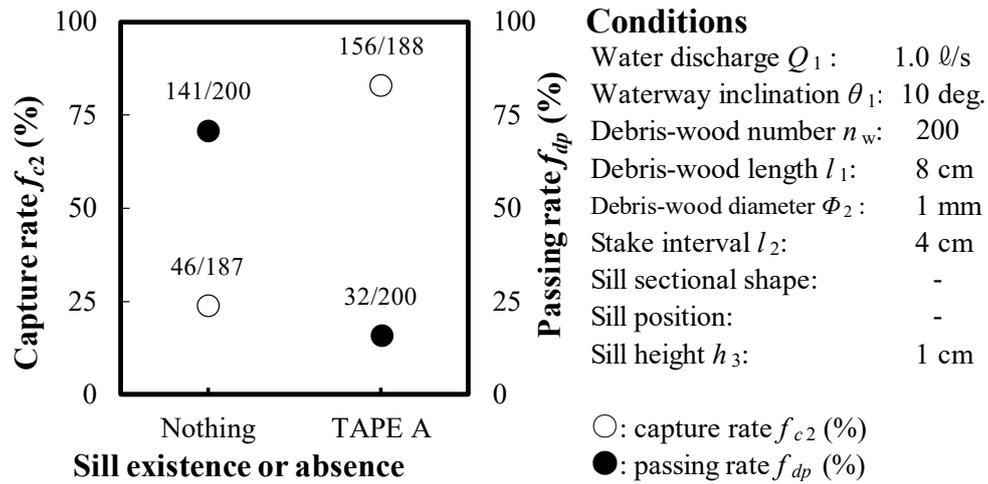


図-2.24 越流堰の設置有無の違いによる流木捕捉率等の変化

ここで、実験により得られた、本堤部の堆砂域から副堰堤に配置する流木捕捉工までにおける流木の回転挙動及び流木流出機構の概要を図-2.25 に示す。図-2.25 に示すとおり、上流の流路区間 (L_{n1}) における流れに対する流木の角度 θ_{n1} (水平面内の流れ直角方向に対する角度) は、流速 V_{n1} が定常の場合、投入時で決定された角度があまり変化せずそのまま流下した。そして、本堤部の堆砂区間 (緩勾配区間: L_{n2}) へ遷移する際、この遷移区間の上下流で発生する流速差 ($V_{n1}-V_{n2}$) の影響を受けて、流木が流れ横断方向 ($\theta_{n2}<<$) に回転したものと考えられる。次に、本堤部の水通しを通過する際に、平面的な水通しを通過するための縮流や自由落水時の流速 ($V_{n3}>>$) の影響 (図-2.25) を受けて、流木は顕著に流れ方向 ($\theta_{n3}>>$) に回転した。ここで、今回提案する越流堰を設置した場合、本構造による背水の影響を受けて、流木は流れに対して越流時に横断方向 ($\theta_{n4\sim 5}<<$) に回転し、そのまま捕捉杭で閉塞した。なお、本現象は一般的な走り高跳びの跳躍方法の一つであるベリー・ロールと類似した流木の挙動であった。

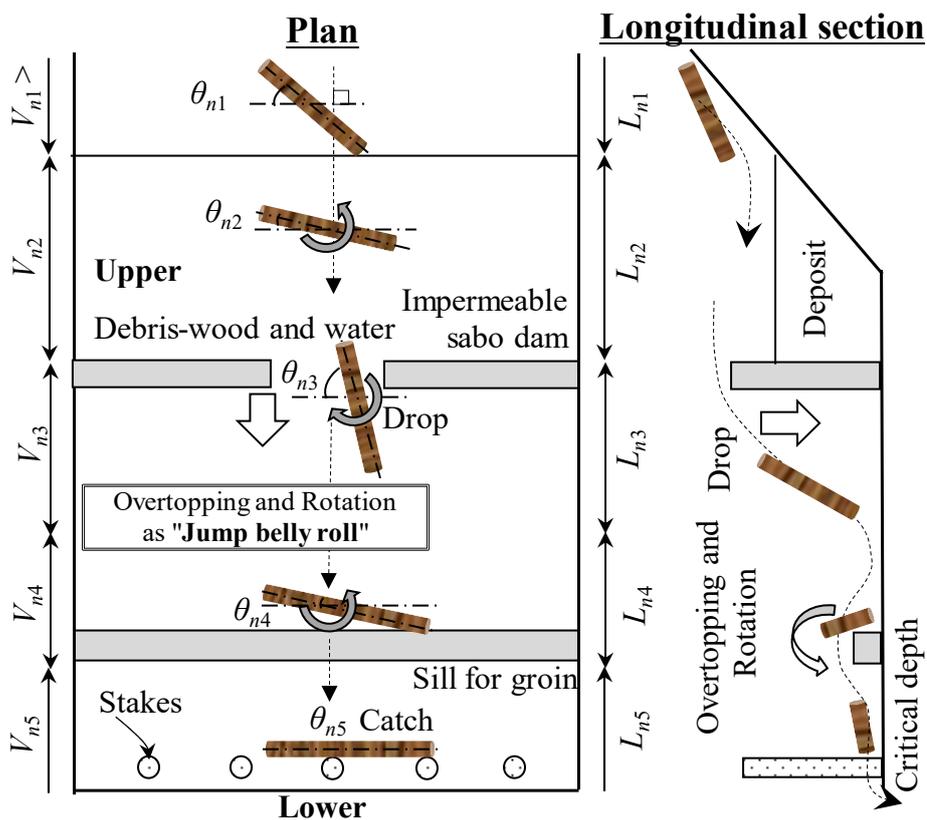


図-2.25 越流堰における流木の回転制御及び流木捕捉機構の概要

水路勾配 θ_1 の違いによる本堤部水通し部における捕捉率 f_{c1} 及び流木流出率 f_{dp} の変化を図-2.6 に示す（ただし，TYPE A）．図-2.26 に示すとおり，水路勾配が緩くなるに伴って，流木流出率 f_{dp} は低下した．特に，緩勾配の場合，水通し部における捕捉率 f_{c1} が顕著に向上した．これは，緩勾配になるに伴って L_{n1} から L_{n2} （図-2.25）への流木の遷移（通過）時間が長くなるため，流木径が細かい場合は，特に，その遷移間に多くの流木 ($\theta_{n2} \ll$) が流れに対して横断方向に回転し，結果として水通し部での捕捉率 f_{c1} が向上したものと考察される．

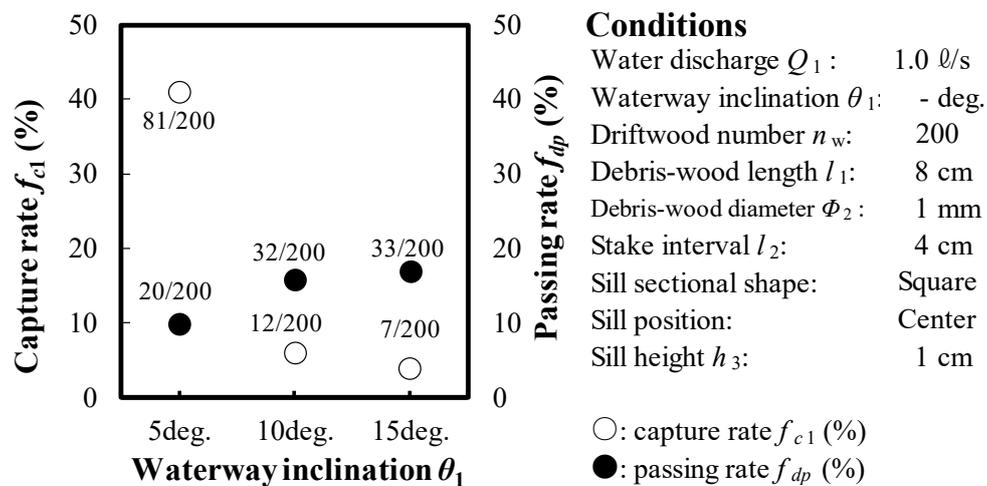


図-2.26 水路勾配の違いによる流木捕捉率等の変化

流木供給量（本数 n_w ）及び供給方法（一括又は分割投入）の違いによる捕捉率等の変化をそれぞれ図-2.27 及び図-2.28 に示す（ただし、TYPE A）．図-2.27 及び図-2.28 に示すとおり、同様に、流木本数 n_w が増加するに伴って上流の水通し部での捕捉率 f_{c1} が向上し、結果として水通し部からの流木流出率 f_{dp} が低下することが分かった．特に、一括に投入（流木が群集となって挙動）した場合は分割に投入（流木の個別流下）した場合と比べて、水通し部での捕捉率 f_{c1} が顕著に向上することが分かった．なお、前庭部における捕捉杭による捕捉率 f_{c2} については、顕著な差が確認されなかった．これは、水通し部を流木が各個に通過し、前庭部にそれぞれ到達したことによるものであった．

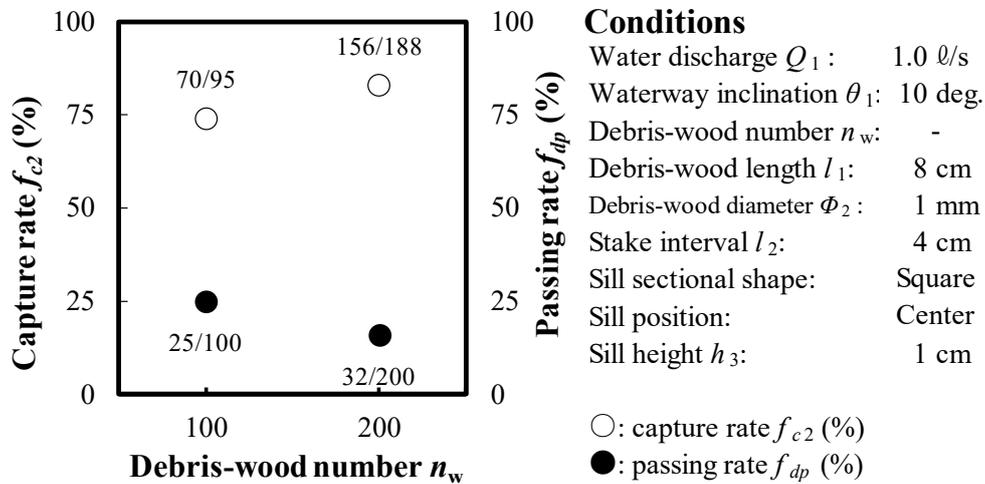


図-2.27 流木供給量の違いによる流木捕捉率等の変化

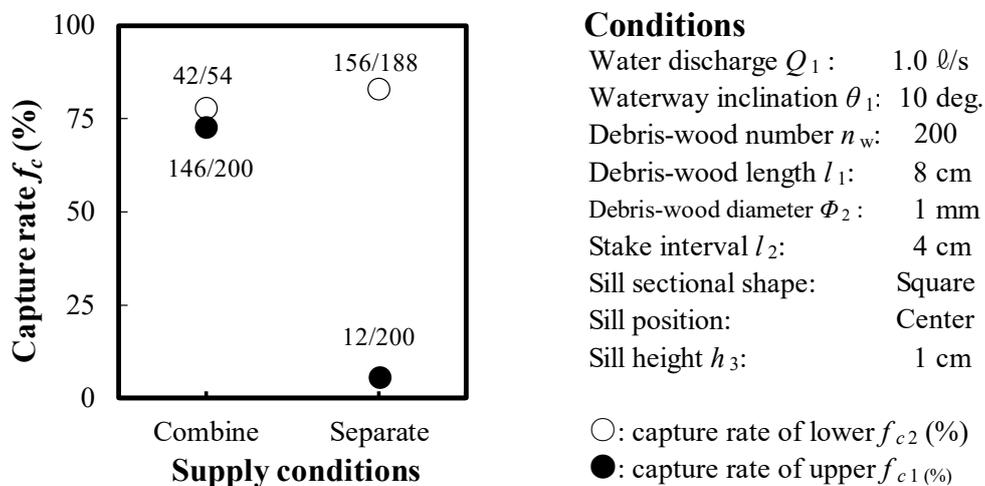


図-2.28 流木供給方法の違いによる流木捕捉率等の変化

次に、越流堰の構造に関して、越流堰の断面形状（TYPE A, B：図-2.21）の違いによる捕捉率 f_{c2} の変化をそれぞれ図-2.29 に示す。図-2.29 に示すとおり、四角の断面形状（TYPE A）は、半円形（TYPE B）と比較して捕捉率 f_{c2} に対して有効であることが分かった。これは、半円形の場合、越流堰上流における背水の影響が小さく、多くの流木が背水による流速差の影響を受けずに回転（制御）せず、そのまま堰を越流して通過したことによるものであった。

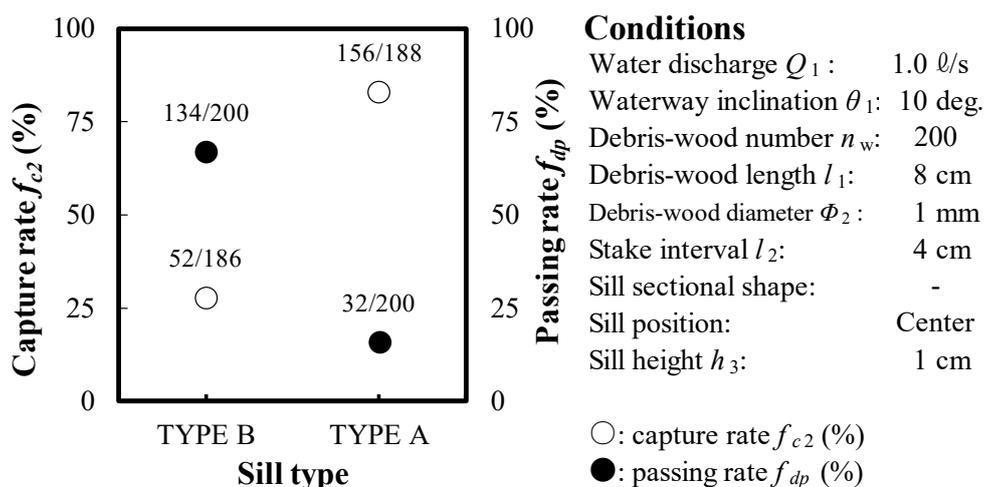


図-2.29 越流堰の断面形状の違いによる流木捕捉率等の変化

越流堰の設置位置 (TYPE A, C : 図-2.21) の違いによる捕捉率 f_{c2} の変化を図-2.30 に示す。図-2.30 に示すとおり、杭と越流堰とを同一地点において併設された複合構造 (TYPE C) の捕捉率 f_{c2} は、顕著に低いことが分かった。本実験による本複合構造における流木の捕捉及び流出の概要を図-2.31 に示す。本複合構造による捕捉過程は、最終的な捕捉率 f_{c2} の結果 (図-2.30) とは異なり、実験中において殆どの流木が捕捉杭によって一旦は停止 (捕捉) されることが分かった。しかしながら、図-2.31 に示すとおり、越流堰上流の流水は上向きの不安定な流れ (乱流) であるため、捕捉された流木が揺動し、そのまま流木が捕捉杭より離脱して流出し、最終的な捕捉率 f_{c2} はほぼ 0 であったことが明らかとなった。

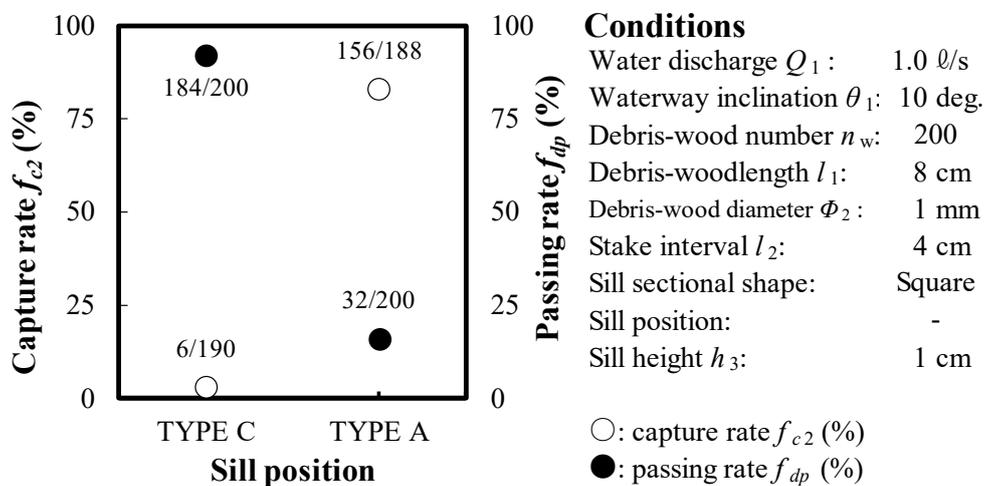


図-2.30 越流堰の設置位置の違いによる流木捕捉率等の変化

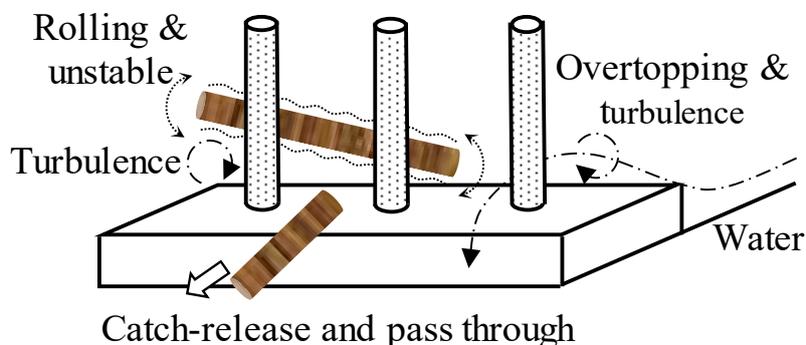


図-2.31 杭及び越流堰の複合構造における流木捕捉 (流出) の概要

ここで、応用的な複合構造（TYPE D：図-2.21）においても捕捉率は低い結果であった（図-2.32）。これは、TYPE D の上流越流堰部の捕捉杭において、一旦停止された流木が同様に鉛直上向き不安定な乱流によって同様に本捕捉杭を離脱して流出し、通過時の流木方向（ $\theta_{n4\sim5}$ ：図-2.25）がそのまま維持され、下流の捕捉杭間を通過したためである。一方、最下流における落水直上流部に設置された捕捉杭（例えば、TYPE A）周辺では限界流状態で流れが安定しており、流木の揺動（例えば、図-2.31）は殆ど見られず、捕捉効果はそのまま確保されることが分かった。

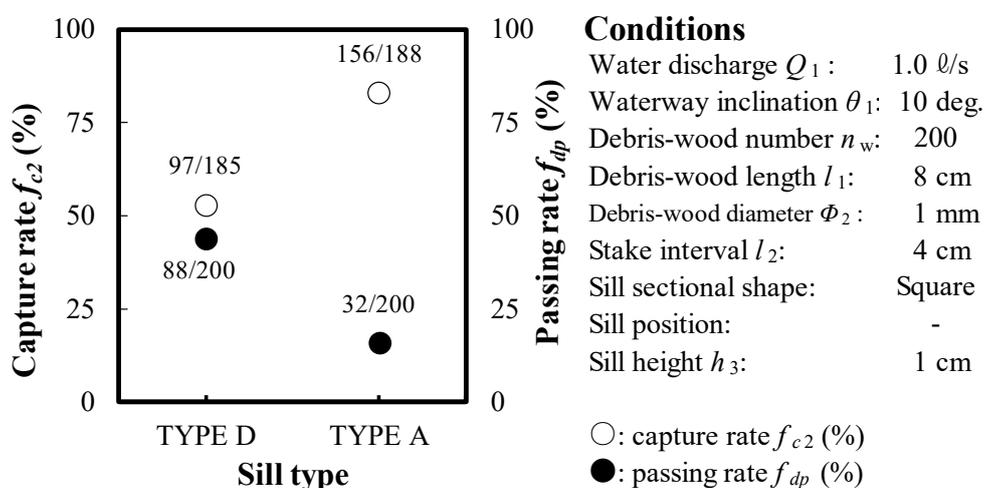


図-2.32 捕捉工の設置位置（設置数）の違いによる流木捕捉率等の変化

越流堰の高さ (h_3 : 図-2.21, TYPE A) の違いによる捕捉率 f_{c2} の変化を図-2.33 に示す。図-2.33 に示すとおり、前庭部における平均水深程度の高さ h_3 (1.0cm) が最も捕捉率 f_{c2} に対して有効であることが分かった。ただし、これらの差による影響は約 1 割程度までであった。実験によると、堰の高さが低い場合には堰上流における背水の影響が小さく、一方、堰が高い場合には、越流後の落水高が大きくなるため、本堤からの落下時に流木が流れ方向 ($\theta_{ns} \gg$: 図-2.25) に回転したことによるものと考察される。

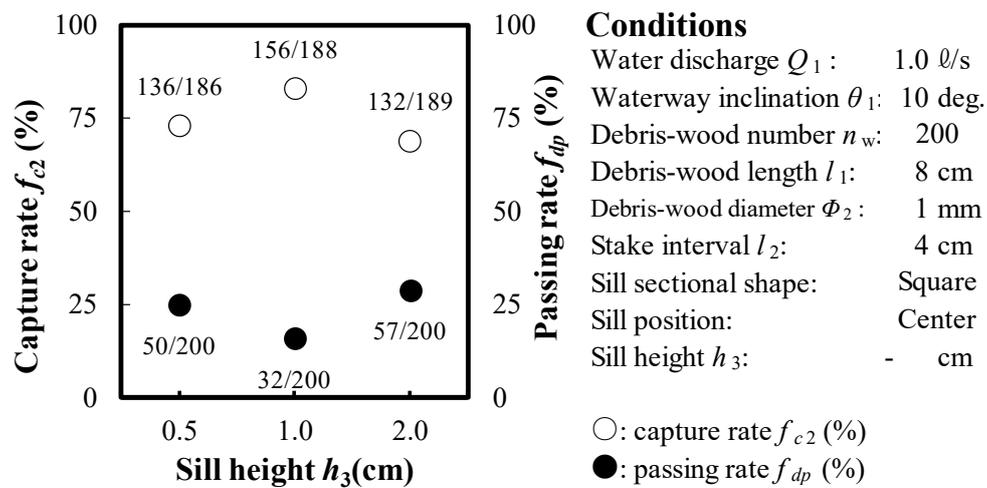


図-2.33 越流堰高さの違いによる流木捕捉率等の変化

越流堰の設置有無と捕捉杭間隔の違いとの比較による捕捉率 f_{c2} の変化を図-2.34 に示す。図-2.34 に示すとおり、杭間隔を狭く配置する対策よりも越流堰を設置した方がより捕捉効果が向上することが示された。これは、杭部での捕捉率は、その上流部において決定された流木の方向 (θ_{n4} : 図-2.25) に顕著に影響を受けるため、越流堰により流木を回転(制御)させる対策の方が捕捉率 f_{c2} において有効であることによるものであった。

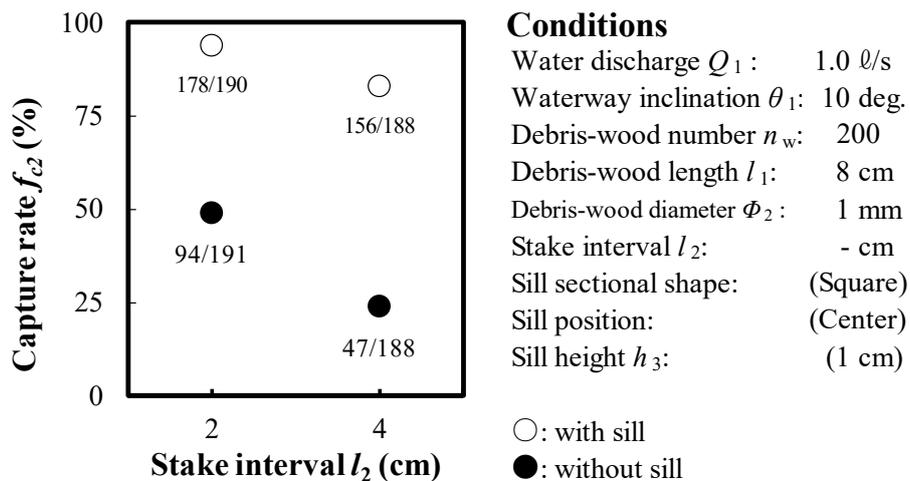


図-2.34 流木捕捉工の杭間隔の違いによる流木捕捉率の変化

最後に、これまでの実験結果を踏まえて、流水中における流木の回転に関する機構について提案する(図-2.35)。図-2.35に示すとおり、川幅が流木に対して十分に広い定常な流水中では、一部の河床変化に伴う乱流による影響等を見逃した場合、基本的に流木は回転せず(θ_{ni} はほぼ一定)に流下するものと考察される。そして、縦断勾配の変化等での上下流の流速差($V_{n-1}-V_{n+1}$)による流木の回転力 ω_n の影響を受けて流木回転が始まり、遷移区間(流速変化点 n 前後)を超えると流木の回転が終了する。これより、流木の回転には遷移区間の通過において十分な回転(移動)時間が必要であるため、流木の回転は上下流の流速差に加えて、遷移区間の通過時間と直接的に關係する上流側における流速(V_{n-1})の違いに影響を受ける。なお、提案する越流堰については、堰直上流における背水による顕著な流速の変化と、流木が堰を乗り越える際に一旦移動が遅くなる2つの要因より、結果として効果的な流木の回転制御が可能であったものと考察される。

これらの結果より、流木の捕捉機能は捕捉杭の間隔だけでなく、捕捉工直上流における流れの影響を受けた流木の水平面内の角度(θ_i)に顕著に影響を受けることが示された。

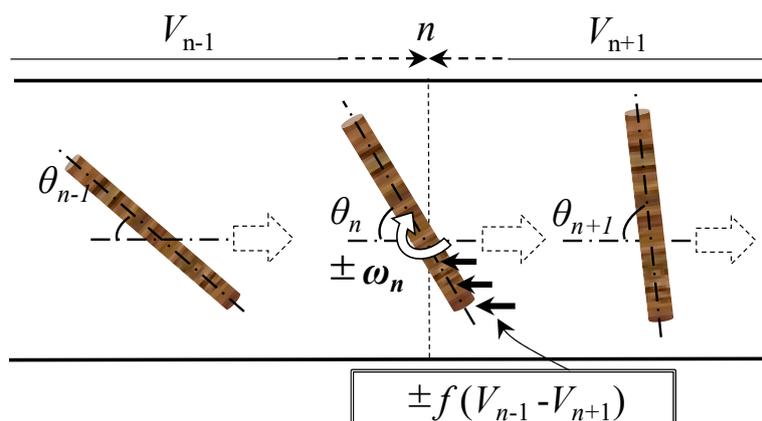


図-2.35 流水中における流木の回転機構に関する概要図

2. 5 まとめ

不透過型砂防堰堤における鋼材を用いた流木対策の機能向上を目的に、水路実験によって、流木の回転や堆積機構を考慮した流木対策の計画や設計における留意点について考察した。さらに、流木の回転に着眼した流木対策工の流木捕捉機能を向上させるための付加構造（流木を回転制御させる越流堰）について提案するとともに、流木の回転機構について考察を加えた。

本章で得られた成果を、以下に要約する。

- 1) 不透過型砂防堰堤（上部）に鋼製部材を配置した構造（例えば、部分透過型砂防堰堤）による流木捕捉効果は、従来の副堰堤（前庭部）での流木捕捉機能と比較して、高いことが分かった。この要因は、副堰堤での流木捕捉の場合、上流の本堤（水通し）からの落差に伴って水及び流木が落下する際に顕著に流木が流れ方向へ回転してしまい、そのまま副堰堤の流木捕捉工（鉛直杭）間を通過してしまうことによるものであった。
- 2) 部分透過型砂防堰堤の背面における除石管理有（未満砂）の場合は、除石管理無（満砂）の場合と比べて効果的に流木を捕捉できることが分かった。この要因は、除石管理有の場合、初期段階時の流木は堰堤（不透過部）直上流の湛水域での背水より、堰堤背面において流木は鉛直流等の影響を受けて各方向に回転しながら捕捉工を通過せずに湛水域を浮遊流動し、その後、段階的に湛水域において上流から進行する堆砂デルタによって取り込まれていくことによるものであった。
- 3) 部分透過型砂防堰堤（ただし、除石管理無）における流木捕提高（堆積高）は、堆砂域の水深程度（水深の約1.0倍から1.2倍程度）までであることが分かった。
- 4) 砂防堰堤（本堤部、前庭部）を通過する流木は、これらの通過する間において顕著に流れ（例えば、上流の流速や上下流の流速差等）の影響に応じて回転しながら流下することが分かった。
- 5) 従前の前提部における流木捕捉工（捕捉杭）に加えて、その直上流に越流堰（ただし、四角断面）を併設した場合、顕著に捕捉杭部での捕捉効果が向上することが分かった。
- 6) 杭部で一旦捕捉された流木は、越流時における鉛直上向きの流れ（乱流）の影響を受けて揺動し、最終的に本捕捉杭を離脱して下流へ流出する危険性が示された。

参考文献

- 1) 藤村直樹, 黒岩智恵, 泉山寛明, 赤澤史顕, 水野秀明: 不透過型砂防堰堤による流木の捕捉と流出に関する実験報告書, 土木研究所資料, Vol.4331, 2016.
- 2) 国土交通省 砂防部: 事務連絡, 流木対策の実施(当面の対応), 2015.
- 3) 国土交通省 砂防部: 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説, 国総研資料, Vol.904, 2016.
- 4) 建設コンサルタンツ協会: 鋼製砂防構造物設計事例集, 2018.
- 5) 石川芳治, 水山高久, 福澤 誠: 土石流に伴う流木の発生及び流下機構, 砂防学会誌, Vol.42, No.3, pp.4-10, 1989.
- 6) 国土交通省 砂防部: 事務連絡, 平成29年7月九州北部豪雨災害を踏まえた今後の砂防事業における流木対策, 2017.

第3章 コンクリート・スリット堰堤の流木捕捉機能とその高度化

3.1 概説

掃流区間等の緩勾配区間においてこれまで整備されてきたコンクリート・スリット堰堤（例えば、図-3.1）¹⁾の流木処理効果（流木対策機能）については、明確にされていない。そこで、今後の緩勾配区間における既施設も活用した効果的な流木対策計画の立案を目的に、室内の実験により、コンクリート・スリット堰堤における流木処理機能を明確にする。



図-3.1 掃流区間における一般的なコンクリート・スリット堰堤

3. 2 開口条件の違い等が流木捕捉機能に与える影響

実験に使用したコンクリート・スリット堰堤を設けた水路を図-3.2 及び図-3.3 に示す。図-3.2 及び図-3.3 に示すとおり、実規模に対して約 1/100 程度の縮尺を想定して傾斜させた水路（長さ 2m，幅 40cm）の上流から水（ q_{in} ），流木（ただし，円形材料， $\Phi_w=1\sim 10\text{mm}$ ），流木長（ $l_w = 3\sim 8\text{cm}$ ），乾燥状態での比重：約 0.75，手動により投入：時間あたりの投入本数が概ね 1 本/0.5 秒）を供給し，スリット（スリット幅 w_1 ）を通過して下流へ流出した流木等の本数を計測する。

また，実験水路床には流木を安定させるために細砂を接着している。流木の投入に関して，給水開始より湛水部が安定した状態であることを確認してから投入するものとし，流木の供給条件（初期の投入方向）の違いが捕捉率に影響を与えないように配慮するため，流木の方向を流れの水平面内において全方向にほぼ同じ割合となるように留意して投入する。水路の傾斜角は掃流区間（ $\theta_w = 2 \text{ 度}^2$ ）を基本としている。なお，予備実験において流木への枝付き（写真-2.3），水路長（1m～4m），細粒土砂（珪砂，粒径：0.4～0.8mm）の混入ならびに流木投入速度の違いが実験結果に顕著に影響を与えないことを事前に確認している。各条件の違いが流木の回転や流木処理効果に与える影響を把握するため，上部からの供給流量 q_{in} やスリット幅 w_1 等を変化させて，それぞれの条件での流木処理効果を比較している。

実験条件を表-3.1 に示す。なお，手動での流木投入による影響を低減するため，実験は同じ条件にて 3 回実施している。

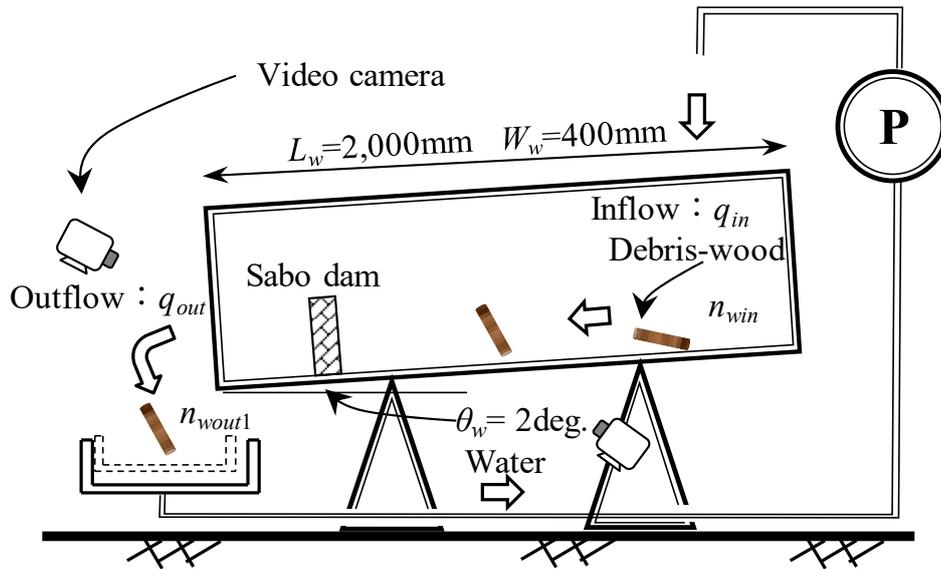


図-3.2 実験概要 その1 (実験水路の概要)

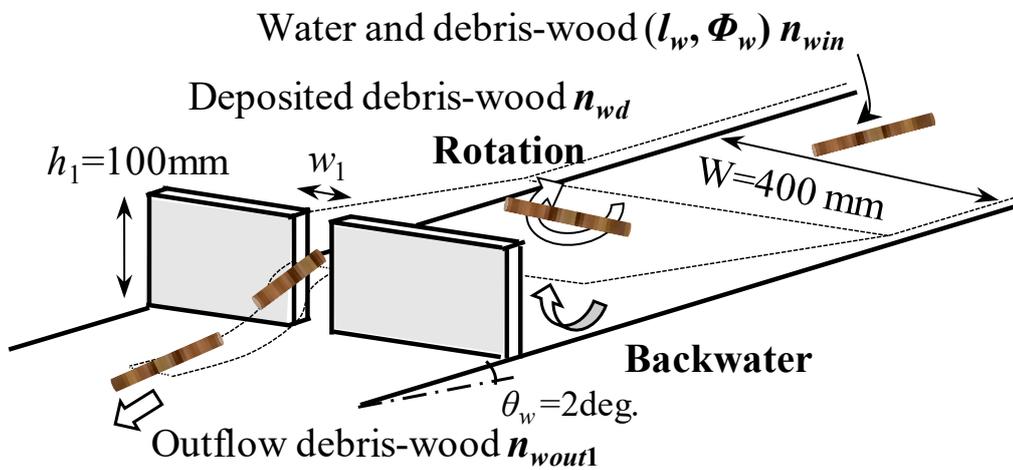


図-3.3 実験概要 その2 (コンクリート・スリット部の概要)

表-3.1 実験条件

CASE	q_{in} (ℓ/s)	w_1 (mm)	θ_w (deg.)	l_w (cm)	Φ_w (mm)
6-1	0.8	6	2	5	3
6-2	1.2				
6-3	1.6				
6-4	1.2	21	2	5	3
6-5		50			

※ q_{in} (ℓ/s) : 上部からの供給水量

w_1 (mm) : スリット幅

θ_w (deg.) : 水路勾配

l_w : 流木長

Φ_w (mm) : 流木径

コンクリート・スリット堰堤における流木処理効果に関する実験結果について、実験開始から給水停止直後（ただし、背水の影響が消失時）までにおける流木貯留率（湛水部における流木貯留率） f_{c1} 、実験開始から実験終了時（ただし、湛水部の消失時）までにおける最終的な湛水部での流木堆積率 f_{c2} 、給水停止後から実験終了時までにおける流木流出率 f_{out1} は、それぞれ、

$$f_{c1} = (n_{win} - n_{wout1}) / n_{win} \quad (3-1)$$

$$f_{c2} = n_{wd} / n_{win} \quad (3-2)$$

$$f_{out1} = (n_{win} - n_{wd} - n_{wout1}) / n_{win} \quad (3-3)$$

と表される。ここに、 n_{win} は流木の供給本数の合計、 n_{wout1} は給水停止直後（実験途中）におけるスリット部からの総流木流出本数、 n_{wd} は実験終了時の最終的な湛水部における流木堆積本数である（図-3.3）。

スリット幅 w_1 が 21mm (流木径 Φ_w の 7 倍) における供給流量 q_{in} の違いによる実験開始から給水停止直後までにおける流木貯留率 f_{c1} の変化を図-3.4 に示す. 図-3.4 に示すとおり, 供給された約半数程度の流木が湛水部で貯留される効果があった. また, 流量が大きくなるに伴って, 流木処理効果 (貯留) が向上することが分かった.

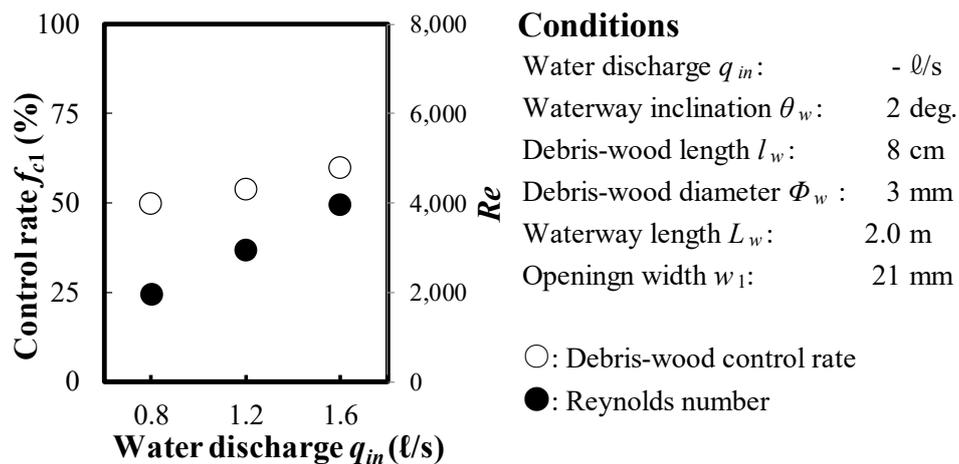


図-3.4 供給流量の違いによる流木処理効果の変化

これは、図-3.5 に示すとおり、堰堤直上流部での背水 (Δh) に伴って発生する湛水面における平面流（平面的な渦流：図-3.6）の影響を受けて、堰堤（壁体）直上流付近において両側（横断）方向へ流木が輸送されることによるものであった。特に、流量増による背水の水位上昇量が大きくなるに伴って、より多くの流木が湛水部で貯留されることが分かった。

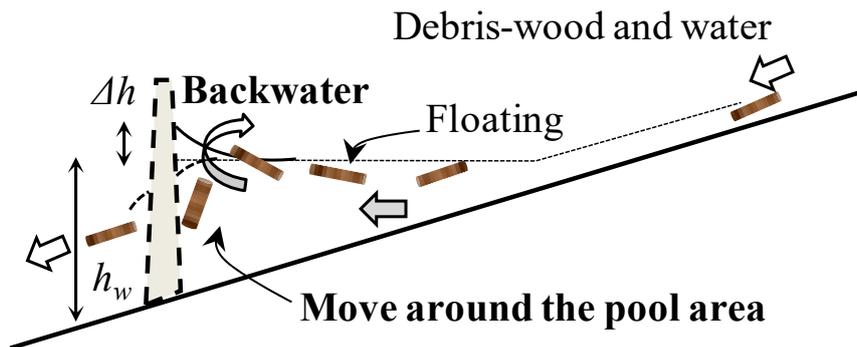


図-3.5 給水中の湛水部における流向及び流木挙動の縦断概要

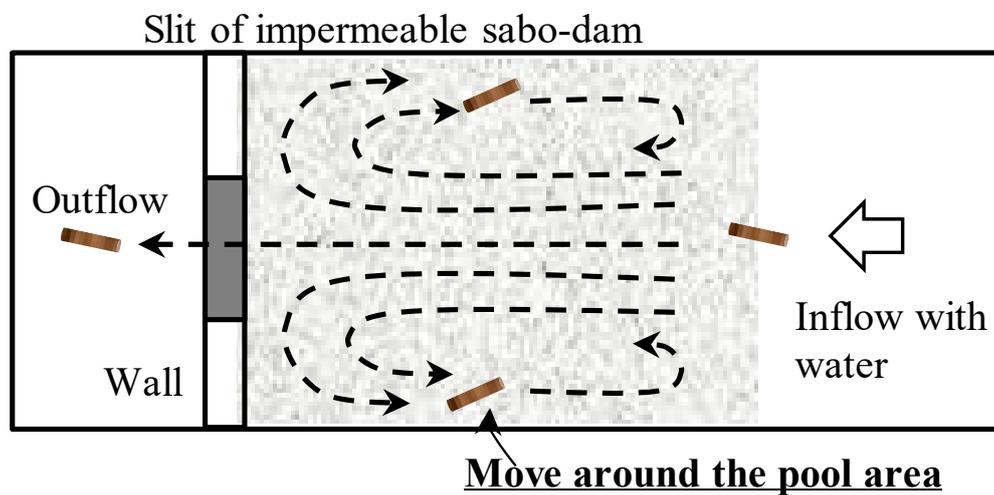


図-3.6 給水中の湛水面における流向及び流木挙動の平面概要

次に、スリット幅 (w_1 : 図-3.3) の違いによる実験開始から給水停止直後までにおける流木貯留率 f_{c1} 及び実験開始から終了時までにおける最終的な湛水部での流木堆積率 f_{c2} の変化を、図-3.7 にそれぞれ示す。図-3.7 に示すとおり、スリット幅 w_1 が狭くなるに伴って、顕著に処理効果 (f_{c1} 及び f_{c2}) の向上が示された。特に、流木径 Φ_w に対して2倍のスリット幅 ($w_1 = 6$ mm) の場合、他の幅と比較して顕著 (約 9 割程度) に流木が貯留されることが分かった。これは、スリット幅が狭くなるに伴って堰堤直上流における背水の影響が顕著となるため、その結果として湛水部内における水位差が大きくなり、それらの影響による明確な平面流 (渦流: 図-3.6) が顕著に発生したことによるものであった。

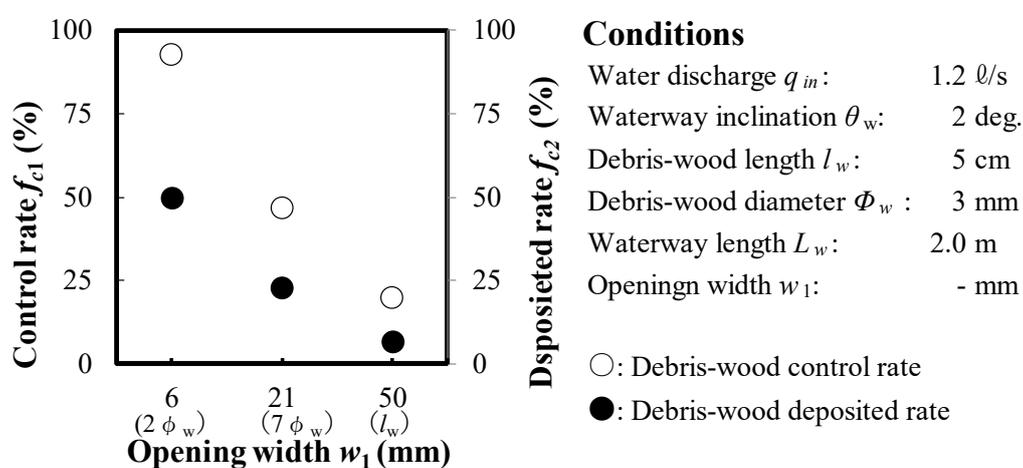


図-3.7 スリット幅の違いによる流木処理効果の変化

なお，上流からの給水停止後における湛水面の流向及び湛水部で貯留された流木の挙動の概要を図-3.8に示す．図-3.8及び図-3.7に示す最終的な流木堆積率 f_2 に示すとおり，供給停止後においては湛水部における背水が消失し，湛水部の水がスリット間から殆ど乱れずに排水されながら，それまでに貯留されていた流木が徐々にスリット間を通過して湛水域から下流へ流出していく危険性が分かった．

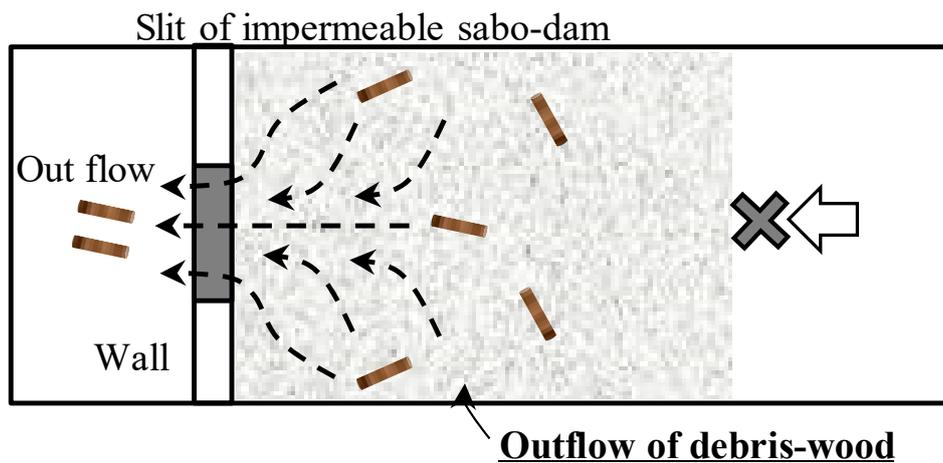


図-3.8 給水停止後における流向及び流木挙動の概要

ここで、給水停止直後からのスリット部から流出する流水量の違いが湛水部からの流木流出に与える影響を把握するため、スリット部からの最大流出流水量 q_{s_out} を求める。既往研究³⁾の実験結果によると、コンクリート・スリット部からの流出流水量は、大オリフィスの式より、

$$q_{s_out} = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot w_1 \cdot (\sqrt{2 \cdot g}) \cdot (h_w^{3/2}) \quad (3-4)$$

と表される³⁾。ここに、 h_w は水深（ただし、河床面までスリットがある場合：図-3.5）、 g は重力加速度、 μ は流量係数（ただし、 $\mu=0.5$ 程度³⁾）である。なお、給水停止直後におけるスリット部から流出する流水量 q_{s_out} （ただし、スリット面積、重力加速度 g 及び流木長 l_w を用いて無次元化した値）と給水停止後から実験終了時までにおける流木流出率 f_{out1} ：式（3-3）との関係を図-3.9 に示す。図-3.9 に示すとおり、スリットからの流水量は、流木の流出量と線形の関係性であった。なお、流出する流水量が大きくなるに伴って、湛水面における流向の表面波（図-3.8）が広く顕著に見られた。

これらの結果より、コンクリート・スリット堰堤の流木処理効果に関して、堰堤壁体の直上流部でのスリットでの縮流による堰上げに伴う背水等の影響を受け、湛水部において発生する平面流（渦流）によって流木が一時的に貯留され、下流への流木の流出を遅らせる効果（調節効果）が示された。ただし、洪水ピーク後において、流木を運搬できる程度の一定の供給水量が継続する場合は、それらの流水の影響を受けて流木が下流域まで流出し、その後の下流域における橋梁閉塞等の被害が懸念される。そのため、本来のコンクリート・スリット堰堤の機能（例えば、土砂調節効果）への影響にも配慮したスリット部における流木流出防止構造による別途の対策が望まれる。

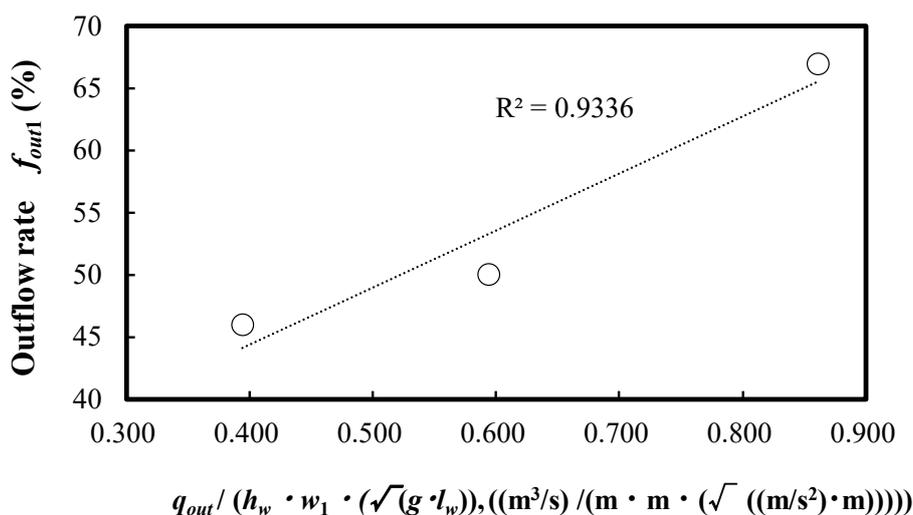


図-3.9 給水停止後からの流出流水量と流出流木量の関係

3. 3 スリット部における流木捕捉機能の高度化

コンクリート・スリット堰堤における流木処理機能の高度化を図ることを目的に、副堰堤における流木捕捉工の流木捕捉機能を高めるために付加的に提案されている一般的なワイヤー製のネットを参考に、スリット部からの流木流出を低減させるための流木流出防止構造（流木フェンス・ネットによる流木捕捉：図-3.10）を提案する。なお、常時におけるスリット部を通過する流水や土砂（例えば、掃流砂や浮遊砂）との干渉による閉塞や河積阻害等の影響を軽減させるため、スリット部には一般的に材料径が小さいと考えられる線材を網状的に配置させた構造としている。また、線（糸）材の配置形状（例えば、水平部材や斜部材、縦部材：図-3.10）の違い等が流木捕捉の機能に与える影響を把握するため、それぞれの配置形式における流木捕捉量を比較している。なお、実験に使用した水路や流木の材料等は、前節の実験と同じものを用いている（図-3.2 及び図-3.3）。また、流木流出防止構造における線材の材料径 ϕ_a や摩擦の違いによる影響を把握するため、線材表面における摩擦抵抗による影響が一般的に小さいと考えられるナイロン糸（ただし、3号の材料径、0.285mm 及び 10号：0.52mm の2種）と、比較的摩擦抵抗が大きいと考えられる純綿水糸（10号：1.4mm）を実験に用いている。

各条件の違いが流木流出構造の流木捕捉機能に与える影響を把握するため、同様に、上部からの供給流量 q_{in} 、スリット幅 w_i 等、流木長 l_w 、流木径 ϕ_w を変化させて、それぞれの条件での流木捕捉量を比較している。

実験条件を表-3.2 に示す。なお、手動での流木投入による影響を低減するため、実験は同じ条件にて3回実施している。

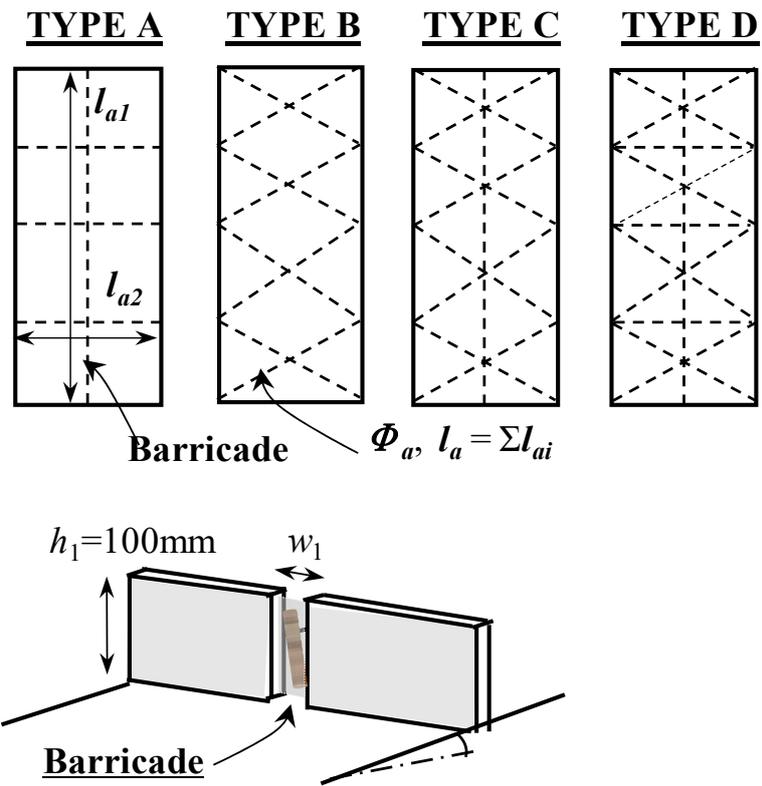


図-3.10 提案する流木流出防止構造（流木フェンス・ネット）

表-3.2 実験条件

CASE	Barricade TYPE	w_1 (mm)	Φ_a (mm)	q_{in} (ℓ/s)	Φ_w (mm)	l_w (cm)	
7-1	A	6	0.5	1.2	3	5	
7-2		21					
7-3		50					
7-4	B	6					
7-5		21					
7-6		50					
7-7	C	6					
7-8		21					
7-9		50					
7-10	D	6					
7-11		21					
7-12		50					
7-13	A	21	0.285	0.5	3	3	
7-14			1.4				
7-15			1				
7-16			10				
7-17			0.8				
7-18			1.6				
7-19			1.2				8
7-20			1.2				8

※ Barricade TYPE : 流木流出防止構造の形式 (図-3.10)

w_1 (mm) : スリット幅

Φ_a (mm) : 線材の材料径

q_{in} (ℓ/s) : 上部からの供給水量

Φ_w (mm) : 流木径

l_w (cm) : 流木長

提案する対策（図-3.10）を講じたコンクリート・スリット堰堤における流木捕捉効果に関する実験結果について、実験開始から実験終了時（ただし、湛水部消失）までにおける最終的な湛水部及び流木流出防止構造により捕捉された合計の流木捕捉率 f_{c3} 、流木流出防止構造の流木捕捉量 e_1 （ただし、材料単位体積あたりの流木捕捉量）、給水停止後から実験終了後までのスリット部からの流木流出率 f_{out2} は、それぞれ、

$$f_{c3} = (n_{wd} + n_{wc}) / n_{win} \quad (3-5)$$

$$e_1 = (\Phi_w^2 \cdot \pi / 4 \cdot l_w \cdot n_{wc}) / (\Phi_a^2 \cdot \pi / 4 \cdot l_a) \quad (3-6)$$

$$f_{out2} = (n_{win} - n_{wout1} - n_{wd} - n_{wc}) / (n_{win} - n_{wout1}) \quad (3-7)$$

と表される。ここに、 n_{wd} は実験終了時の最終的な湛水部における流木堆積本数、 n_{wc} は実験開始から終了後までにおける最終的な流木流出防止構造で捕捉された流木の合計本数、 n_{win} は流木の供給本数の合計、 n_{wout1} は給水停止直後（実験途中）におけるスリット部からの総流木流出本数である（図-3.11）。

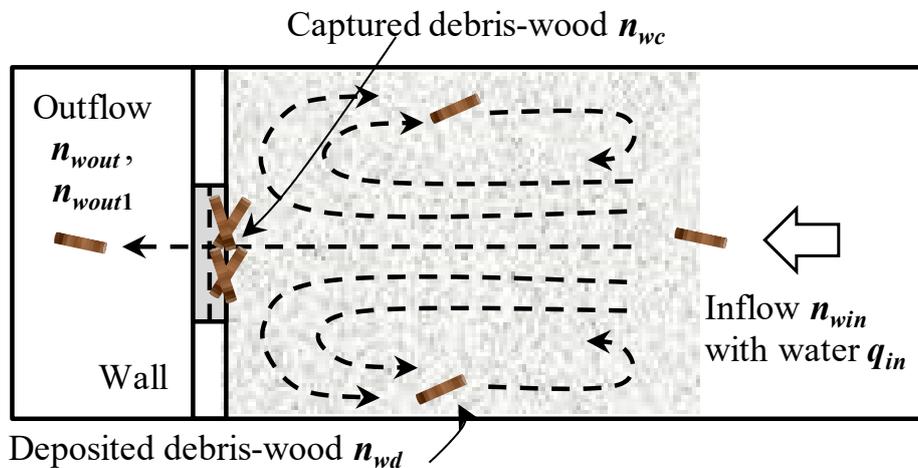


図-3.11 流木計測（本数）に関する定義図

スリット幅 w_1 が 50mm (流木長 l_w 程度) における流木流出防止構造形式 (図-3.10 : TYPE A から D まで) の違いによる最終的な湛水部及び流木流出防止構造部により捕捉された合計の流木捕捉率 f_{c3} と, 材料単位体積あたりの流木捕捉量 e_1 の変化をそれぞれ図-3.12 に示す. 図-3.12 に示すとおり, 流木流出防止構造を設置した場合, 本構造を設置しない場合 (TYPE 0) と比較して, 顕著に最終的な流木処理 (捕捉) 効果が向上することが分かった. 特に, 斜部材及び縦部材が配置された TYPE C や D の形式は, 顕著に捕捉機能が向上した. 実験によると, 水平部材 (TYPE A) は, スリット部における水深の変化に伴って流木の捕捉機能に変化するため, この水位変化にも追従可能な斜部材が有効であると考察される. また, 流木がスリット部を通過する際, 流木軸が流れと同じ方向へ回転しながら流動するため, 通過横断幅を狭小させて, 流木との接触確率を向上させるように配置した縦部材が有効であることが分かった. なお, TYPE A における水平部材のみ (縦部材無し) の場合, 殆どの流木が流出してしまうことを予備実験で確認している.

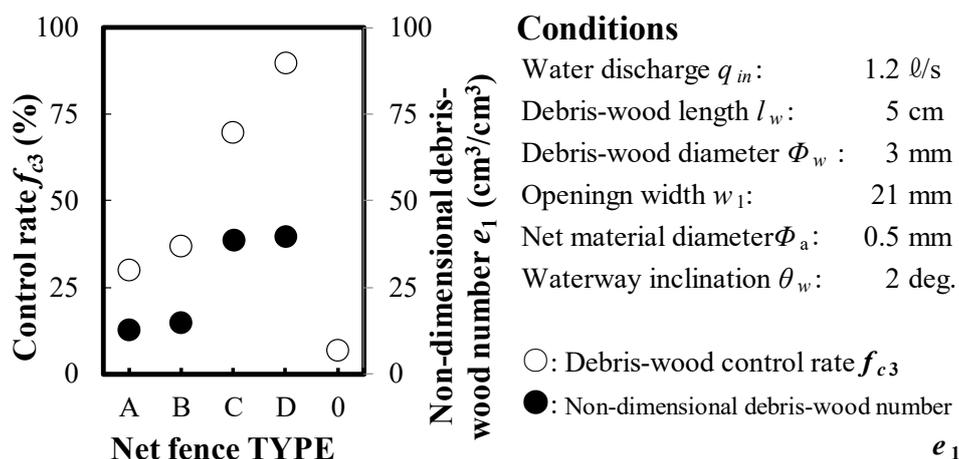


図-3.12 提案する流木流出構造形式の違いによる流木捕捉効果の変化

各透過部間隔における形式の違いによる材料単位体積あたりの流木捕捉量 e_1 の変化を図-3.13 に示す。図-3.13 に示すとおり、スリット幅が狭くなるに伴って、斜部材を設けない形式 (TYPE A) は単位材料あたりにおける流木捕捉量において不利であることが分かった。なお、スリット幅が広い場合 ($w_1 = 50\text{mm}$)、流木流出防止構造により一旦捕捉された流木群塊が流れの影響等を受けて不安定となり、最終的に流木が線材より離脱して、顕著にそのまま下流へ流出することが分かった。

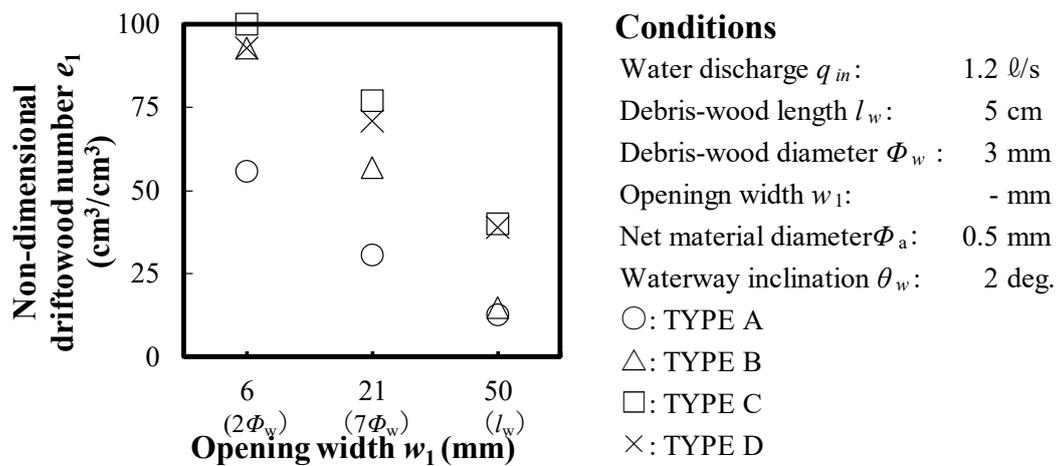


図-3.13 各透過部間隔の違いによる流木捕捉効果の変化

更に詳細に比較するために、水平部材の有無 (TYPE C 及び D) の違いによる最終的な湛水部及び流木流出防止構造部で捕捉された合計の流木捕捉率 f_{c3} と、給水停止後から実験終了時までのスリット部からの流木流出率 f_{out2} の変化をそれぞれ図-3.14 に示す。図-3.14 に示すとおり、スリット幅が広くなるに伴って、水平部材を有する形式 (TYPE D) が流木流出防止構造による捕捉効果において有効となることが分かった。しかしながら、給水停止後から実験終了後までのスリット部からの流木流出率 f_{out2} において、形式の違いによる変化は殆ど確認されなかった。なお、前述の一旦捕捉された流木群が流出する現象は、給水停止前までに見られるネット部での乱れた流れが発生する場合 (例えば、図-2.31) に多く見られた。これより、水平部材は一旦捕捉した流木を乱れた流水に対して捕捉効果を継続させる機能を有すると考察される。

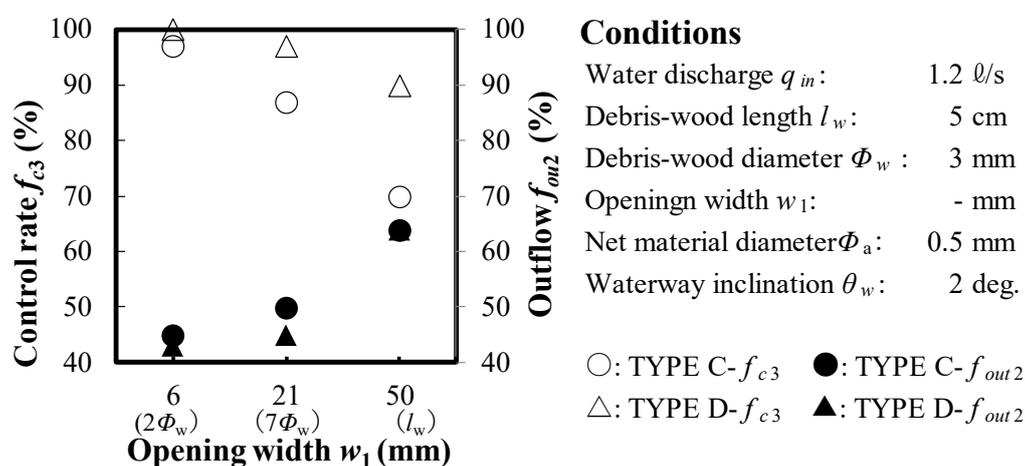


図-3.14 水平部材有無 (TYPE C 及び D)の違いによる流木捕捉効果の変化

流木の流出防止構造における材料（材質，材料径 Φ_a ）の違いによる最終的な湛水部及び対策構造により捕捉された合計の流木捕捉率 f_{c3} と，材料単位体積あたりの流木捕捉量 e_1 の変化をそれぞれ図-3.15 に示す．図-3.15 に示すとおり，材料径 Φ_a が大きくなるに伴って，顕著な差は見られないが，少し流木捕捉機能が向上することが分かった．しかしながら，線材の単位材料あたりにおける流木捕捉量に関しては顕著に不利になる傾向が示された．なお，綿糸材の表面における粗面による流木との摩擦の違いによる影響は殆ど見られなかった．実験によると，流木流出防止構造部での流木捕捉確率（ただし，捕捉後も安定化している場合）は，流木と材料とが接触する確率に強く依存することによるものと考察される．

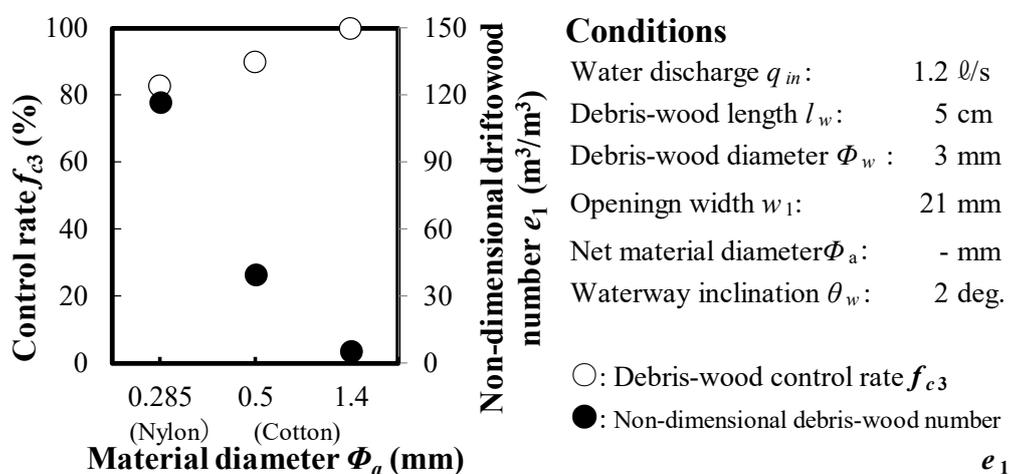


図-3.15 流木流出防止構造材料の違いによる流木捕捉効果の変化

ここで、透過部（スリット）面積あたりの流木流出防止構造材料による阻害面積（材料設置面積 $A_a = \text{材料径} \cdot \text{幅} \phi_a \times \text{材料長} l_a$ ）と、最終的な湛水部及び流木流出防止構造により捕捉された合計の流木捕捉率 f_{c3} との関係を図-3.16 に示す。図-3.16 に示すとおり、網羅的に設置された形式（TYPE D）が最も有効であるとともに、透過部面積に対して約 5% 程度以上の面積を占有する材料（材料長 l_a ）による配置の場合、約 8 割程度の捕捉効果（ただし、TYPE D の場合）が期待できることが分かった。

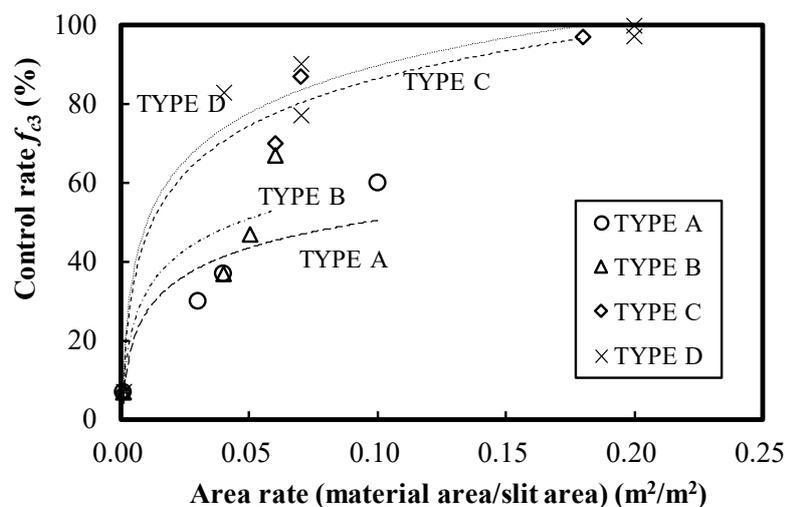


図-3.16 透過部（スリット）面積あたりにおける流木流出防止構造材料の阻害面積（材料設置面積）の違いによる捕捉効果の変化

最後に、提案する流木流出防止構造における各部材の役割（機能）に関して以降に提案する。実験によると、水の流入流量の違いに伴って変化する湛水部の水位の変化に対して追従が可能な斜部材は流木捕捉に関して主要な機能を有し、一方、水平部材は一旦捕捉した流木をそのまま安定させて捕捉を保持しておく機能を有するものと考察される（図-3.17）。なお、図-3.18に示すとおり、縦部材はスリット部から流出する際に回転する流木について通過幅を狭くさせることにより、流木との接触確率を向上させてより捕捉させる重要な部材であることが分かった。

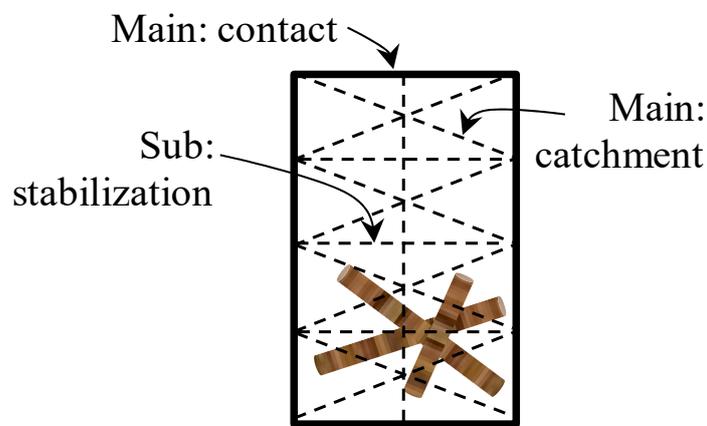


図-3.17 流木の流出構造における各部材の機能（正面図）

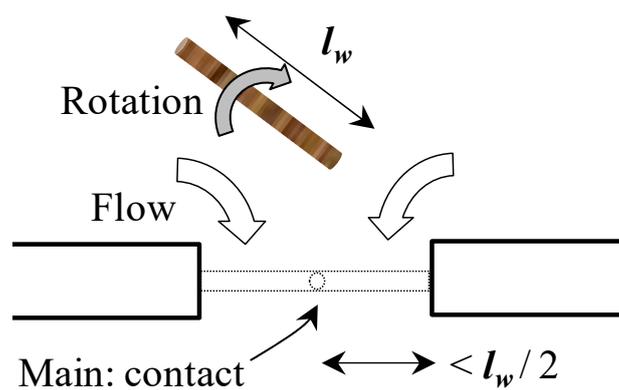


図-3.18 流木の流出防止構造における捕捉機構（平面図）

3. 4 まとめ

緩勾配である掃流区間においてこれまで設置されてきた既設のコンクリート・スリット堰堤を有効に活用した効果的な流木対策計画の立案に向けて、これまで殆ど議論されてこなかったコンクリート・スリット堰堤における流木処理機能とその高度化に関して、実験により考察した。

本章で得られた成果を、以下に要約する。

- 1) コンクリート・スリット堰堤直上流部の背水に伴って発生する湛水面での平面的な渦流等の影響を受けて、湛水面での横断方向へ流木が輸送され、多くの流木が湛水部で一旦貯留される効果が明らかとなった。
- 2) 一方、供給停止後においては湛水部の背水の消失に伴って、貯留された多くの流木がスリット間をそのまま通過して下流へ流出していく危険性が示された。
- 3) そこで、貯留された流木がコンクリート・スリット部から流出する量を低減させる流木の流出防止構造（流木捕捉工）を提案した。なお、常時におけるスリット部を通過する閉塞等による河積阻害等の流れの影響を軽減するため、阻害率（断面積）が一般的に小さい線（糸）材を網状的に配置させる構造とした。
- 4) 各部材の流木捕捉に関して、斜部材は水位変化時の流木捕捉に対して有効であり、水平部材は捕捉した流木の状態を安定化させて継続させる機能であると考察された。また、縦部材は通過時において回転する流木に対して、通過幅を狭くすることにより、流木と線材とを接触させて捕捉するための重要な部材であることが分かった。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川砂防技術基準（計画編），2004.
- 2) 国土交通省 砂防部：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，国総研資料，Vol.904，2016.
- 3) 水山高久，阿部宗平，矢島重美：スリット砂防ダムの流量係数と堆砂形状，新砂防，No.4，165，1989.

第4章 地形条件を活用した流木対策工

4.1 概説

平成29年7月に発生した九州北部豪雨災害では、第1章にも示されるとおり、上流に設置されていた既設の不透過型砂防堰堤において、流木が殆ど捕捉されずに下流のため池（図-1.1）へ多量に流出し、ため池の設備（余水吐）における流木閉塞による排水機能低下の影響を受けて堤防が越流決壊し、その下流域に多大な影響を与えた^{1), 2)}。一方、今回の災害を受け、溪流から河川区域まで含めた流域における緊急的な流木対策の方向性や事業の推進³⁾が示され、流域全体での合理的な流木対策技術の立案が急務な課題となっている。

下流域における流木対策として、これまで、河川の湾曲部等を利用した杭水制による流木捕捉工^{4), 5)}や土石流分散堆積工⁶⁾が提案されている。ただし、河道内に流木捕捉杭等を直接設置した場合、一般的に流木だけでなく日常的な芥等の閉塞により、河積阻害等の影響や維持管理の課題が懸念される。また、土石流分散堆積工⁶⁾は広大な平坦地を事前に用地取得しておく問題がある。

そこで、これまでに考察した流木の回転等の流出特性や維持管理を考慮した流域における流木対策工について提案する。

4. 2 土地利用を考慮した流木捕捉工の提案

これまでの災害事例⁷⁾や前章までの考察を参考に、流木対策処理の考え方を提案する。図-1.1に示されるとおり、既往のため池施設に多量の流木が流入した場合、設備（例えば、余水吐）等に影響を与えることが懸念されるため、これらの河川施設の上流域における流木処理が望まれる。一方、図-1.16に示されるとおり、流木の流出前に先行して土砂が生産・流出した場合、上流域の砂防施設から満砂になることが考えられ、土砂の捕捉とは分離させて、流木を下流域で集中的に捕捉する処理も有効であると考えられる。なお、前述にも示すとおり、河道内に流木捕捉工（杭工）を直接設置した場合、流木捕捉容量に応じた用地の確保や日常的な維持管理に関して留意する必要がある。一方、流木捕捉工の直上流における流れの変化（例えば、緩勾配区間から急勾配への急激な変化）の影響（例えば、図-2.35；流速 V_{n+1} の差が流木の回転力 ω_n に与える影響）を受けて流木が流れ方向に回転し、一般的に用いられる流木捕捉工の杭間隔（最大流木長の半分）⁶⁾では捕捉機能を満足せず、流木がそのまま杭間を通過してしまうことが懸念される。ただし、杭間隔を顕著に狭くした場合、日常的な芥や流木の閉塞防止のための密な維持管理が課題となる。

そこで、これまでの杭間隔⁶⁾でも流木を確実に捕捉が可能な配置の提案するため、流木捕捉が優位となる方向（流れに対して直角方法）へ流木を回転（制御）させることを目的に、一般的に流れが顕著に変化（急流から緩流に変化）すると考えられる土石流氾濫堆積地等の谷出口付近における地形を活用した遊水構造での流木対策処理の考え方を提案する（図-4.1）。図-4.1に示すとおり、日常的に流下する比較的小規模な常時の流水については、その流下に必要な断面を確保した構築する流路工により排水させる。一方、100年超過確率規模で発生する多量の流水や流木を含んだ土砂に対しては、流下断面が不足した断面の流路工より意図的に越流させてその周囲に存在する平坦地（例えば、流木捕捉杭を畦部に配置し、その他の平坦地を平常時に田畑利用）において土砂や流木を堆積（捕捉）させる遊水池構造である。

そこで、提案する本構造の有効性を示すため、実験により急峻な流路から緩勾配の平坦地へ流下する際に期待できる流木の回転について考察する。

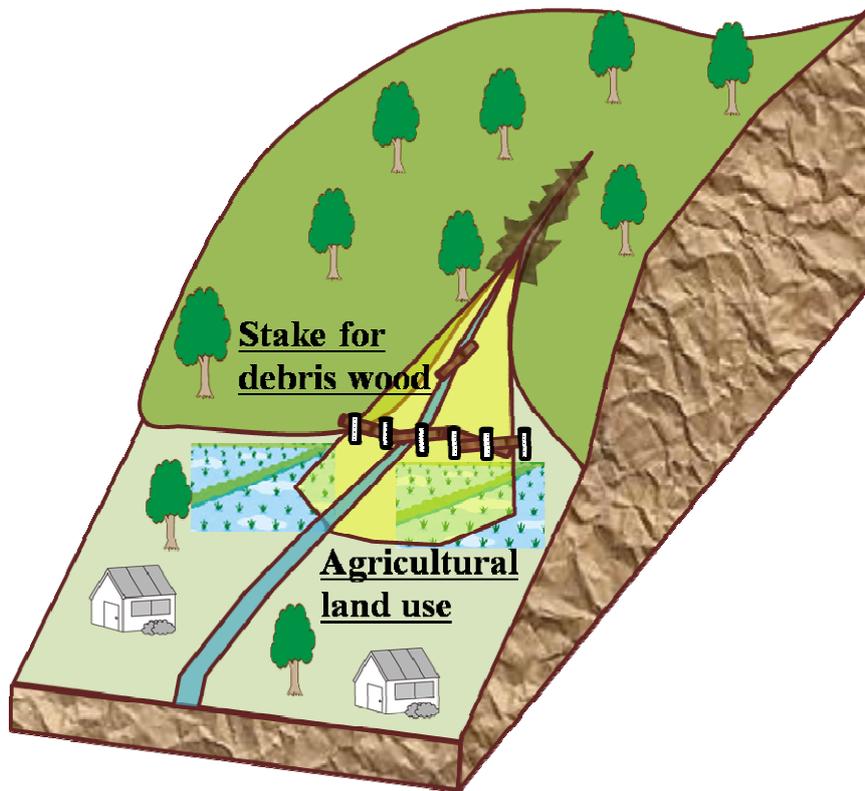


図-4.1 提案する谷出口の土石流氾濫堆積地形等を活用した遊水構造による流木処理の概要

4. 3 地形条件の変化等が流木捕捉機能に与える影響

実験に使用した急拡水路（直線水路及び平面氾濫台）を図-4.2 に示す。図-4.2 に示すとおり、実規模に対して約 1/100 程度の縮尺を想定して、傾斜させた直線水路（幅 10cm）の上流から水（ q_{in} ）、流木（ただし、円形材料、流木長 8cm、乾燥状態での比重：約 0.75、手動により投入：時間あたりの投入速度が概ね 1 本/0.5 秒）を供給し、下流の平面氾濫台における流木捕捉直前での流木の軸方向 θ_n （図-4.3）をそれぞれ計測している。流木の投入に関して、前述までも示されるとおり、群集で流下する流木は広い杭間隔の対策工においても捕捉され易いことが懸念されるため、安全側の検討として流木を単体でそれぞれ干渉しない間隔程度で投入している。また、流木の供給条件（初期投入方向）の違いが流木の回転（制御）効果（図-4.3）に影響を与えないように配慮するため、流木の方向を流れの水平面内において全方向にほぼ同じ割合となるように投入している。

水路の傾斜角は土石流区間（10 度⁶）以上）を基本としている。また、流木の投入位置 L_w や平面氾濫台における流木方向の評価（図-4.3）位置（捕捉工位置） L_p をそれぞれ変化させている（図-4.2）。なお、予備実験において、流水への土砂混入、流木の枝付き（写真-2.3）、流木の投入速度等の違いが実験結果に顕著に影響を与えないことを事前に確認している。

各実験条件の違いが流木の回転等に与える影響を把握するため、流量（ q_{in} ）、水路勾配（直線水路の勾配： θ_w 、平面氾濫台の勾配： θ_p ）、流木径 ϕ を変化させて、それぞれの条件における流木の回転（制御）効果を比較している。なお、平面氾濫台の勾配は、流木が堆積せずに流下する最小の勾配までとしている。

実験条件を表-4.1 に示す。なお、手動での流木投入による影響を低減するため、実験は同じ条件にて 3 回実施している。

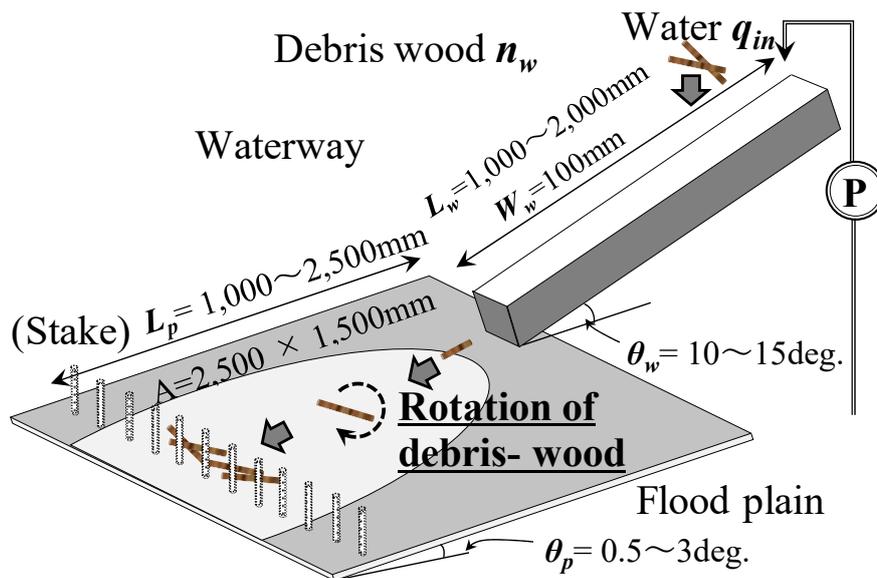


図-4.2 実験水路の概要

OK: $\theta_n \leq 45^\circ$
NG: $\theta_n > 45^\circ$

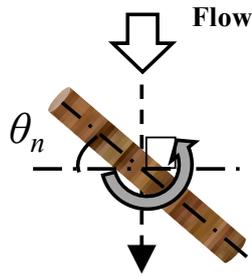


図-4.3 流木回転の制御効果に関する定義図（流木の流水に対する方向）

表-4.1 実験条件

CASE	q_{in} (ℓ / s)	Φ (mm)	θ_w (deg.)	θ_p (deg.)	L_w (m)	L_p (m)	
8-1	0.25	1.6	15	2.0	1.0	1.0	
8-2	0.80						
8-3	0.50						
8-4		2.8		2.0	2.0		
8-5							
8-6		1.8		1.0	2.0		
8-7				3.0			
8-8				0.5			
8-9		2.0		2.0	2.0		2.0
8-10							0.5
8-11	2.0						2.0
8-12	0.80	2.8	10	0.5	1.0	1.0	
8-13	0.50	1.6					

※ q_{in} (ℓ/s) : 上部からの供給水量

Φ (mm) : 流木径

θ_w (deg.) : 直線水路の勾配

θ_p (deg.) : 平面氾濫台の勾配

L_w (m) : 流木の投入位置

L_p (m) : 流木方向の評価位置

実験結果における流木の回転に関して，流れの変化に伴う流木の回転効果（流木の回転率） f_c は，

$$f_c = n_0 / n_w \quad (4-1)$$

と表される．ここに， n_0 は平面氾濫台上で計測位置 L_p に置いて θ_n が 45 度以下（図-4.3）であった流木の本数， n_w は流木の供給（図-4.2）本数である．以降に，実験条件の違いが流木の回転効果に与える影響について考察する．

供給流量 q_{in} の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-4.4 に示す。図-4.4 に示すとおり、流量及びレイノルズ数（ただし、直線水路）が大きくなるに伴って、流木回転効果が向上することが分かった。これは、直線水路から平面氾濫台へ通過する際に、その上下流で発生する流速差の影響を受けて、流木が回転（図-2.35）したことによるものであった。

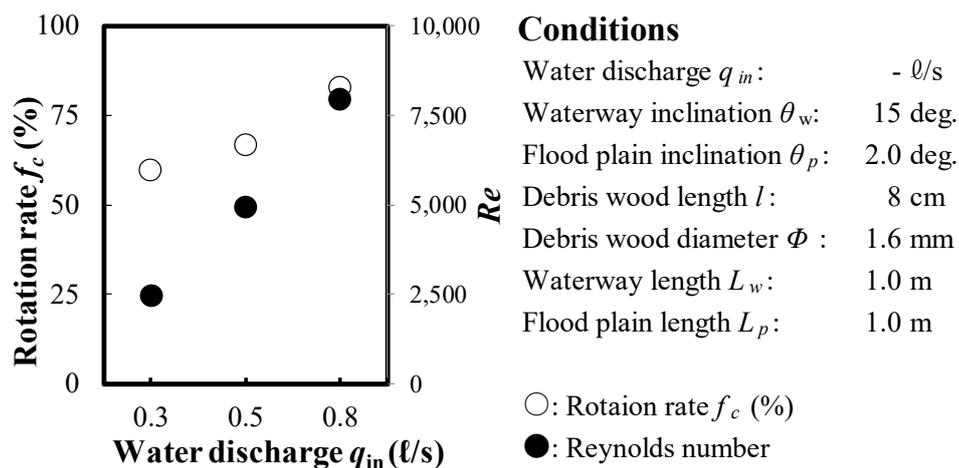
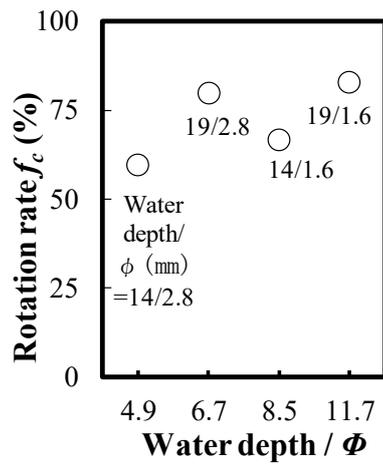


図-4.4 供給流量の違いによる流木回転効果の変化

次に、流木径や水深の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-4.5 に示す。図-4.5 に示すとおり、流木径が細く、水深が大きくなるに伴って流木回転効果が向上することが分かった。これは、流木の回転に関して、水深（流量）が大きくなるに伴って上下流の流速差の違いが顕著になるとともに、流木の重量が小さくなるに伴って、流れ（流速）の変化に影響を受け易くなったことによるものであった。



Conditions

Water discharge q_{in} : 0.5, 0.8 l/s
 Waterway inclination θ_w : 15 deg.
 Flood plain inclination θ_p : 2.0 deg.
 Debris wood length l : 8 cm
 Debris wood diameter Φ : 1.6, 2.8 mm
 Waterway length L_w : 1.0 m
 Flood plain length L_p : 1.0 m

○: Rotation rate f_c (%)

図-4.5 流木径や水深の違いによる流木回転効果の変化

河床勾配の変化（直線水路と平面氾濫台との勾配比： θ_w/θ_p ）の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-4.6 に示す。図-4.6 に示すとおり，河床勾配の変化に影響を受けた勾配変化点の上下流における流速の変化が流木の回転効果に影響を与えることが分かった。

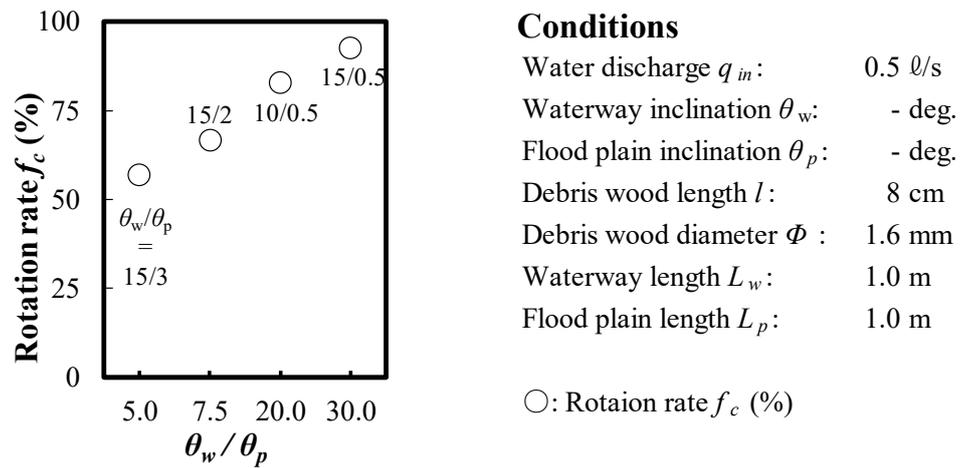


図-4.6 勾配変化地点の上下流における河床勾配変化の違いによる流木回転効果の変化

最後に、流木の流下延長（流木の投入位置 L_w 、平面氾濫台における流木方向の評価位置 L_p ：図-4.2）の違いによる流木の回転率 f_c の変化を図-4.7 に示す。図-4.7 に示すとおり、流木の流下延長の違いは流木の回転効果 f_c に殆ど影響を与えないことが分かった。これは、流木回転は流速の変化付近（直線水路と平面氾濫台の接続部付近）で主に発生していることによるものであった。

これらの結果より、一般的に土石流氾濫開始地点の谷出口付近等に見られる地形の特性を活用すると、流木捕捉工としての杭を比較的に広間隔で経済的かつ維持管理が有利に配置させることが可能となることが分かった。

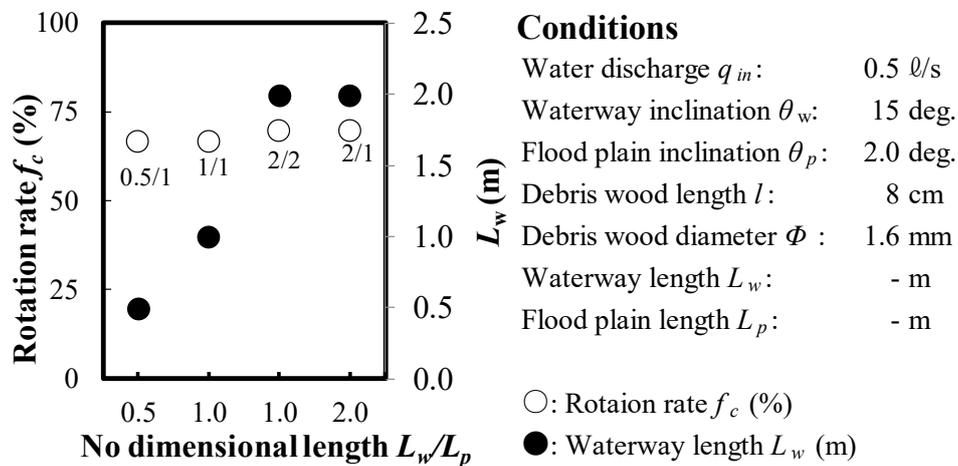


図-4.7 流木の流下延長の違いによる流木回転効果の変化

4. 4 まとめ

今後の流域全体における流木対策推進のために、九州北部豪雨災害において発生した流木流出機構や流木の挙動を参考に、河道特性や維持管理を考慮した流木対策処理の考え方について提案した。さらに、提案した流木対策工の捕捉効果に関して、急拡水路実験により、上下流の勾配変化等に伴う流速の変化が与える流木回転への影響について考察した。

本章で得られた成果を、以下に要約する。

- 1) 今後の流木対策の一つとして、流木の挙動や維持管理、土地利用等を考慮した土石流氾濫開始地点の谷出口付近等における地形条件を活用した遊水域構造による流木対策工を提案し、実験により流木捕捉における有効性について示した。
- 2) 流れの変化（急勾配から緩勾配への変化地点）部付近で、流木は顕著に回転することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 鈴木健吾, 篠原麻太郎, 守屋博貴, 二瓶泰雄, 長谷部由莉, 五十川周, 矢野真一郎, 赤松良久: 平成29年九州北部豪雨による福岡県朝倉市 山の神ため池の決壊・洪水氾濫状況, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.I_1183-1186, 2018.
- 2) 堀 俊和, 泉 明良, 正田大輔: 平成29年7月九州北部豪雨での被災ため池に関する調査報告書, 2017.
- 3) 国土交通省 砂防部: 事務連絡, 平成29年7月九州北部豪雨災害を踏まえた今後の砂防事業における流木対策, 2017.
- 4) Schmocker, L. and Weitbrecht, V.: Driftwood: risk analysis and engineering measures, *Journal of Hydraulical Engineering*, Vol. 139, pp.683-695, 2013.
- 5) 関沢元治, 佐々木誠, 松田浩一, 市山 誠, 石原正義: 北上川下流域における流木捕捉計画と杭水制による流木捕捉工について, 河川技術論文集, Vol.11, pp.423-428, 2005.
- 6) 国土交通省 砂防部: 砂防基本計画策定指針 (土石流・流木対策編) 解説, 国総研資料, Vol.904, 2016.
- 7) 地盤工学会: 平成29年7月九州北部豪雨緊急災害報告会資料, 2017.

第5章 木除杭の流木対策機能とその高度化

5.1 概説

橋脚における流木対策として、古くから橋脚の上流部に設けられた木除杭（例えば、渡月橋：写真-5.1、伊勢神宮の宇治橋：写真-5.2、京都宇治川の宇治橋：写真-5.3）が経験的に用いられてきた。また、木除杭は芥留杭とも称されており、橋脚への流木の衝突防止や橋脚で詰まりやすい流木や芥の巻付け防止等を目的としている¹⁾。なお、竹林²⁾は洪水時における木除杭の対策効果について報告するとともに、杭による流木の流向制御に関する機能の可能性について指摘している。



写真-5.1 木除杭の設置状況（京都嵐山；渡月橋）

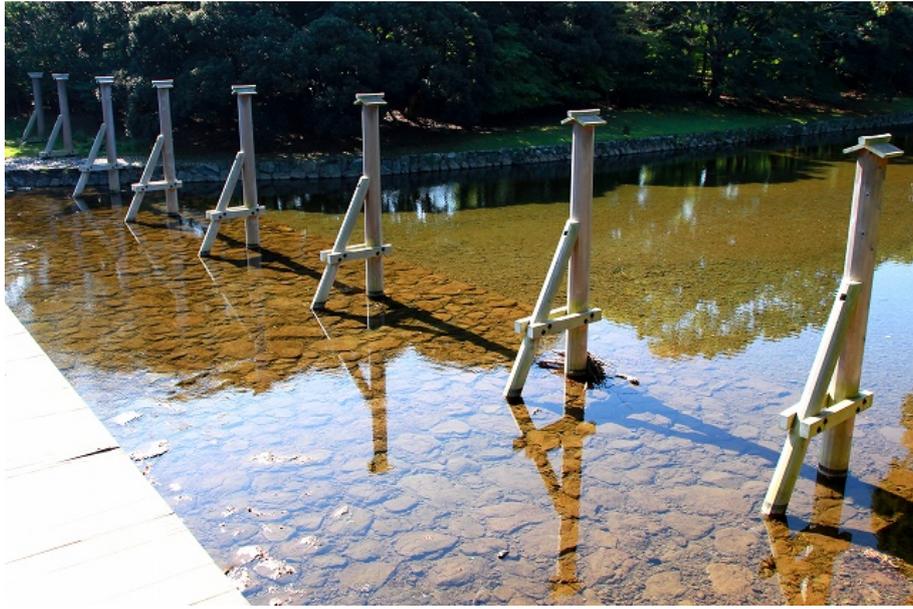


写真-5.2 木除杭の設置状況（伊勢神宮；宇治橋）



写真-5.3 木除杭の設置状況（京都宇治川；宇治橋）

現在，支間長が狭く，流木対策の必要な橋梁が全国的に多く存在しており，この伝統的な木除杭を用いた流木対策も有効な手段の一つであると考えられる．ただし，木除杭に関する設計手法は明確にされておらず，橋梁毎にその杭の配置形式等が異なっている（例えば，渡月橋：写真-5.1 は橋脚一つ置きに杭が設置，二つの宇治橋：写真-5.2 及び写真-5.3 は全橋脚上流に杭が設置）．また，これまで木除杭による流木の回転や芥留機能を配慮した杭の平面配置，河床に対する杭の傾斜角度の違い等が木除や芥留の効果へ与える影響に関する研究は，筆者らが知る限り存在しない．

そこで，木除及び芥留対策に対する機能等に関して，室内の実験に基づいて考察する．

5. 2 杭の設置条件の違い等が流木対策機能に与える 影響

木除杭の機能やその配置設計に関して実験に基づいて考察するとともに、その際の芥止め杭としての機能についても併せて考察する。

5. 2. 1 木除杭の機能に関する実験

実験に使用した水路を図-5.1 に示す。図-5.1 に示すとおり、傾斜させた水路（長さ 1~3m, 幅 20cm）の上流から水 (q_{in}) と流木（円柱材料, 長さ 10cm, 乾燥状態での比重 0.75 ; 手動により投入）を供給し, 下流部に設置した橋脚部及び木除杭（図-5.2）において閉塞された流木の本数をそれぞれ計測している。水路の傾斜角は既往報告³⁾を参考に, 橋梁において閉塞しやすい緩勾配 ($\theta_2=5$ 度) としている。実験水路床には流水を安定させるため, 細砂を接着している。図-5.2 に示すとおり, 今回採用した木除杭及び橋脚を円柱とし, 直径はそれぞれ 1cm としている。なお, 予備実験において, これらの構造物を角柱とした場合, 構造物周辺の流れが乱れて不安定となり実験結果の値が収束しなかったため, 円柱を採用している。

橋脚の支間長 L_2 については, 既往研究³⁾の実験結果において流木長と狭窄部との比が 2 分の 1 以下の場合に顕著に閉塞されている傾向が示されているため, 実験に用いた流木長 (10cm) の 2 分の 1 (5cm) としている。

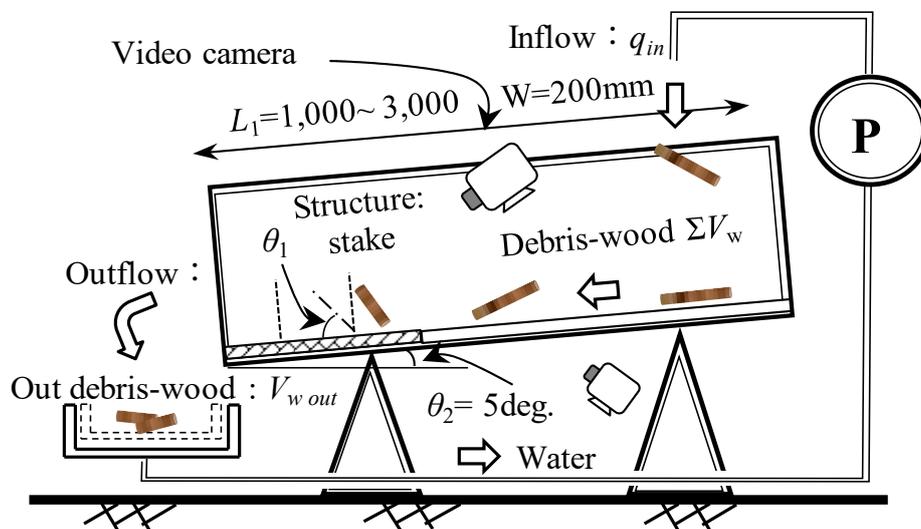


図-5.1 実験水路の概要

実験条件の一覧を表-5.1に示す。表-5.1に示すとおり、流木材（円柱）の直径 Φ_1 、流木投入位置から構造物までの間隔 L_1 、流木の投入条件 V_w （1本毎：1本/秒×50秒，1度に50本×1回），流れに対する流木の投入方向（流木軸が流れと同じ方向，横断方向で上部より投入），木除杭の配置形式（図-5.3），杭の傾斜角度 θ_1 （図-5.4），橋脚と杭等との中心間隔 L_3 （流木長 l_1 との比：図-5.2），上部からの供給水量 q_m （図-5.1）をそれぞれ変化させて，木除杭の機能について把握している。なお，図-5.3に示すとおり，木除杭の配置に関して，対策無や橋脚一つ置きに対する杭の設置（Type A：渡月橋，写真-5.1）に加えて，新たに千鳥配置形式（Type B）を提案し，それぞれ比較している。

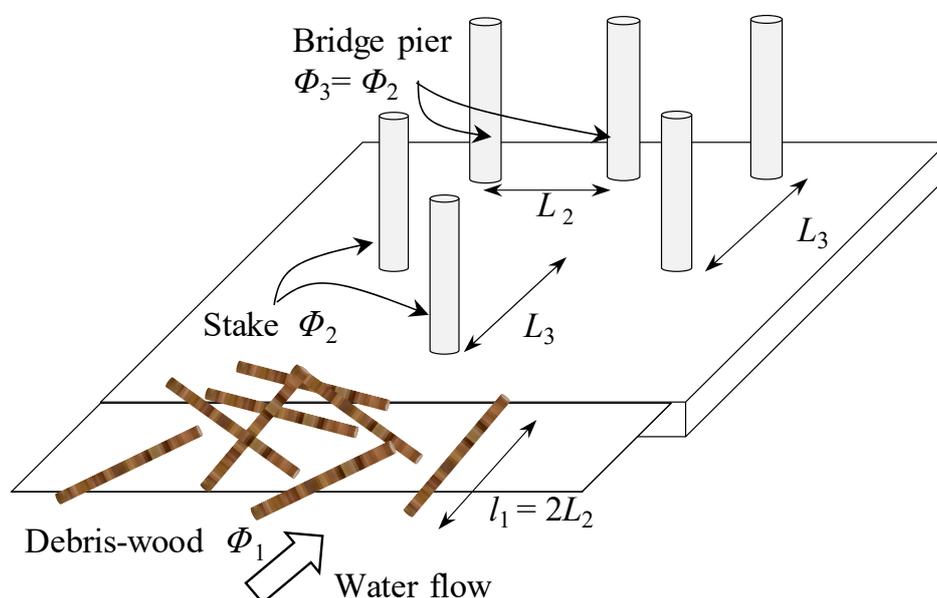


図-5.2 橋脚と木除杭の設置概要

表-5.1 実験条件

CASE	Φ_1 (mm)	L_1 (mm)	V_w	Direction of debris- wood	Stakes type	θ_1 (deg.)	L_3	q_{in} (ℓ/s)		
9-1	3	1,000	$1/s$ $*50s$	Perpendic ular	Without stake			1.0		
9-2								2.3		
9-3								2,000	Parallel	1.0
9-4										
9-5		1,000		Perpendic ular	B	90	1.0* l_1	1.0		
9-6		2,000					1.5* l_1			
9-7							1.0* l_1			
9-8							0.5* l_1			
9-9					Without stake					
9-10					A	90	1.0* l_1			
9-11			1.5* l_1							
9-12		Without stake			2.3					
9-13		B	90			1.5* l_1				
9-14						Without stake				
9-15		1.5* l_1								
9-16		3,000	50	Without stake						
9-17				B	45	1.5* l_1				
9-18			135							
9-19				Without stake						
9-20		1	2,000	$1/s$ $*50s$	Without stake					

※ Φ_1 (mm) : 流木径

L_1 (mm) : 水路延長

V_w : 流木の投入条件

Direction of debris-wood : 流水に対する流木の投入方向

(Perpendicular : 流れに対して横断方向, Parallel : 直線方向)

Stakes type : 木除杭の配置形式 (図-5.3)

θ_1 (deg.) : 杭の傾斜勾配

L_3 : 橋脚と杭等との中心間隔

q_{in} (ℓ/s) : 上部からの供給水量

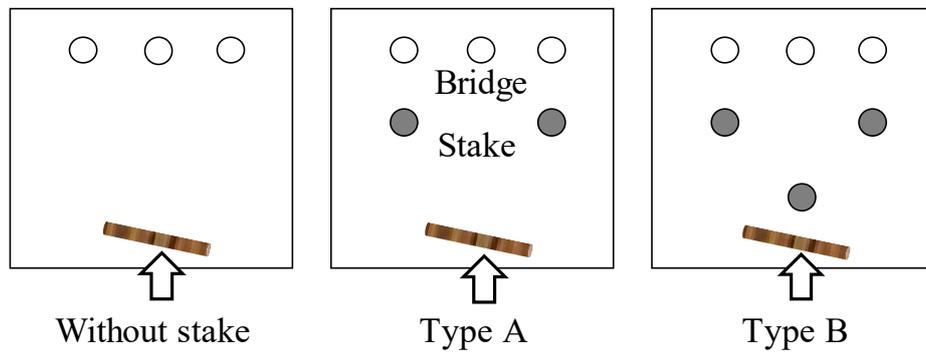


図-5.3 木除杭の配置形式

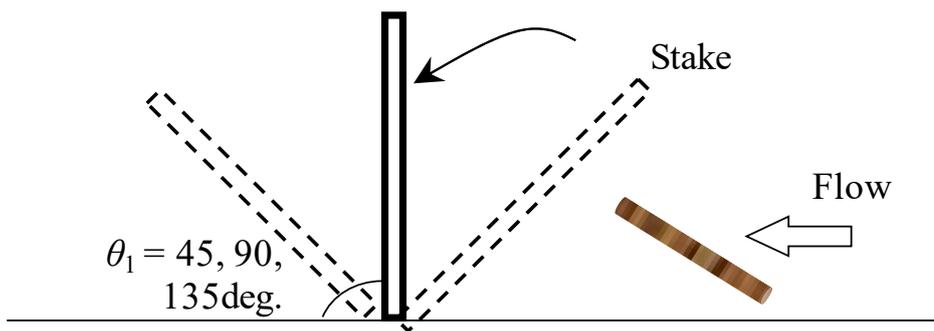


図-5.4 木除杭の傾斜角度

なお、一度に投入する流木の本数については、予備実験において全流木が千鳥配列における木除杭の1列目と2列目の空間内（図-5.3）に収まる最大の流木量としている。また、供給水量 q_{in} (1.0, 2.3 l/s) に対して、水深はそれぞれ約 1.1, 1.9 cm で、フルード数は約 1.3, 1.4 であった。ここで、本研究で期待する流木の杭による回転に伴う流木流向制御の概要を図-5.5 に示す。図-5.5 に示すとおり、流木が杭を軸として回転し、そのまま橋脚を通過する構造としている。なお、手動での流木投入による影響を低減させるため、実験は同じ条件にて3回実施している。

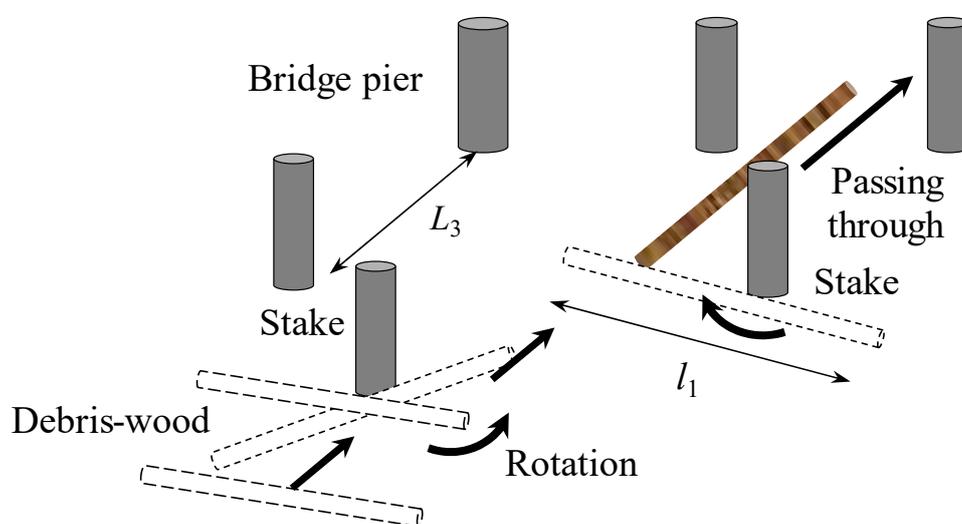


図-5.5 木除杭における流木流向制御の概要

実験結果において，橋脚部を通過して下流に流出した流木の割合（木除率） f_{wn} は，

$$f_{wn} = V_{wout} / V_w \quad (5-1)$$

と表される．ここに， V_{wout} は橋脚部を通過して流出した流木の本数， V_w は流木の投入本数である．以降に，条件の違いが木除杭の機能に与える影響に関して考察する．

上部からの供給水量 q_{in} (図-5.1) の違いによる木除率 f_{wn} の変化を図-5.6 に示す。なお、本実験結果は前述までの実験と比較して結果の一部がそれぞれ比較的分散しているため、それらの分散傾向を詳細に把握するために、各結果と平均値とを示している。図-5.6 に示すとおり、流量（及び流速）が大きくなるに伴って、木除率 f_{wn} が向上することが分かった。なお、流速が早い場合においては、流木が干渉を受けずに円滑に橋脚を中心に回転し、下流へ流出した。一方、流速が小さい場合には流木の回転が少し不安定となり、隣の橋脚に接触して閉塞することが分かった。ただし、流速が小さい場合における結果（木除率）の一部は約 50% であり、流量が大きい場合と比べて顕著な差がなかった。

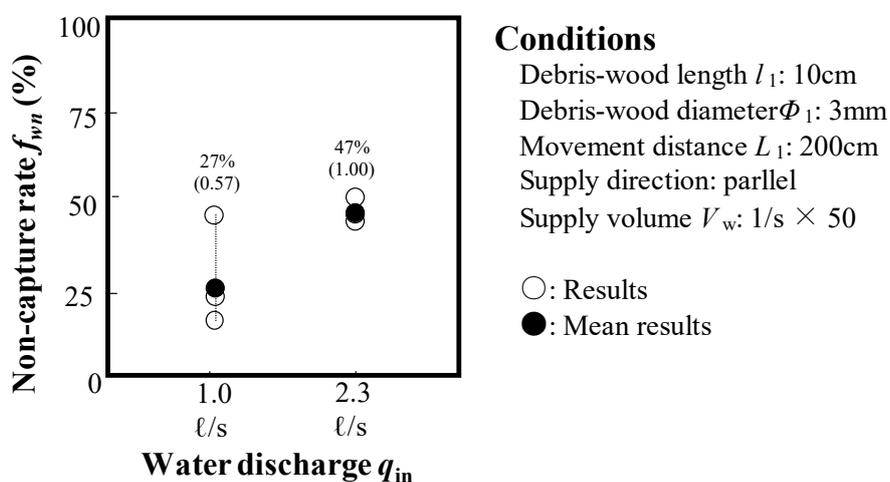


図-5.6 上部からの供給水量の違いによる木除率の変化

流木軸の投入方向の違いによる木除率 f_{wn} の変化を図-5.7 に示す。図-5.7 に示すとおり、流木を流れと同じ方向に投入した場合の木除率 f_{wn} は横断方向に投入した場合と比べて向上したが、顕著な差は無かった。

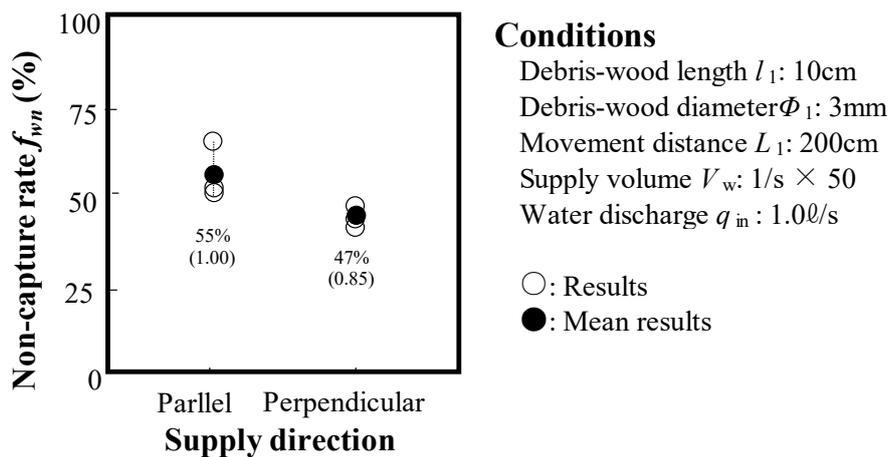


図-5.7 流木の供給条件の違いによる木除率の変化
 (流木を流れに対して直線方向，横断方向に投入)

流木の投入量 V_w の違い (1/s : 1 本/秒×50 秒, 50 : 1 度に 50 本) による木除率 f_{wn} の変化を図-5.8 に示す. 図-5.8 に示すとおり, 1 度に流木を投入した場合においては橋脚部での閉塞確率が増加 (木除率 f_{wn} が低下) することが分かった. これは, 既往研究⁴⁾で指摘されている流水中における流木密度の違いが閉塞に影響を与えたことによるものと考察される. ただし, 1 度に投入した場合の結果はあまり収束しておらず, 実験結果の一部においては木除率 f_{wn} が 40% 程度と同等であり, 投入方法 (量) の違いによる顕著な差が無い場合もあることが分かった.

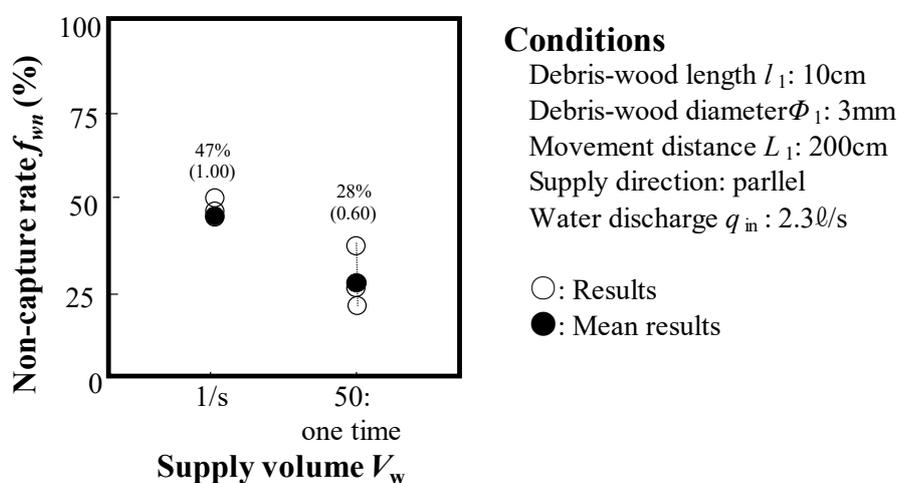


図-5.8 流木の供給条の違いによる木除率の変化

使用した流木直径 Φ_1 の違いによる木除率 f_{wn} の変化を図-5.9 に示す。図-5.9 に示すとおり、流木直径が大きくなるに伴って橋脚部で閉塞する傾向が示された。なお、この傾向は、既往研究⁴⁾で示された結果と一致している。ここで、石川ら³⁾は、前述のとおり、水路上の狭窄部における流木の捕捉率と、フルード数、流速、水深、狭窄幅、流木直径及び流木長との関係式を提案している。ただし、本実験によると、流れが速い場合においては流木が橋脚部を回転中に隣の橋脚に接触しても、流水の影響により新たに鉛直方向における流木の回転が加わって閉塞が回避（離脱）され、最終的な流木が橋脚間を通過することによるものであることが分かった。なお、フルード数が与える最終的な閉塞率については、図-2.31 に示される乱流による影響も要因の一つとして考察される。

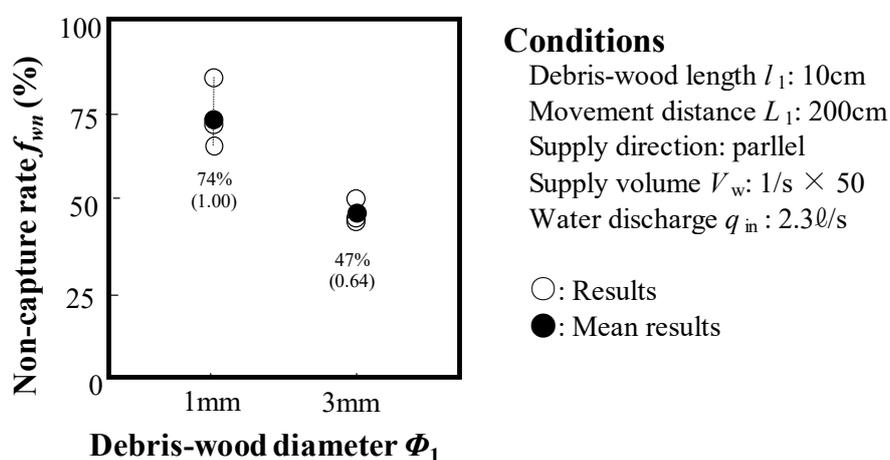


図-5.9 流木直径の違いによる木除率の変化

次に、木除杭の設置有無と平面配置形式 (Type A, Type B : 図-5.3) の違いによる木除率 f_{wn} の変化を図-5.10 に示す。図-5.10 に示すとおり、木除杭の設置に伴って木除率 f_{wn} が顕著に向上することが分かった (約 2 倍程度)。なお、木除杭の配置形式の違いに関して、Type B の方が Type A に比べて有利であることが分かった。これは、Type A の場合、木除杭間を通過した流木が中央の橋脚を中心に回転する際に、流木が隣接する橋脚 (ただし、 $L_2=0.5l_1$: 図-5.2) に接触したことによるものであった。

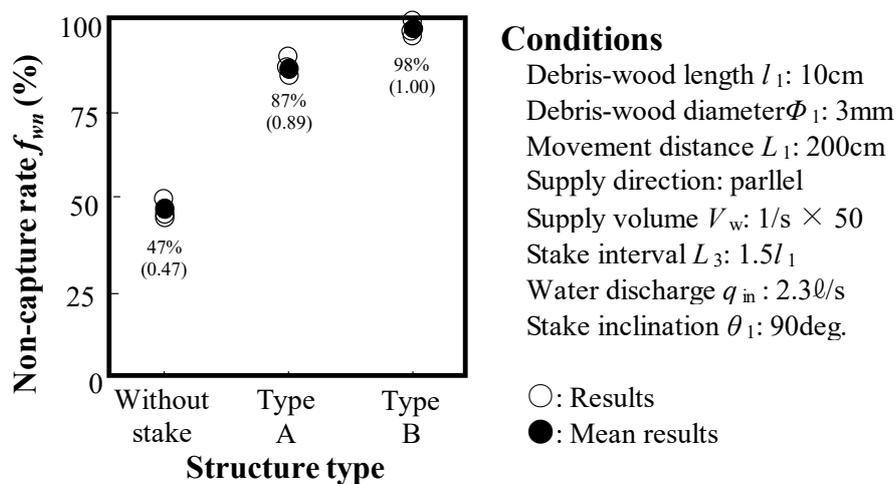


図-5.10 木除杭の有無と配置形式の違いによる流木除率の変化

配置形式 (Type B) における木除杭の間隔 L_3 (図-5.5) の違いによる木除率 f_{wm} の変化を図-5.11 に示す. 図-5.11 に示すとおり, 流木が木除杭を中心に円滑に回転させるためには, 木除杭の縦断方向における間隔 L_3 を広げることにより, 回転に必要な空間を確保する必要性が分かった. 本実験結果によると, 木除杭の縦断方向における間隔 L_3 については流木長 l_1 の概ね 1.5 倍以上が必要であることが分かった. なお, 予備実験において, 間隔 L_3 を流木長 l_1 の 2.0 倍にした場合の結果と 1.5 倍の結果との比較により, 両者において殆ど差がなかったことを事前に確認している.

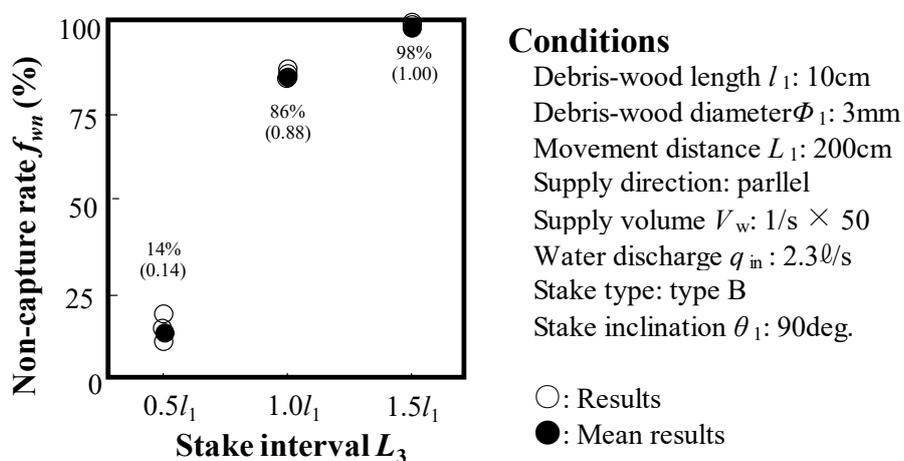


図-5.11 木除杭の配置間隔の違いによる流木除率の変化

最後に、木除杭の傾斜角度 θ_1 (図-5.4) の違いによる木除率 f_{wn} の変化を図-5.12 に示す。図-5.12 に示すとおり、上流側に杭を傾斜させた場合、流木の杭による回転が鉛直方向に対して不安定となり、顕著に円滑に回転しないことが分かった。一方、下流側に杭を傾斜させた場合、流木は途中まで回転するが、回転中に流れの影響を受けるため、回転途中で下流へ流出してしまうことが分かった。

これまでの結果より、橋脚における流木の閉塞対策として、木除杭の全橋脚を対象に千鳥配置(ただし、縦断方向における杭間隔は対象流木長の1.5倍程度)で垂直に設置した配置が有効であることが明らかとなった。

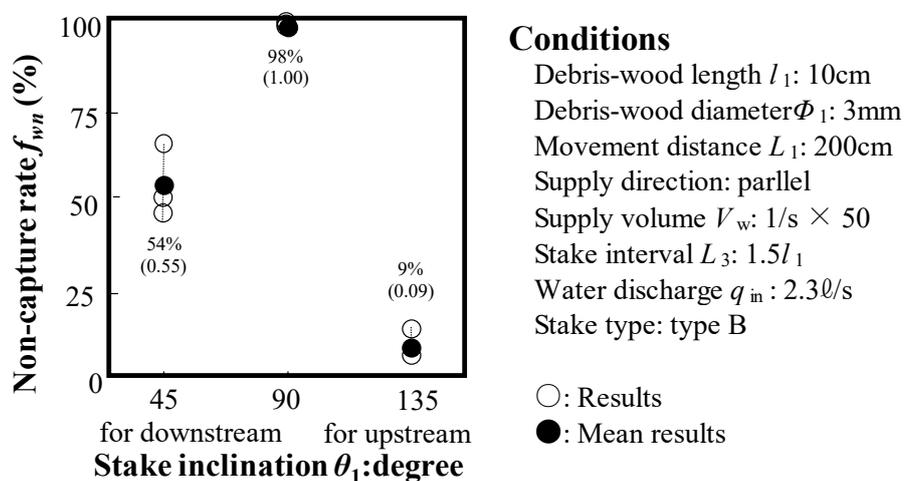


図-5.12 木除杭の傾斜角度の違いによる流木除率の変化

5. 2. 2 木除杭の高度化に伴う芥留効果の機能検証

5. 2. 1 において木除杭の高度化を目的に、新たに配置形式や構造について提案した。しかしながら、一方で木除杭は芥留杭としての機能も期待されており、木除杭として提案した杭配置等における芥留の機能についても検証する。

実験に使用した水路（図-5.1）及び杭の配置（図-5.2 及び図-5.3）は、5. 2. 1 と同様としている。なお、図-5.13 に示すとおり、芥（写真-5.4 左：長さ l_2 、径 2mm 程度の組紐、投入量 $V_t = 1/s \times 50s$ ）を流木と同様に、水路上流から投入（投入位置から構造物までの間隔 L ）し、芥留杭により捕捉された芥の本数 V_{ts} 、橋脚部で閉塞（捕捉）された芥の本数 V_{tb} 及び橋脚を通過して流出した芥の本数 V_{tout} をそれぞれ計測している。最後に、芥が混入した場合や、枝等を付属させて偏心させた流木（写真-5.4：右）の橋脚部における閉塞率 f_{wb} をそれぞれ計測している。

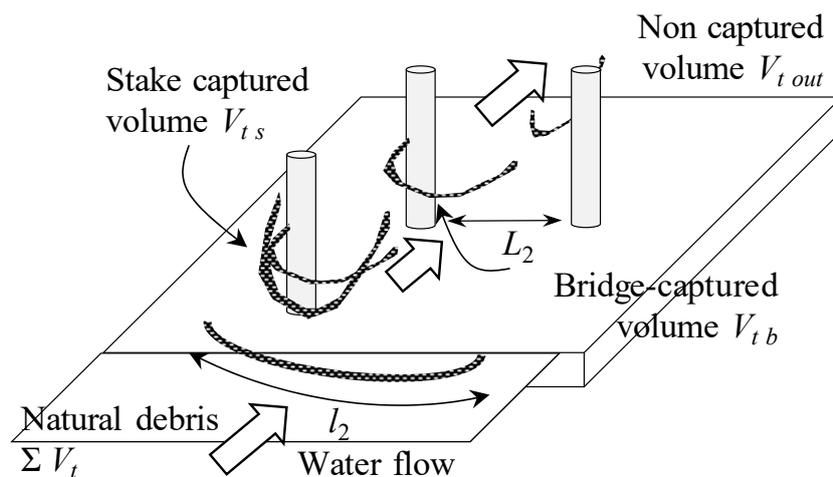


図-5.13 芥留機能に関する実験概要



写真-5.4 使用した芥材料（左）及び偏芯させた流木模型（右）の様子

実験条件の一覧を表-5.2 に示す。表-5.2 に示すとおり，芥長 l_2 ，芥留杭の設置有無（ただし，Type B：図-5.3），杭の傾斜角度 θ_1 （図-5.4），橋脚と杭等との間隔 L_3 （図-5.2）をそれぞれ変化させて芥留杭の機能について把握している。なお，芥が混入した場合における流木の橋脚部における閉塞率を CASE 10-7，枝を付属させて偏心（ただし，芥無し）させた閉塞率を CASE 10-8 の実験でそれぞれ把握している。

表-5.2 実験条件

CASE	Object	l_2 (mm)	Stakes type	L_3 (mm)	θ_1 (deg.)	q_{in} (ℓ /s)
10-1	Natural debris	100	Non-structure			2.3
10-2			B	150	90	
10-3				100		
10-4			150	45		
10-5				135		
10-6	Natural debris & debris- wood	100	B	150	90	2.3
10-7	Debris- wood with branch			150	90	

※ Object：投入材料

l_2 (mm)：芥長

V_w ：流木の投入条件

Stakes type：木除杭の配置形式（図-5.3）

L_3 ：橋脚と杭等との中心間隔

θ_1 (deg.)：杭の傾斜勾配

q_{in} (ℓ/s)：上部からの供給水量

実験結果において、橋脚部で閉塞された芥の割合 f_{ib} 、木除杭で閉塞された流木量の割合 f_{is} 及び橋脚部を通過して下流へ流出した流木量の割合 f_{in} とすると、それぞれ、

$$f_{ib} = V_{ib} / V_t \quad (5-2)$$

$$f_{is} = V_{is} / V_t \quad (5-3)$$

$$f_{in} = V_{out} / V_t \quad (5-4)$$

と表される。以降に、実験結果について考察する。

芥留杭の設置有無（ただし，Type B）と杭間隔 L_3 （図-5.2）の違いによる橋脚部における閉塞率 f_{tb} の変化を図-5.14 に示す．図-5.14 に示すとおり，芥留杭の設置に伴って，顕著に橋脚部での閉塞率 f_{tb} が低下（約 2 割程度まで低下）しており，芥留杭の効果が示された．なお，橋脚と杭との間隔 L_3 （図-5.2）の違いによる閉塞率の違いは殆ど確認されなかったため，間隔 L_3 については木除杭で提案された値（流木長の約 1.5 倍）で問題無いものと考察される．

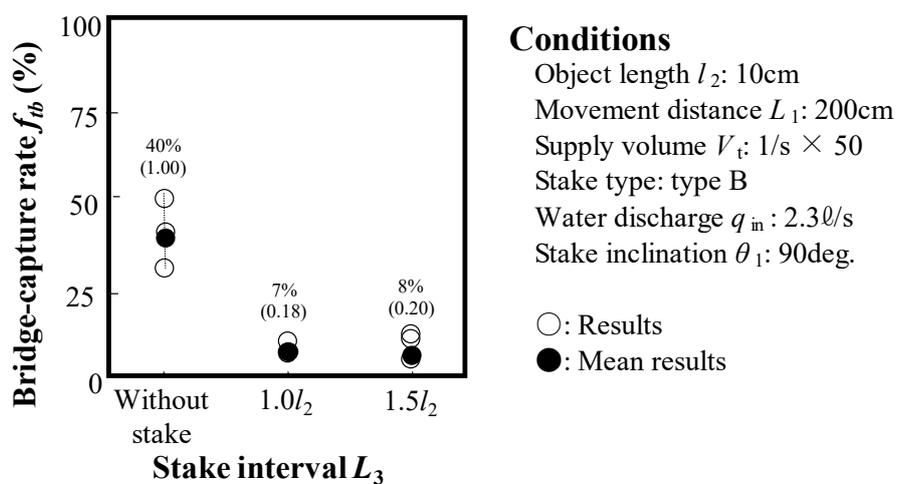


図-5.14 芥留杭の有無及び設置間隔の違いによる橋脚部閉塞率の変化

芥留杭の傾斜角度 θ_1 の違いによる杭部での捕捉率 f_{ts} と、橋脚部での閉塞率（捕捉率） f_{tb} の変化をそれぞれ図-5.15 及び図-5.16 に示す. 図-5.15 に示すとおり, 上流側に杭を傾斜させた場合, 杭部における芥の捕捉率 f_{ts} が向上した. ただし, 図-5.16 に示すとおり, 橋脚部での閉塞率 f_{tb} は殆ど変化がなかったため, 芥留杭としての機能に関して両者に違いはないものと考えられる. これは, 杭を上流側に傾斜させることによる杭周辺の流れの変化によるものであった. 一方, 下流側に杭を傾斜させた場合, 杭で芥を完全に捕捉できずにそのまま下流へ流出してしまい, 橋脚部での閉塞率 f_{tb} が向上した. これより, 本実験及び木除杭の結果では杭の傾斜角度 θ_1 は垂直での配置が有利であることが分かった.

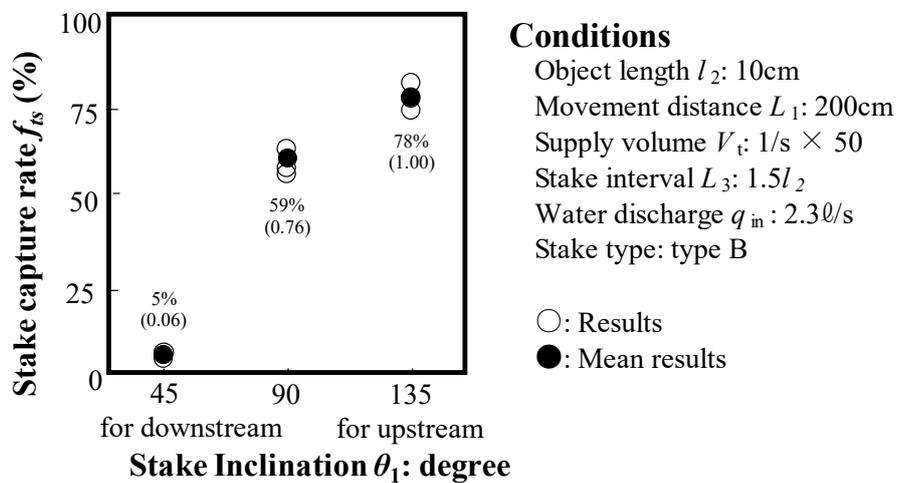


図-5.15 芥留杭の傾斜角度の違いによる芥留杭捕捉率の変化

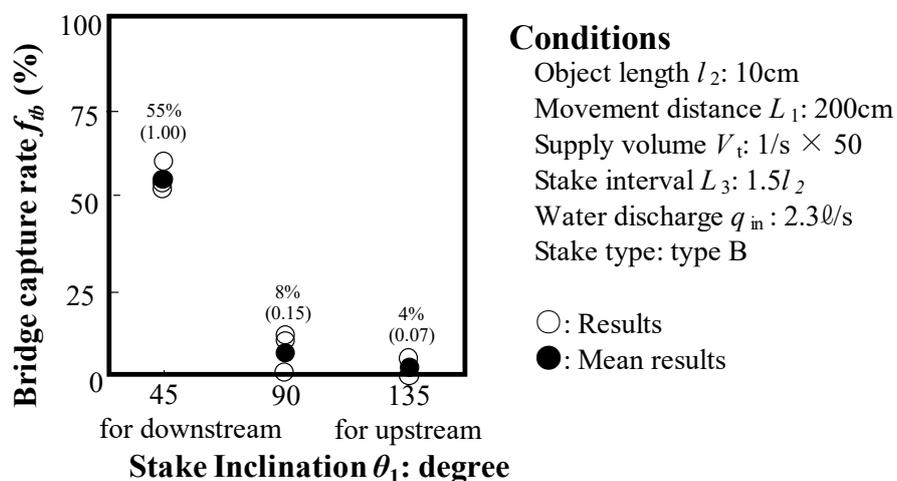


図-5.16 芥留杭の傾斜角度の違いによる橋梁部閉塞率の変化

最後に、芥の混入による橋脚部での閉塞率 f_{wb} と、枝付きにより偏心（ただし、芥無し）させた流木の橋脚部での閉塞率 f_{wb} の変化を図-5.17 及び図-5.18 にそれぞれ示す。図-5.17 に示すとおり、芥の混入に伴う橋脚部における流木閉塞率 f_{wb} については顕著な差がなかったが、閉塞率 f_{wb} が少し増加した。これは、橋脚部で捕捉されて巻きついた芥の影響を受けて杭部における流木の回転が不安定となり、結果として、隣接する橋脚に流木が接触して閉塞してしまったことによるものである。一方、枝を付属させて偏心（重心を端部より約 1/3 の位置に移動）させた流木（写真-5.4 右）の橋脚部における閉塞率に関して、図-5.18 に示すとおり、一部の枝付き流木が回転時に不安定となり杭部で一部閉塞したが、橋脚部での閉塞率 f_{wb} において顕著な差が無かったことより、木除杭としての顕著な機能低下はないものと考察される。

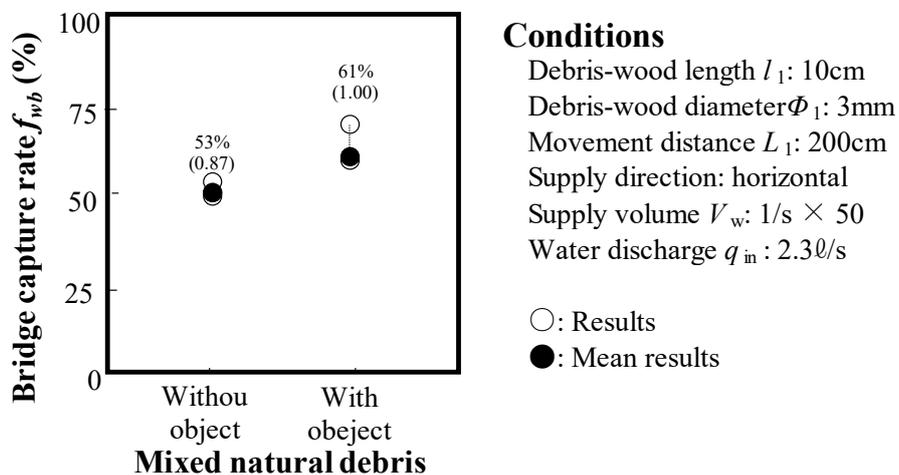


図-5.17 芥の混入有無の違いによる橋梁部閉塞率の変化

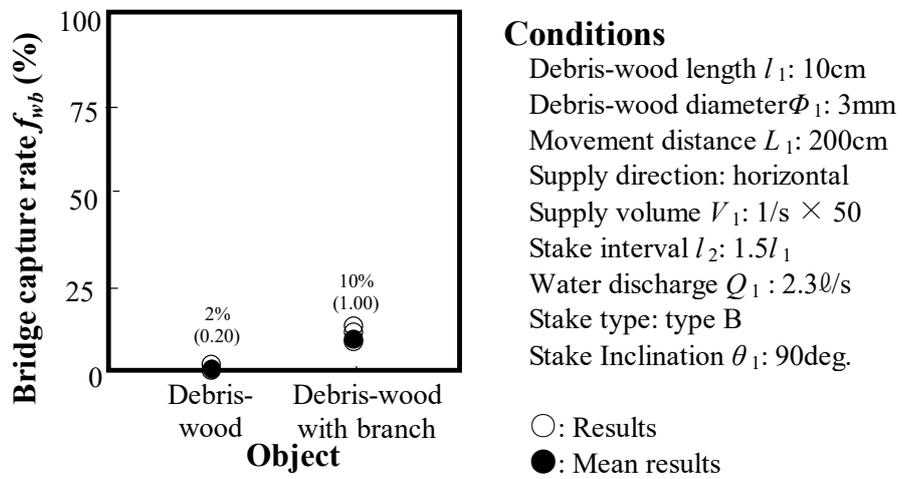


図-5.18 流木の偏心の違いによる橋梁部捕捉率の変化

5. 3 まとめ

古くから橋梁における流木等の対策として用いられてきた木除杭及び芥留杭の機能について、実験により考察するとともに、優位と考えられる杭の配置形式や構造について提案した。

本章で得られた成果を、以下に要約する。

- 1) 木除杭は流木の橋脚への直接的な衝突防止だけでなく、杭を中心とした回転による流木の流向制御に関する機能も期待できることが分かった。
- 2) 木除杭については、全橋脚を対象に杭を上流側へ千鳥に配置させるのが有効であることが分かった。その際、それらの流水方向における杭間隔は対象とする流木長に対して約1.5倍程度とし、垂直に杭を設置させるのが有効であることが分かった。
- 3) 芥留杭としての機能について実験により把握するとともに、木除効果において有効な杭設置時においても芥留機能がほとんど低下しないことを検証した。

参考文献

- 1) 流木災害軽減対策と河川流木管理に関する総合的研究，財団法人 河川環境管理財団，2008.
- 2) 竹林 洋史：2013年9月京都・滋賀水害調査報告，自然災害科学，Vol. 33，No. 1，pp.5-16，2014.
- 3) 石川芳治，水山高久，福澤 誠：土石流に伴う流木の発生及び流下機構，新砂防，Vol. 42，No.3，pp.4-10，1989.
- 4) 足立昭平，大同淳之：流木に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，Vol.1，pp.41-49，1957.

結 論

本研究は、山地河川において発生する土砂流出を伴う流木による災害対策に関して、実際に発生した流木発生や捕捉状況を現地調査に基づく不透過型砂防堰堤の流木捕捉機構に関する考察、不透過型砂防堰堤における鋼材による流木捕捉機能の付加に際しての課題抽出とその高度化の提案、部分透過型砂防堰堤における流木捕捉機能の解明、コンクリート・スリット堰堤における流木処理機能の解明とその高度化の提案、土地利用や維持管理を考慮した流木捕捉工の提案、木除杭及び芥止杭における流木対策機能の解明とその高度化の提案により、実務者の流木対策工に関する計画や設計に際しての技術的課題の解決やそれらの高度化を目的として、特に、流木の回転運動に着眼して行われたものである。

第 1 章では、九州北部豪雨災害において発生した流木の流出に関して、既設の不透過型砂防堰堤における流木の捕捉状況の違いや施設周辺の痕跡等より、流木の発生及び流出の機構（例えば、土砂と流木の発生時期の違い）について考察した。結果として、既往研究や本災害における流木捕捉事例より、流木の流下時に不透過型砂防堰堤の直上流部が湛水している場合、これらの流れの影響を受けた流木の挙動や回転運動により、顕著に流木を捕捉することが明らかとなった。また、調査対象とした不透過型砂防堰堤（5 施設）における土砂や流木の捕捉状況、既往知見（例えば、根系の緊縛力によるせん断抵抗力）より、流木は土砂と比較して遅れて生産及び流下する可能性が分かり、流木対策の計画に際してはこれらの流木発生時期等の機構について考慮すべき重要性を示した。

第 2 章では、現在の設計に際して不明瞭な点が残されている不透過型砂防堰堤における鋼材を用いた流木対策の機能向上を目的に、室内の水路実験によって、流木の回転や捕捉機構を考慮した流木対策の計画や設計における留意点について示した。さらに、流木の回転に着眼した流木対策工の付加構造（流木を回転制御させる越流堰）について新たに提案するとともに、流木の回転機構について考察した。結果として、不透過型砂防堰堤の上部に鋼製部材を配置した構造（部分透過型砂防堰堤）による流木捕捉効果は、従来の副堰堤（前庭部）での流木捕捉効果と比較して有効であることが分かった。この要因は、副堰堤での流木捕捉の場合、上流の本堤（水通し）からの落差に伴って落下する際に顕著に流木（軸）が流れ方向へ回転し、そのまま副堰堤の流木捕捉工（鉛直杭）間を通過してしまうことによるものである。一方、部分透過型砂防堰堤における除石管理有（未満砂）は、除石管理無（満砂）時と比べて効果的に流木を捕捉できることが明らかとなった。この要因は、除石管理有の場合、初期段階の流木は不透過部構造である堰堤直上流の湛水域における背水のため、湛水域において鉛直流等の影響を受けて各方向に回転しながら捕捉工を通過せずに湛水内を浮遊流動し、その後、段階的に湛水域において上流から進行する堆砂デルタに取り込まれていくことによるものである。さらに、部分透過型砂防堰堤（ただし、除石管理無）における流木捕提高は、水深程度（約 1.0 倍から 1.2 倍程度）までであることが分かった。なお、砂防堰堤（本堤部、前庭部）を通過する流木は、流れ（例えば、上流の流速や上下流の流速差等）の影響に応じて回転しながら流下することが分かり、捕捉機能を向上させるにはこれらの影響を考慮する必要があることを示した。さらに、従前の前庭部における流木捕捉工（捕捉杭）に加えて、その直上流に越流堰（ただし、四角断面）を併設した場合、流木の捕捉に対して有利な方向に回転させることが出来るため、捕捉杭部での捕捉効果が顕著に向上することが分かった。なお、杭部で一旦捕捉された流木は、流れ（乱流）の影響を受けて揺動し、最終的に捕捉された杭より離脱して下流へ流出する現象が分

かった。一方、落水直上流等の安定した限界流付近に設置された捕捉杭においては、捕捉された流木の揺動は殆ど見られず、そのまま捕捉効果は維持されることが分かった。

第3章では、今後の緩勾配区間における既設砂防堰堤の流木対策機構も考慮した流木対策計画の策定に際して、これまで殆ど議論されてこなかったコンクリート・スリット堰堤における流木処理機能及びその高度化に関して、実験により明らかにした。結果として、堰堤（スリット部）の直上流部における背水に伴って発生する湛水面での平面渦流等の影響を受けて、横断方向へ流木が運搬され、多くの流木が湛水部で一旦貯留される効果（調節効果）が分かった。一方、供給停止後においては背水の消失に伴って、多くの流木がスリット間を通過して下流へ流出していく危険性が分かった。そこで、スリット部からの流出する流木量を低減させる流木流出防止構造（流木捕捉工）を提案した。その際、常時におけるスリット部を通過する流水阻害の影響を軽減するため、阻害率（断面積）が小さい線材を網状的に配置させる構造とした。なお、各部材の流木捕捉に関して、斜部材は水位変化における流木捕捉に対して有効であり、水平部材は捕捉された流木の安定化に対して有効であることが分かった。また、縦部材は通過時において回転する流木に対して、通過幅を狭くすることにより線材と接触とさせて捕捉するための重要な部材であることが分かった。

第4章では、九州北部豪雨災害において発生した流木流出機構や維持管理を考慮して、流域の地形特性等を考慮した新たな流木対策工について提案するとともに、この提案する流木対策工の捕捉効果に関して、急拡水路実験によって、上下流の勾配変化等に伴う流速の変化が与える流木の回転への影響について更に考察を加えた。結果として、流木の挙動や維持管理、土地利用等を考慮するため、土石流氾濫開始地点等の谷出口付近における地形条件を活用した遊水構造による流木対策工を今後の流木対策の一つとして提案し、実験により流木捕捉の機能向上における有効性について示した。また、流れの変化（急勾配から緩勾配への変化地点）部付近で流木は顕著に回転することが明らかとなった。

第5章では、これまで経験的に用いられて、設計手法が明らかにされていなかった橋梁における木除杭及び芥留杭の機能について、実験により考察するとともに、優位と考えられる杭の配置形式に関する高度化について提案した。結果として、木除杭は流木の橋脚への直接的な衝突防止だけでなく、杭を中心とした回転による流木の流向制御による橋梁の閉塞防止も期待できることが実験により明らかとなった。また、木除杭については、全ての橋脚の上流側への千鳥による配置が有効であることが分かった。その際、それらの流水方向における杭間隔は対象とする流木長に対して約1.5倍程度とし、垂直に杭を設置させることが優位であることが分かった。一方、芥留杭としての機能についても併せて実験により把握するとともに、木除効果に有効な杭設置時においても芥留機能が低下しないことを検証した。また、芥の混入や偏心した流木における木除効果については、顕著な機能低下は見られなかった。

これらより、構造物での流木対策を講じる際、水の流れの影響を受ける流木の回転に関する重要性について示したほか、設計担当者が効果的に流木対策について検討するための各流木対策工の検討における留意点や対策手法の高度化について基礎的な室内実験に基づき提案した。今後、更なる研究の高度化が望まれる。なお、本研究において示した不透過型砂防堰堤における流木捕捉機構、鋼材による流木捕捉機能における高度化手法、部分透過型砂防堰堤の流木捕捉機能、コンクリート・スリット堰堤における流木処理機能とその高度化手法、土地利用や維持管理を考慮した流木捕捉工、木除杭及び芥止杭における機能とその高度化手法が、山地において発生する土砂流出を伴う流木による災害対策に関する研究の進展に寄与し、設計実務者や行政担当者が流木による災害の防止を検討、実施する上での一助となれば幸いである。

謝 辞

本論文をとりまとめる貴重な機会を筆者に与えて下さるとともに、本研究をまとめるにあたり熱心なご指導を賜りました京都大学大学院農学研究科 小杉賢一朗教授に感謝いたします。また、本論文に対して貴重なご助言を賜った京都大学大学院農学研究科 柴田昌三教授及び京都大学防災研究所 藤田正治教授に感謝いたします。さらに、本研究を進めるに際して、水山高久京都大学名誉教授（現 政策研究大学院大学特任教授）及び立命館大学理工学部 里深好文教授におきましては、格別のご指導を賜りました。京都大学大学院農学研究科 中谷加奈助教には、研究を進める際のご助言や援助をいただきました。

京都大学大学院農学研究科山地保全学研究室及び立命館理工学部流域デザイン研究室の皆様には、著者の研究活動を行う中で大変お世話になりました。特に、高山翔揮氏、坂本良祐氏、松元志津佳氏、内藤秀弥氏には、実験に際して多くのご協力をいただきました。また、正岡直也研究員、沖縄大学 糸数哲助教、立命館大学理工学部 藤本将光准教授、事務の福田路子様をはじめ、研究室の皆様には本研究に対する有益なご助言をいただきました。富山大学都市デザイン学部 木村一郎教授には、流木の挙動等に関するご助言をいただきました。さらに、研究の機会を与えて頂いた土木研究所、国土交通省や各地方公共団体の砂防施設管理者、アジア航測株式会社、一般社団法人 建設コンサルタント協会 砂防・急傾斜専門委員やその他の民間技術者等の関係各位に感謝いたします。

本研究は皆様のご協力やご助言、多くの議論や交流によるところが大きく、本研究を進める上で多大な原動力となりました。皆様に感謝いたします。

最後に、三井共同建設コンサルタント株式会社の各位には多大な御支援をいただきました。ここに記して、心から感謝の意を表します。