

オンライン講演会

新たな土石流・流木対策の試み

期日：令和4年6月24日（金）14:30～17:15

場所：永田町ビル4階会議室（東京都千代田区）

オンライン（Zoom利用）

主催：森林部門技術士会

共催：（公社）日本技術士会森林部会

テーマ：新たな土石流・流木対策の試み

次第：

開会 14:30

講演1 14:35-15:25（50分）

新たな流木捕捉技術（独立基礎型流木捕捉工）の開発と今後の課題について

中澤敏雄

（中部森林管理局伊那谷総合治山事業所長、技術士）

講演2 15:30-16:20（50分）

『流木を立木で制する』ひょうご式治山ダムの推進

太田雄一郎

（兵庫県治山林道協会常務理事、技術士）

講演3 16:25-17:15（50分）

新たな数値シミュレーション手法を用いた流木被害軽減手法の検討

鈴木拓郎

（国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所主任研究員、博士）

閉会 17:15

（担当：森林土木部会）

森林部門技術士会：オンライン講習会「新たな土石流・流木対策の試み」について

新たな流木捕捉技術（独立基礎型流木捕捉工） の開発と今後の課題について

令和4年6月24日

林野庁 中部森林管理局 伊那谷総合治山事業所長 中澤敏雄（技術士）

内 容

1. 気象変動に伴う山地災害の発生形態の変化
（洪水流量の増加による流木災害の激甚化）
2. 流木対策を中心とする施設配置計画の検討
3. 既設治山ダムを活用した流木捕捉工の開発
（独立基礎型流木捕捉工の開発）
4. 独立基礎型流木捕捉工ガイドラインの策定
5. まとめ（今後の課題について）

1. 気象変動に伴う山地災害の発生形態の変化 (洪水流量の増加による流木災害の激甚化)

気候変動に伴う降雨の形態変化について

■近年における豪雨形態の状況について

令和2年7月豪雨、令和元年東日本台風、平成30年7月豪雨においては、強度の強い豪雨が長時間続く傾向が見られるようになってきているところ

①一連の豪雨による総降水量の歴代記録を更新

順位	年	月	旬	総降水量の総和 (mm)	1地点あたり (mm)	備考
1	2020	7	上旬	208,269.0	216.1	令和2年7月豪雨
2	2018	7	上旬	207,529.5	215.3	平成30年7月豪雨
3	1993	8	下旬	199,070.0	206.5	
4	2017	10	下旬	191,532.0	198.7	
5	1990	8	中旬	191,325.0	198.5	
6	2014	8	上旬	173,754.0	180.2	平成26年8月豪雨
7	1999	8	下旬	161,027.5	167.0	
8	1995	7	上旬	158,514.0	162.4	
9	1989	8	上旬	154,304.0	160.1	
10	1983	9	下旬	148,924.0	152.4	

(出典)気象庁HP

②短期間豪雨の発生回数の歴代記録を更新

順位	年	月	旬	発生回数	備考
1	2020	7	上旬	62	令和2年7月豪雨
2	2019	10	中旬	60	令和元年東日本台風
3	1993	9	上旬	67	
4	1998	9	下旬	66	
4	2012	7	中旬	66	平成24年7月九州北部豪雨
6	2018	7	上旬	66	平成30年7月豪雨
7	2014	8	上旬	65	平成26年8月豪雨
8	2016	9	中旬	59	
9	2017	9	中旬	59	
10	1990	9	中旬	58	

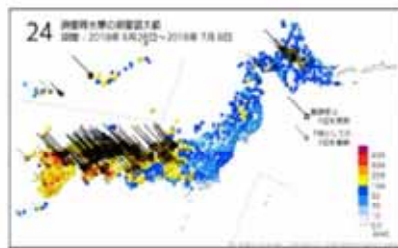
(出典)気象庁HP

■線状降水帯の形成による広域での豪雨発生

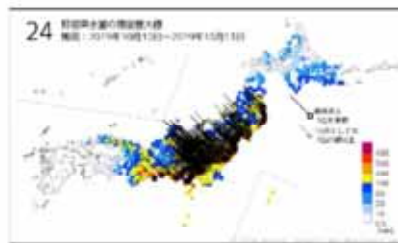
	令和2年7月豪雨	平成30年7月豪雨	平成29年7月九州北部豪雨
集計期間	2020年7月3日12時～8日12時	2018年7月5日00時～8日24時	2017年7月4日00時～5日24時
発生事例数 九州での事例数	9	14	2
出現地域	九州で多数発生	西日本の広範囲にわたって分布	局部的

(出典)気象庁HP

■豪雨記録の相次ぐ更新



平成30年7月豪雨による
24時間雨量の状況
(出典)気象庁HP)
→7.6地点で歴代1位を更新



R19 東日本台風による
24時間雨量の状況
(出典)気象庁HP)
→10.3地点で歴代1位を更新

■気候変動に伴う今後の降水量等の予測について

- ・パリ協定に係る気候変動シナリオでは、2030年代には21世紀末と同等(2℃上昇相当)レベルまで気温が上昇すると予測
- ・降雨量、流量、洪水発生頻度の急増が近い将来見込まれる状況

<参考> 降雨量変化率をもとに算出した、流量変化率と洪水発生頻度の変化

気候変動シナリオ	流量率	雨量	洪水発生頻度
RCP2.6(2℃上昇相当)	約1.1倍	約1.2倍	約2倍
RCP4.5(1.4℃上昇相当)	約1.3倍	約1.4倍	約4倍

(出典)第1回流域治水の推進に向け九関係省庁実務者会議-国土交通省提出資料(抜粋)

(出典)豪雨災害に関する今後の治山対策のあり方検討会(とりまとめ)(令和3年3月林野庁)

気候変動に伴う山地災害の発生形態の変化について

・豪雨形態の変化により降水量・洪水流量が増えることによって、尾根部付近からの崩壊による土砂流出量の増大、線状降水帯の形成に伴う山地災害の同時多発的発生、長時間豪雨による深層崩壊の発生、さらには崩壊、土砂流出に伴い大径化した人工林等からなる流木災害の激甚化が見られるところ。

■山地の尾根部付近からの崩壊による土砂流出量の増大 (平成30年7月豪雨・令和元年東日本台風)



■線状降水帯の形成による崩壊の同時多発発生 (平成30年7月豪雨(広島県他))



■長期間豪雨による深層崩壊の発生 (平成23年紀伊半島大水害)



■洪水流量の増加による流木災害の激甚化 (平成29年九州北部豪雨)



(出典：豪雨災害に関する今後の治山対策のあり方検討会（とりまとめ）（令和3年3月林野庁）

近年の災害特性を踏まえた治山対策の新たな取組について

・林野庁では、気候変動を踏まえた治山対策を進めるため、有識者による議論を経て、豪雨災害に関する今後の治山対策の在り方のとりまとめを令和3年3月に公表。このとりまとめも踏まえ、森林の浸透・保水機能の向上対策と流木対策等の取組を進めているところ。

今後の治山対策の方向性

豪雨の激化を踏まえたきめ細やかな治山ダムの配置、森林整備と簡易土工法を組み合わせた森林の浸透・保水機能の向上対策、危険木の除去等による流木対策等を推進していくことを有識者会議でとりまとめ。（令和3年3月）

● 豪雨に起因する崩壊・土砂災害の発生防止
● 森林の浸透・保水機能の向上
● 危険木の除去等による流木対策
● 簡易土工法による治山対策
● 森林の整備と簡易土工法を組み合わせる

(出典：「豪雨災害に関する今後の治山対策の在り方検討会」とりまとめ（令和3年3月 林野庁）
https://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/attach/pdf/con_3-67.pdf)

流域治水の取組と連携した治山対策

極端な降雨の増加を踏まえ、流域治水と連携し、森林の有する保水機能を維持・向上させる筋工等の設置と間伐等の保安林整備を組み合わせた治山対策に取り組んでいる。

保安林の整備と筋工の設置状況（静岡県浜松市）

試験地の様子

林野庁では、筋工を設置することによる森林土壌の浸透能に及ぼす効果等の実証試験を実施。（神奈川県清川村、令和3年8月）

流木災害対策

平成29年九州北部豪雨災害における流木災害を契機として、各地で流木捕捉式治山ダムの設置や既存施設への流木捕捉機能の付加、危険木の除去等の流木対策に取り組んでいる。

既設ダム

流木の捕捉状況（令和3年8月）

既設治山ダムの上流側に流木捕捉機能を付加する取組（岐阜県恵那市、中部森林管理局）

ICTの活用

山地災害の多発を踏まえ、被災箇所からの早期の復旧に向けて、ICTの技術を活用することで、工事の効率化・迅速化に取り組んでいる。

3Dレーザースキャナーによる現地測量（近畿中国森林管理局）

ICTバックホウによる施工（GNSS受信により基準点で座標を取得し、設計断面のとおり斜面を整形）（福井県あわら市）

(出典：近年の大規模山地災害からの復旧に向けた取組状況について（令和4年4月林野庁）

2. 流木対策を中心とする施設配置計画の検討

流木災害防止緊急治山対策プロジェクト

緊急点検：崩壊土砂流出危険地区及び山腹崩壊危険地区等について、
緊急点検を実施 **全国約18万地区**

点検結果：緊急的・集中的に流木対策が必要な地区 **全国約1,200地区**



緊急対策：概ね3年間 対策費：約600億円（事業費ベース）

「流木災害等に対する治山対策検討チーム」中間取りまとめ
を踏まえた、以下の対策を実施

- ・ **流木捕捉式治山ダムの設置**
- ・ 間伐等による根系等の発達促進
- ・ 流木化する可能性の高い流路部の立木の伐採 等

（林野庁HPより）

流木対策を中心とする施設配置計画 (土石流・流木対策指針解説等より抜粋)

●計画位置

①治山ダムの配置

- ・ 捕捉した流木を取り除くことができるよう、その後の管理方法を検討

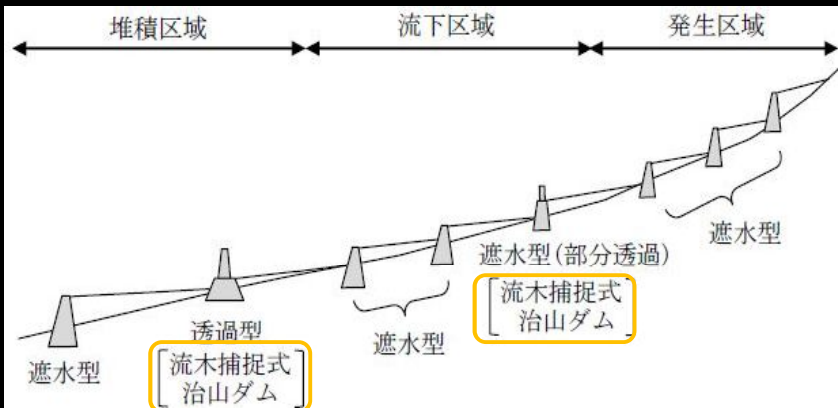
②流下区域

- ・ 流木を効果的に捕捉するための流木捕捉式治山ダムの設置

③堆積区域

- ・ 流木の流出拡大を防止するための流木捕捉式治山ダムの設置等

既設治山ダム(遮水型)への流木捕捉機能の付加等を検討



治山施設の配置例 (流木対策)

透過型治山ダム

(出典：平成30年度 中部森林技術交流発表会「既設治山ダムを活用した流木捕捉工の開発」(平成31年 1月中部森林管理局))

●既設治山ダムへの流木捕捉機能の付加



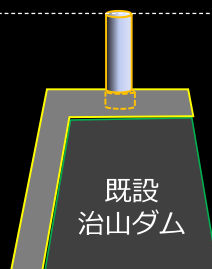
遮水型の治山ダム



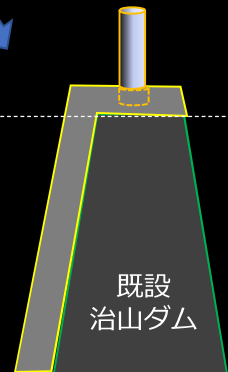
透過型の治山ダム



既設 治山ダム



切り下げ方式



嵩上げ方式

遮水型→透過型への改良パターン

●遮水型→透過型への改良における諸課題

(切り下げ方式の場合)

作業②：既設ダム切り下げ

- ダム本体の安全性低下
- 専用機械の確保

**作業①：堆積土砂の除去
廻排水路の確保**

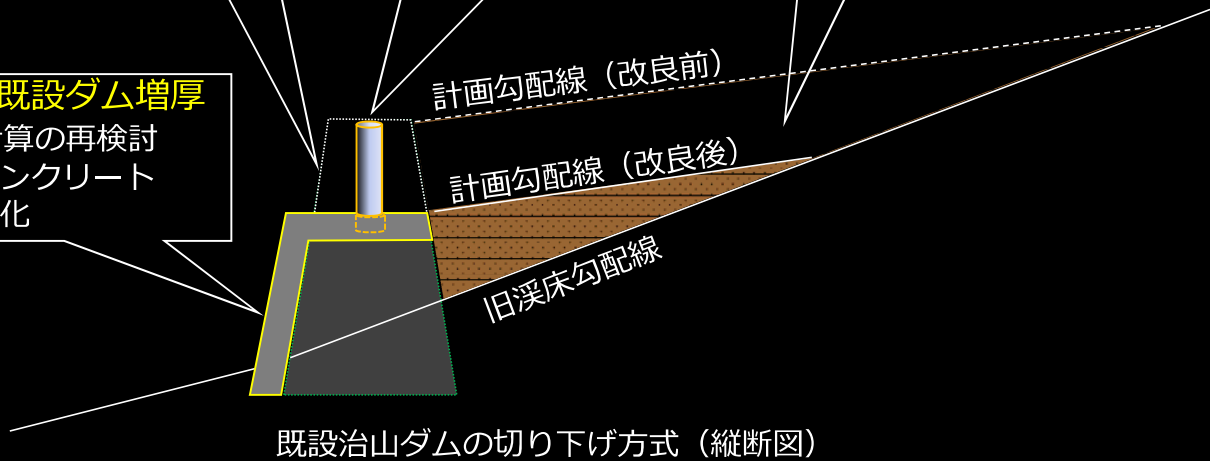
- 山脚固定効果が低下
- 既設治山ダム等の連続性
- 大量の残土処理
- 施工中の廻排水路

作業④：スリット構築

- スリット部材に制約

作業③：既設ダム増厚

- 安定計算の再検討
- 新旧コンクリートの一体化



3. 既設治山ダムを活用した流木捕捉工の開発
(独立基礎型流木捕捉工の開発)

既設治山ダムを活用した流木捕捉工の開発

●設計条件（地盤支持力）の検証

安定計算の地盤反力度

下流側： **105.59** (kN/m²)
上流側： **2.85** (kN/m²)

許容地盤支持力

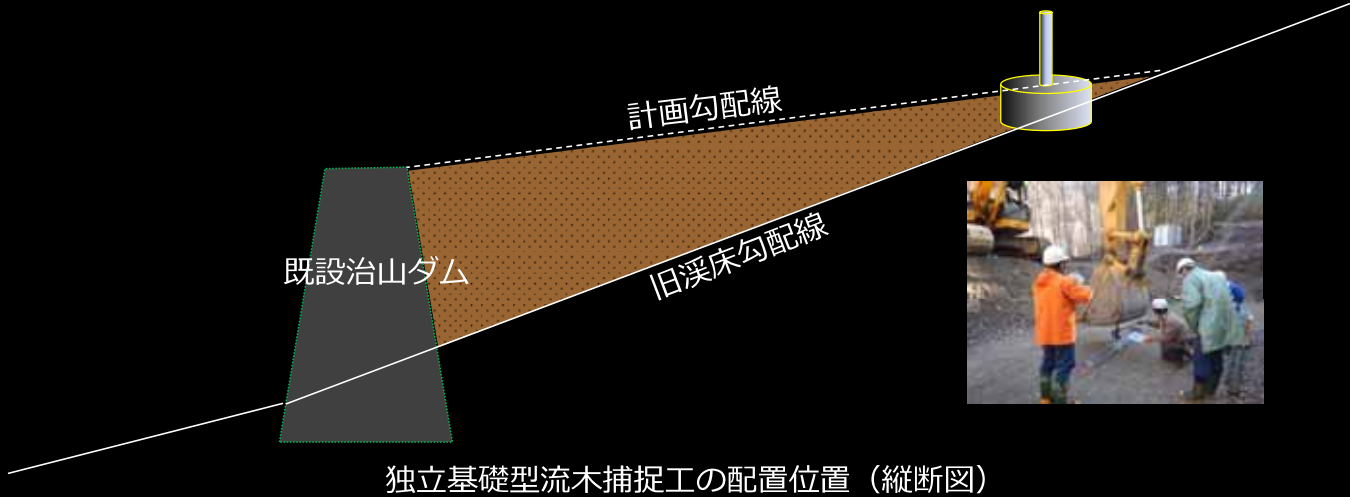
300.00 (kN/m²)

一点载荷試験

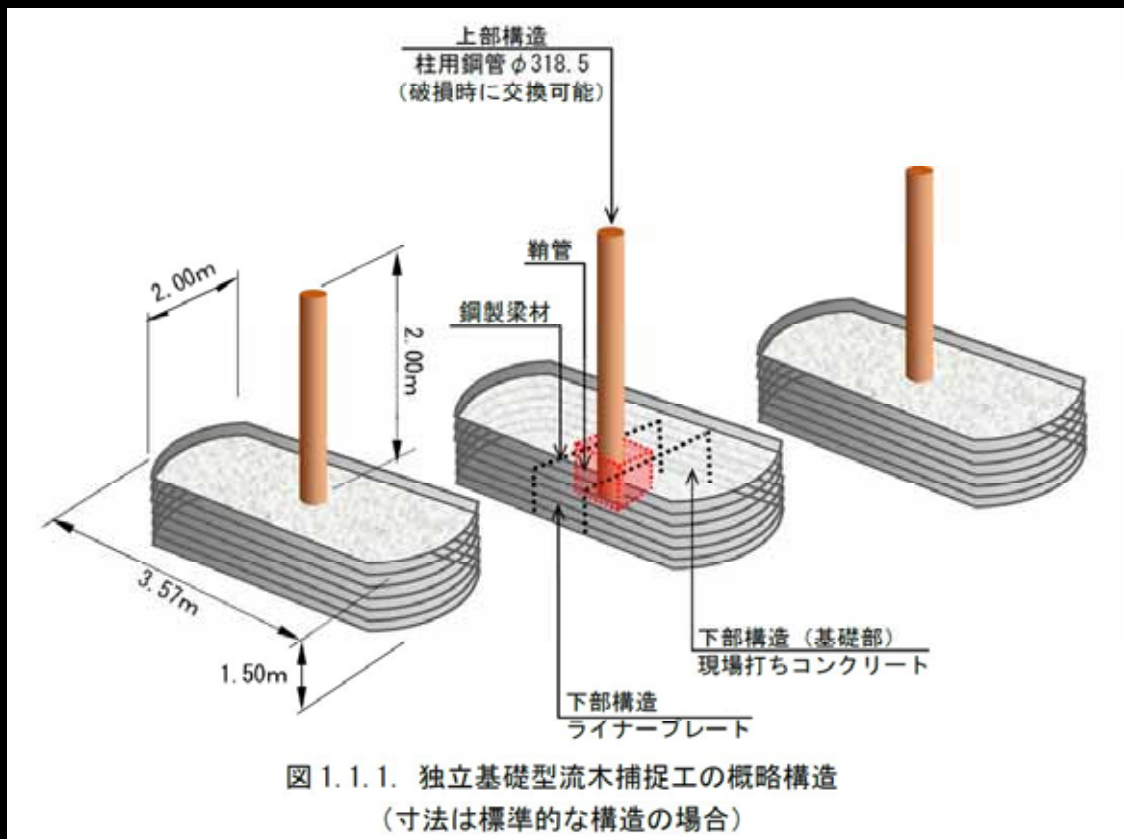
最低値

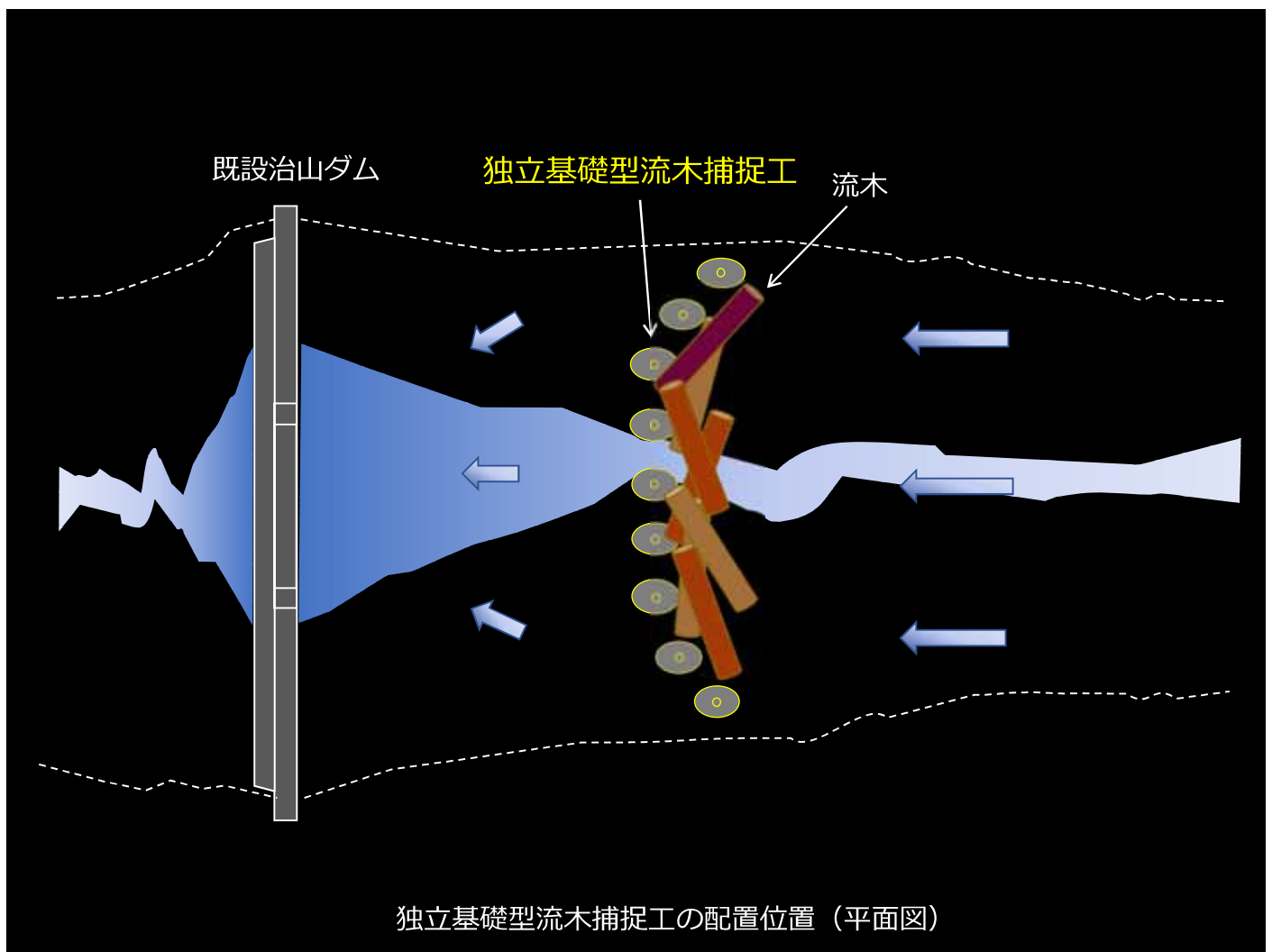
324.00 (kN/m²)

独立基礎型流木捕捉工



独立基礎型流木捕捉工の概略構造





独立基礎型流木捕捉工（平成30年12月完成） 東濃森林管理署管内：岐阜県恵那市ホコロ沢



令和3年8月14日 7:00（定点カメラ：右岸上流）



令和4年5月16日 13:00（定点カメラ：上流）



令和3年9月10日（地上カメラ：下流側より）



令和3年9月（ドローンカメラ：下流側より）

独立基礎型流木捕捉工（令和3年1月完成） 富山森林管理署管内：富山県魚津市東又谷

流木捕捉状況
（定点カメラ:左岸）
令和4年4月26日
7:00



流木捕捉状況
（定点カメラ:上流）
令和4年4月26日
7:00



令和4年4月27日
7:00



令和4年4月27日
7:00



令和4年4月28日
13:00



令和4年4月28日
13:00



独立基礎型流木捕捉工（令和3年1月完成） 富山森林管理署管内：富山県魚津市東又谷

流木捕捉状況
（カメラ:左岸上流より）
令和4年5月30日



流木捕捉状況
（カメラ:左岸下流より）
令和4年5月30日



独立基礎型流木捕捉工の施工手順

施工前

中信署管内：シシ沢復旧治山



東濃署管内：ホコロ沢復旧治山



① 床掘



② 下部構造／ライナープレート組立

中信署管内：シシ沢復旧治山



東濃署管内：ホコロ沢復旧治山



③ 下部構造／ライナープレート据付・連結



④ 中間構造／接続部(試作品)の組立・設置

中信署管内：シシ沢復旧治山



東濃署管内：ホコロ沢復旧治山



⑤ 下部構造／設置・埋戻し



⑥ 下部構造／コンクリート打設

中信署管内：シシ沢復旧治山



東濃署管内：ホコロ沢復旧治山



⑦ 上部構造／スリット据付



⑧ さや管への砂充填

中信署管内：シシ沢復旧治山



東濃署管内：ホコロ沢復旧治山



⑨ さや管表面のコンクリート充填



独立基礎型流木捕捉工の施工性

●作業時間

作業内容	所要時間	作業日(9基)
① 床掘	66分/基	約1.5日
② ライフプレート組立	30分/基	
③ ライフプレート据付・連結	45分/基	約2.0日
④ 接続部の組立・設置	10分/基	
⑤ 埋戻し	60分/基	約1.5日
⑥ コンクリート打設	30分/基	約0.5日
(コンクリート養生)		(中3日)
⑦ スリット据付⑧⑨砂コンクリート充填	20分/基	約1.0日

} 約9.5日

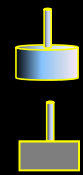
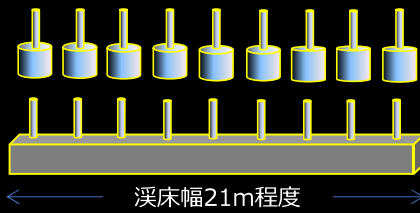
流木捕捉工の経済性

● 各種透過型治山ダムのコスト比較

流木捕捉工

(独立基礎型:ライナープレート)

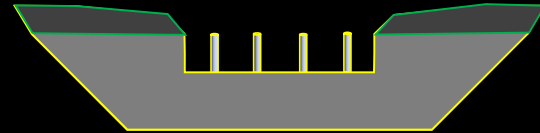
(連続基礎型:木製型枠)



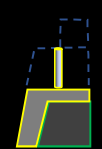
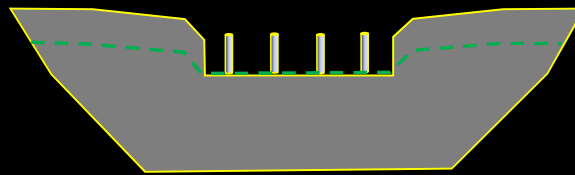
刃外高=2m

遮水型→透過型へ改良

切り下げ方式



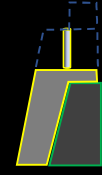
嵩上げ方式



刃外高=2m

H=5m

基準断面

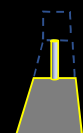
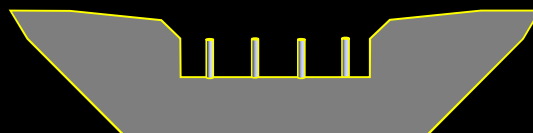


H=5m

基準断面

← 溪床幅21m程度 →

透過型 (新設)



刃外高=2m

H=5m

基準断面

← 溪床幅21m程度 →

● 各種透過型治山ダムのコスト比較

単位：千円、m²

区分	直接工事費 (A)	透過部面積 (B)	透過部単価 (A/B)	評価
流木捕捉工				
(独立基礎型:ライナープレート)	7,985	42.0	190	◎
(連続基礎型:木製型枠)	7,089	42.0	169	◎
遮水型→透過型へ改良				
切り下げ方式	6,434	20.0	322	○
嵩上げ方式	13,079	20.0	654	△
透過型 (新設)	10,806	20.0	540	●

※採点方法：「透過型 (新設)」を基準とした相対評価

× △ ● ○ ◎
劣 ← 基準 → 優

流木捕捉工の評価

● 各種透過型治山ダムの評価

区分	経済性	施工性	計画性 (整合性)	維持管理 (流木除去)	総合評価
流木捕捉工					
(独立基礎型:ライフプレート)	◎	◎	◎	◎	◎
(連続基礎型:木製型枠)	◎	○	○	○	○
遮水型→透過型へ改良					
切り下げ方式	○	×	×	●	△
嵩上げ方式	△	△	△	●	△
透過型 (新設)	●	●	●	●	●

※採点方法:「透過型(新設)」を基準とした相対評価

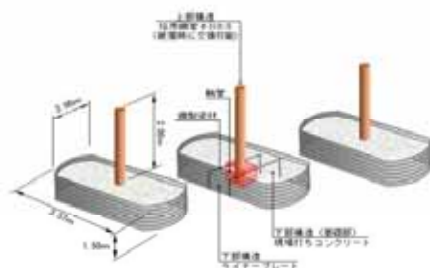
×
△
●
○
◎
劣 ←
基準
→ 優

4. 独立基礎型流木捕捉工ガイドラインの策定

技術基準・ガイドライン

1. ガイドライン策定（中部森林管理局版）

中部森林管理局では、激甚化の恐れがある流木災害の事前防災・減災対策を実現させるため、新たな流木捕捉技術として「独立基礎型流木捕捉工」を考案し、これまでに4現場において試験施工を行ってきたところ、この度、学識経験者による検討委員会を開催して、ガイドラインを策定しました。



- ▶ 独立基礎型流木捕捉工調査・計画ガイドライン（令和4年3月）(PDF: 4.326KB)
- ▶ 独立基礎型流木捕捉工設計・施工ガイドライン（令和3年3月）(PDF: 5.624KB)

（中部森林管理局HP：<https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/chisan/guideline.html>）

1. ガイドラインの総説

1.1. 背景

本ガイドラインは、林野庁中部森林管理局が考案し、4現場において試験施工を行っている流木捕捉工「独立基礎型流木捕捉工」を活用し、水平展開することを目的として、整備対象流域の選定手法、計画流木量の推定手法、施設整備及び溪畔林保全を進める上での独立基礎型流木捕捉工の活用手法等について示すものである。

調査・計画ガイドライン

1. 独立基礎型流木捕捉工の設置を検討

2. 整備対象流域の選定

3. 流木発生範囲の立木量及び倒木量

4. 計画流木量の算定手法

5. 独立基礎型流木捕捉工を活用した治山計画

設計・施工ガイドライン

1. 独立基礎型流木捕捉工の計画

2. 独立基礎型流木捕捉工の設計

3. 独立基礎型流木捕捉工の施工

4. 維持管理

独立基礎型流木捕捉工

調査・計画ガイドライン（抜粋）

調査・計画ガイドライン

1. 独立基礎型流木捕捉工の設置を検討【設置条件の確認】

1.2. 目的

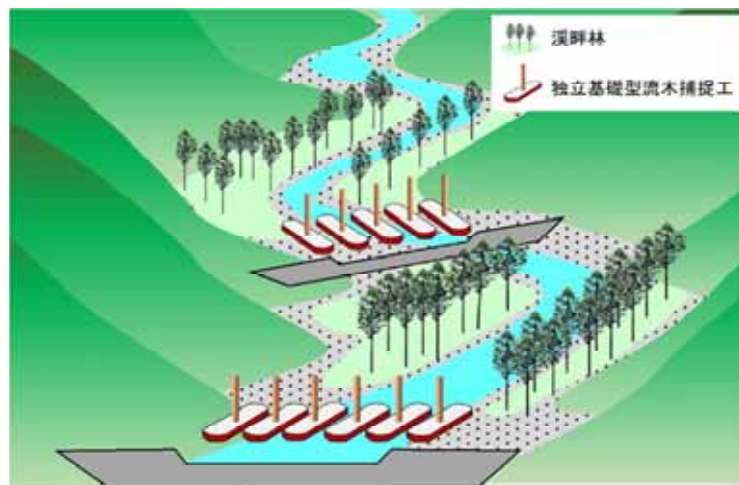
独立基礎型流木捕捉工は、流木を捕捉する目的に特化して設置することとし、以下の目的で設置する。

①下流保全対象への流木流下防止

豪雨に伴う流量の増加（掃流）に伴って流出するおそれのある溪床等の立木及び倒木等を捕捉し、下流への流出を防止する。

②溪畔林の保全

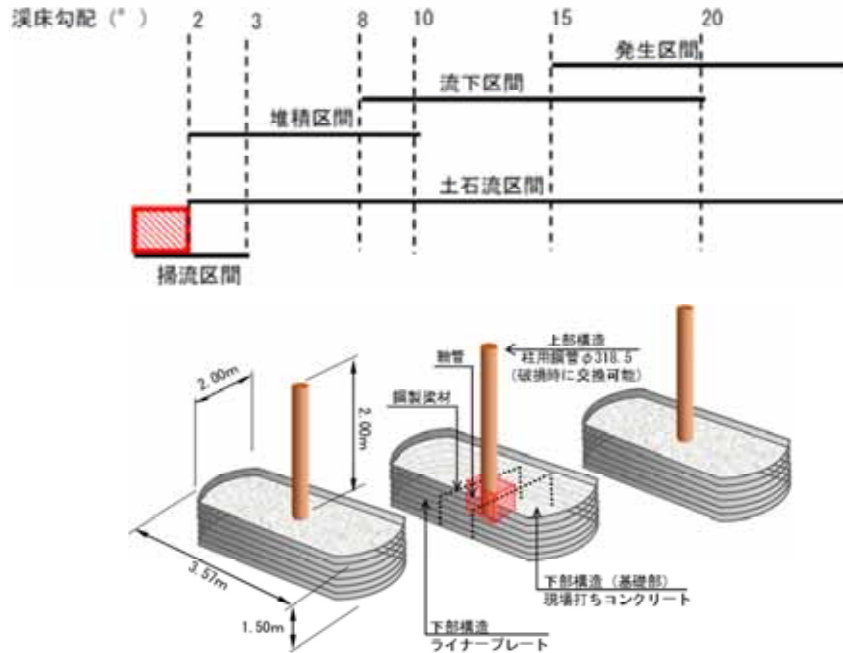
豪雨に伴う流量の増加に伴って流木化が懸念される溪畔林を対象に、緩衝林へ誘導するまでの期間、流木化を抑制し、溪畔林の保全を図る。



1.3. 独立基礎型流木捕捉工の概要

(1) 設置位置と構造

「独立基礎型流木捕捉工」は、既設治山ダム堆砂域等、渓床の変動が小さい**掃流区間**に設置することを原則としており、流木捕捉を目的とした鋼管による上部構造、コンクリート及びライナープレートからなる**独立基礎**としての下部構造を主体とする構造を有するものである。



調査・計画ガイドライン

2. 整備対象流域の選定【優先度の確認】

2. 整備対象流域の選定

2.1. 整備対象流域の選定基準

独立基礎型流木捕捉工の整備対象である、流木流出の可能性が高い流域や渓流の選定については、流域特性に係る独立基礎型流木捕捉工の**設置適合度**と、流域の保全対象に係る**被災危険度**の組み合わせにより判定する。

表 2.1.1. 独立基礎型流木捕捉工 整備対象流域の選定基準

判定	設置適合度と被災危険度の組合せ
Aランク	a1-a2, a1-b2, b1-a2
Bランク	a1-c2, b1-b2, c1-a2
Cランク	b1-c2, c1-c2, c1-b2

2.2. 独立基礎型流木捕捉工の設置適合度

流域や溪流を単位とした独立基礎型流木捕捉工の設置適合度（a1～c1）は、流域特性に係る評価とし、流域の治山施設整備や溪床の安定等の**設置条件**と共に、設置により期待できる**効果**を勘案の上で判定する。

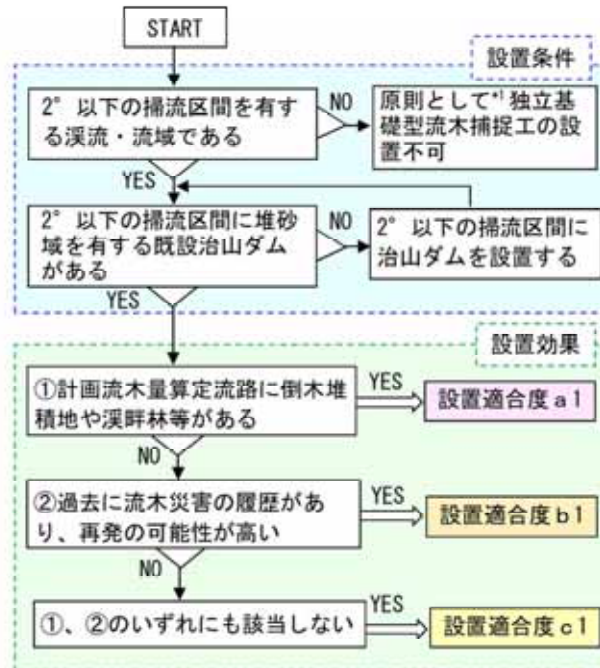


図 2.2.1. 設置適合度の判定フロー

2.3. 被災危険度

(1) 被災危険度の考え方

独立基礎型流木捕捉工計画流域の保全対象及び被災危険度（a2～c2）については、保全対象区域に想定される**流木被害**及び**防災施設等**を勘案し決定する。

- 氾濫範囲は、最大で横断方向 500m、下流方向 2km 程度の範囲とする。
- 分枝角は、既往の土石流扇状地の地形調査結果より、60 度（片側 30 度）が妥当であると考えられる。
- ただし、地形条件（例えば本川への合流、比高差が高い地形等）を勘案して、流木（土石流）が到達しない範囲を考慮した上、適宜範囲を修正する。
- 橋梁等の閉塞により氾濫範囲の拡大が懸念される場合は、氾濫シミュレーションを参考に氾濫範囲を設定してもよい。

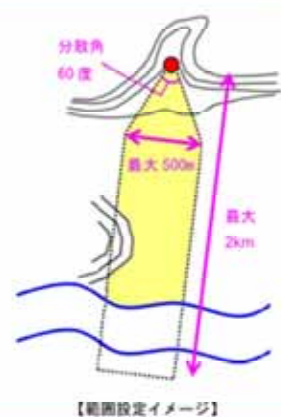


図2.3.1. 保全対象区域の考え方

引用：流木災害対策の必要な森林を抽出する手法 手引書（案）平成28年林野庁⁸⁾

(2) 被災危険度の判定

独立基礎型流木捕捉工を計画する際の被災危険度については、保全対象区域内の人家及び公共施設等の**保全対象**、既存の**防災施設等**を考慮の上で決定する。

表 2.3.1. 独立基礎型流木捕捉工計画流域の被災危険度

危険度	保全対象の種類
a 2	保全対象区域内に公用若しくは公共用施設（道路、橋梁を含む）又は人家がある場合。
b 2	流木捕捉効果が期待できる既存の防災施設等が無い場合。
c 2	流木捕捉効果が期待できる既存の防災施設等がある場合 ^{*1} 。

調査・計画ガイドライン

3. 流木発生範囲の立木量及び倒木量

3. 流木発生範囲の立木量及び倒木量

3.1. 計画流木量の算定流路

独立基礎型流木捕捉工を計画する場合の計画流木量の算出は、「林野庁(2012)土石流・流木対策指針」の考え方に則り、**最も流木流出量が多い流路のみ**を計画流木量算定流路とする。

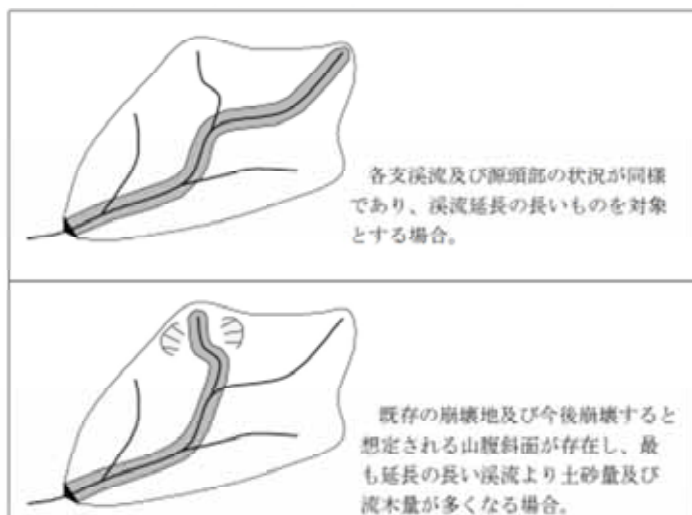


図 3.1.1. 単一流路による計画流木量算定流路のイメージ

引用：「指針⁶⁾」 第6節 荒廃危険地調査の補足

3.2. 流木発生範囲の設定

(1) 掃流区間及び土石流区間における流木発生範囲

独立基礎型流木捕捉工を計画する場合の計画流木量の算出は、「林野庁(2012)土石流・流木対策指針」の考え方に則り、**最も流木流出量が多い流路のみ**を計画流木量算定流路とする。

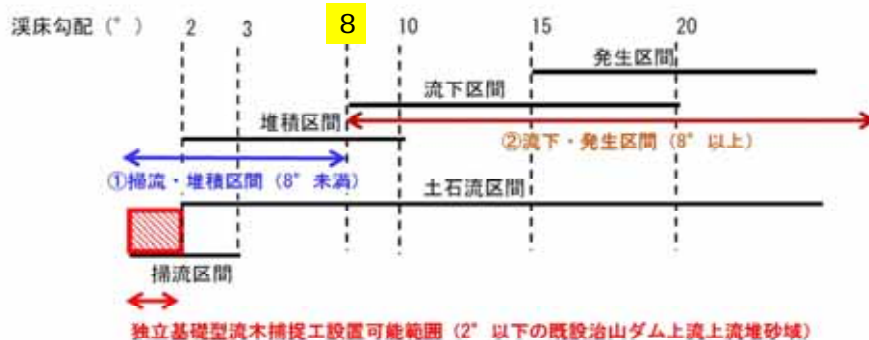


図 3.2.1. 土石流区分における区間①、②

(2) 掃流・堆積区間
における流木発生範囲

掃流・堆積区間の流木発生範囲は、**溪畔林**の内、流木化し易い立木から構成される林分、溪畔林区域内の倒木堆積地、今後崩壊すると想定される山腹斜面とする。

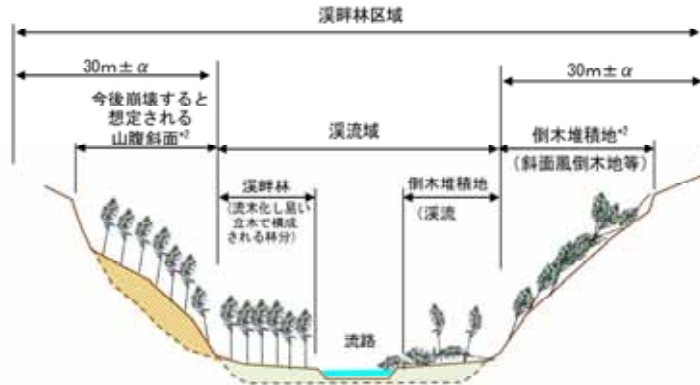


図 3.2.2. 掃流・堆積区間における流木発生範囲

溪畔林区分については「溪畔林整備指針（素案）平成30年3月林野庁⁹⁾」より引用

(3) 流下・発生区間
における流木発生範囲

流下・発生区間の流木発生範囲は、立木や倒木のある溪床、溪床兩岸の倒木堆積地（崩壊地、斜面風倒木地）及び今後崩壊すると想定される山腹斜面とする。

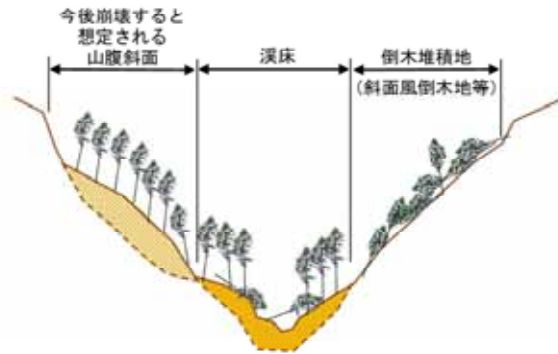


図 3.2.3. 流下・発生区間における流木発生範囲

調査・計画ガイドライン

4. 計画流木量の算定手法

3.3. 立木量及び倒木量の算定

3.3.1. 立木量の算定手法

(1) 樹種

樹種は、航空レーザ測量時に同時取得されるオルソ写真の判読、現地踏査による確認等により把握し、**林相区分図**を作成する（流木災害対策に必要な森林を抽出する手法 手引書（案）平成28年3月林野庁⁹⁾）。

(2) 樹冠高データの作成

対象とする林分の樹高、立木密度、胸高直径等を把握するための基礎資料として、航空レーザ測量データを基に**樹冠高データ（DCHM）**を作成する。

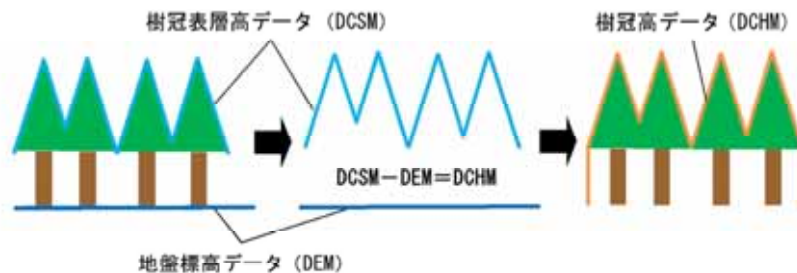


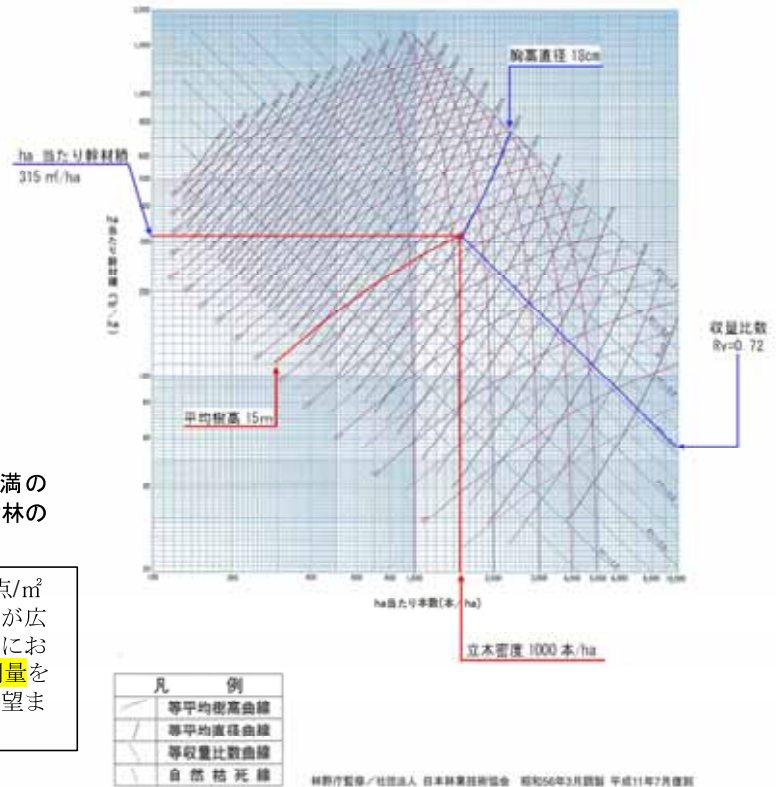
図 3.3.3(1). 樹冠高データ（DCHM）の作成のイメージ

引用：流木災害対策に必要な森林を抽出する手法 手引書（案）平成28年3月林野庁⁹⁾p20

(3) 計測密度4点/m²以上のレーザ測量データによる針葉樹林の林分データ取得

計測密度4点/m²以上のレーザ測量データがある場合で、且つ樹冠形状が明瞭な針葉樹（スギ、ヒノキ、マツ類等）については、樹冠高データ（DCHM）から凸部となる樹頂点（梢）を抽出し、単木の樹高の推定および樹頂点の個数から立木本数及び胸高直径を推定する。

林分の樹種に対応する林分密度管理図から、樹高（平均樹高）及び立木密度（本/ha）に対応する胸高直径を推定する。併せてha当たり幹材積や収量比数を算定できるため、収量比数を用いた密度管理を行うことも可能である。



(4) 針葉樹林（計測密度4点/m²未満のレーザ測量データ）若しくは広葉樹林の林分データ取得

レーザ測量データの計測密度が4点/m²未満の針葉樹林、若しくは対象林分が広葉樹林の場合については、対象林分においてUAV等による高密度のレーザ測量を行い、林分データを取得することが望ましい。

3.3.2. 倒木量の算定

倒木堆積地における倒木量については、倒木堆積地と同一林分のデータを「3.3.1.立木量の算定手法(1)～(4)」により算定し、これを基礎資料として倒木堆積地の面積を乗じることで推算する。

[参考]

倒木が流出し、溪床に堆積している等、倒木堆積地の同一林分（健全林）が明確でない場合については、流木流出後の航空レーザ測量を実施し、発生前後の航空レーザ測量データを解析することにより、最低限の現地サンプル調査から溪流内の倒木量を概略推定できる手法がある（引用：流木災害対策の必要な森林を抽出する手法 手引書（案）平成28年3月林野庁⁸⁾p49）。

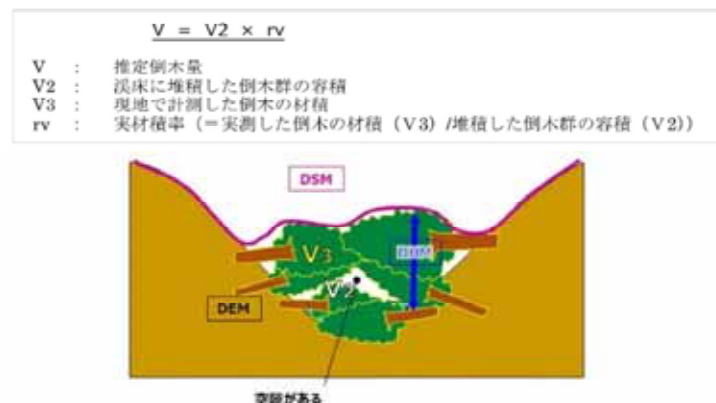


図 3.3.11. 溪床に堆積した倒木量の算定イメージ

4. 計画流木の算定手法

4.1. 流木流出危険度の評価手法

(1) 掃流・堆積区間の溪畔林における流木流出危険度の評価手法

洪水時における掃流や土砂流の流体力により立木に作用する転倒モーメントと、立木の最大引倒し抵抗力による倒伏安全率に基づき評価する。

[解説]

立木の最大引倒し抵抗力は次式で示される（引用：土砂流出防止機能の高い森林づくり指針 解説版 平成27年3月林野庁森林整備部整備課⁹⁾）。

$$P = a D_{BH}^b \quad \dots \text{式 4.1.1}$$

P : 引倒し抵抗力による抵抗モーメント [kNm]

D_{BH} : 胸高直径 [cm]

a : 引倒し抵抗力係数

b : 回帰係数 (3 とする)

$b=3$ とした場合の a については、樹種毎に以下によって表される。

表 4.1.1. 樹種毎の引倒し抵抗力係数

引用：土砂流出防止機能の高い森林づくり指針 解説版
平成 27 年 3 月林野庁森林整備部整備課⁹⁾ 主要樹種について抜粋

樹種	a の値	抵抗力
コナラ	6.79×10^{-3}	大
ヒノキ	4.37×10^{-3}	
ケヤキ	3.86×10^{-3}	
ミズナラ	3.27×10^{-3}	中
スギ	2.82×10^{-3}	
カラマツ	2.23×10^{-3}	
サワグルミ	1.99×10^{-3}	
トチノキ	1.80×10^{-3}	小
オノエヤナギ	1.13×10^{-3}	

掃流や土砂流の流体力が立木に作用する転倒モーメント (kNm) は右で示される（引用：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン (案) : リバーフロント整備センター¹⁰⁾）。

$$M = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\rho}{g} \right) \cdot Cd \cdot S \cdot u^2 \cdot L \quad \dots \text{式 4.1.2}$$

M : 流体力による転倒モーメント [kNm]

ρ : 流水の単位重量 [12kN/m³]

g : 重力加速度 [9.8m/sec²]

Cd : 抗力係数 [円柱 1.17]

S : 流水中の立木の投影面積 [m²]

u : 流速 [m/sec]

L : 流体力の作用点の溪床からの高さ (h の 1/2) [m]

ここで、 S は立木の胸高直径 D_{BH} (m) 及び流水の水深 h (m) を用いて以下のように与えられる（根元直径 = 胸高直径 $D_{BH} \times 1.3$ として扱う）。

$$S = (1.3 - 0.125 h) \times D_{BH} \times h \quad \dots \text{式 4.1.3}$$

*水深 h が胸高直径計測高である 1.2m を上回るほど誤差が大きくなる。

式 4.1.1 及び式 4.1.2 より、立木の倒伏安全率 F は以下のように示される。

$$F = \frac{P}{M} \quad \dots \text{式 4.1.4}$$

F : 立木の流体力に対する倒伏安全率

P : 引倒し抵抗力による抵抗モーメント [kNm]

M : 流体力による転倒モーメント [kNm]

式 4.1.4 から、流木流出危険度を以下のように評価できる。

$F \approx 1.00$ → 溪畔林内の立木の掃流・土砂流に対する倒伏限界

$F < 1.00$ → 溪畔林内の立木は掃流・土砂流に対して危険（流出）

$F > 1.00$ → 溪畔林内の立木は掃流・土砂流に対して安全

(2) 倒木堆積地（崩壊地及び斜面風倒木地）及び今後崩壊すると想定される山腹斜面における流木流出危険度の評価手法

洪水時における掃流や土砂流の流体力により立木に作用する転倒モーメントと、立木の最大引倒し抵抗力による倒伏安全率に基づき評価する。

〔解説〕

倒木堆積地（斜面風倒木地等）は、根系の緊縛力低下に伴い崩壊防止機能が低下している可能性があることから、今後崩壊すると想定される山腹斜面と同様の流木流出危険度評価を行う。

崩壊の際に想定される土砂量は右式により求める。

倒木堆積地及び今後崩壊すると想定される山腹斜面が流路に直接接続しておらず、その下流に森林がある場合、森林による土砂や流木の捕捉機能が期待できる。

森林が抑止可能な最大土量は、右式で表される（引用：土砂流出防止機能の高い森林づくり指針 解説版：平成27年3月林野庁森林整備部整備課⁹⁾）。

$$V_h = A \times D \quad \dots \text{式4.1.5}$$

V_h ：想定崩壊土砂量[m³]

A ：倒木堆積地の面積[m²]

D ：倒木堆積地の推定崩壊深[m]

$$V_{max} = 18.5 \cdot \frac{B_d}{\sin\theta^{3/14}} \cdot \left(\frac{a D_{BH}^3}{d}\right) \quad \dots \text{式4.1.6}$$

V_{max} ：森林が抑止可能な土砂量[m³]

D_{BH} ：胸高直径[cm]

a ：立木の引倒し抵抗力係数

d ：立木間隔[m/本]

B_d ：流下幅[m]

θ ：勾配

式4.1.5及び4.1.6から、以下の場合において土砂及び倒立木が流出する危険度を評価できる。

$$V_{max} \geq V_h \rightarrow \text{土砂及び倒立木が流出する可能性が低い}$$

$$V_{max} < V_h \rightarrow \text{土砂及び倒立木が流出する可能性が高い}$$

4.2. 流木流出量の算定

(1) 流木流出量

流木流出量は、掃流・堆積区間及び流下・発生区間内の流木発生範囲における立木量及び倒木量に流出率を乗じた量とする（「指針⁵⁾」6-3流木量の調査）。

(2) 流木流出率

流木流出率は、流木発生範囲における立木の倒伏限界、森林の土砂捕捉機能、治山施設等の防災施設効果等を勘案の上で決定する。流木流出率は0.9を上限とし、0.1～0.9の範囲で設定する。

(3) 掃流・堆積区間における流木流出量

掃流・堆積区間の流木流出量 Tst は、流木発生範囲である溪畔林の立木量、倒木堆積地（溪流区域内）と倒木堆積地（斜面風倒木地等）の倒木量及び今後崩壊すると想定される山腹斜面に、対応する流木流出率を乗じて算定する。

$$Ts = t1 \cdot Tsr + t2 \cdot Tst1 + t3 \cdot Tst2 + t3 \cdot Tsh \quad \dots \text{式4.2.1}$$

<<立木及び倒木量：3.2章図3.2.2参照>>

Ts ：掃流・堆積区間における流木流出量[m³]

Tsr ：掃流・堆積区間における溪畔林の立木の量[m³]

$Tst1$ ：掃流・堆積区間の倒木堆積地（溪流域）における倒木の量[m³]

$Tst2$ ：掃流・堆積区間の倒木堆積地（崩壊地及び斜面風倒木地）における倒木の量[m³]

Tsh ：掃流・堆積区間両岸の今後崩壊すると想定される山腹斜面における立木及び倒木の量[m³]

<<流木流出率>>

$t1$ ：溪畔林における林分毎の流木流出率

(0.1～0.9：立木の倒伏限界胸高直径により設定)

$t2$ ：倒木堆積地（溪流域）における倒木の流木流出率(0.9とする)

$t3$ ：倒木堆積地（斜面風倒木地等）及び今後崩壊すると想定される山腹斜面における立木及び倒木の流木流出率

(0.1若しくは0.9：下流森林の土砂捕捉機能により設定)

(4) 溪畔林における流木流出率 t_l の設定手法

渓流域溪畔林における流木流出率 t_l については、計画高水時において倒伏限界胸高直径未満（倒伏安全率 $F \leq 1.0$ ）となる立木の比率とする。

[解説]

倒伏限界胸高直径については、式4.1.1及び式4.1.2によって求める他、概略値として表4.1.2の数値を用いても良い。求めた倒伏限界胸高直径を閾値として、対象林分の胸高直径ヒストグラムから倒伏限界胸高直径を下回る立木本数及び本数率（ t_l ）を求める。

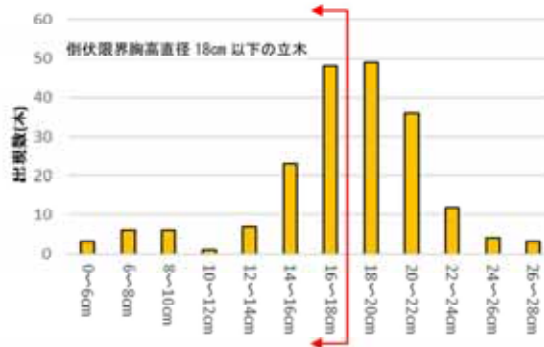


図 4.2.1. 倒伏限界胸高直径を 18cm とした場合の胸高直径ヒストグラム例

表 4.1.2. 計画高水流量, 勾配毎の倒伏限界胸高直径の目安

[参考]
 掃流・堆積区間の最大勾配 8° (17.63%) 及び、独立基礎型流木捕捉工設置可能区間の最大勾配 2° (5.24%) における溪畔林内の立木の倒伏限界胸高直径は、計画高水流量 (1/100年確率) と流下幅に応じて次項のように試算できる (表 4.1.1. 樹種毎の引倒し抵抗力係数におけるオノエヤナギを使用)。

倒伏限界胸高直径を下回る溪畔林内の立木は、出水時の流水による流体力の作用により倒伏し、流出する危険度が高い。

勾配	区分	計画高水流量							
		0~20m ³ /s		21~30m ³ /s		31~40m ³ /s		41~50m ³ /s	
	流下幅(流路幅)	5m以下	6~10m	5m以下	6~10m	5m以下	6~10m	5m以下	6~10m
8°	水深h	0.52m	0.34m	0.65m	0.43m	0.77m	0.51m	0.88m	0.58m
	流速U	7.23m/s	5.85m/s	8.29m/s	6.78m/s	9.08m/s	7.55m/s	9.76m/s	8.18m/s
	流体力モーメントM	0.47kNm	0.07kNm	1.34kNm	0.22kNm	2.88kNm	0.50kNm	5.23kNm	0.93kNm
	引倒し抵抗モーメントP	0.48kNm	0.07kNm	1.35kNm	0.22kNm	2.91kNm	0.50kNm	5.26kNm	0.94kNm
	倒伏限界胸高直径	7.5cm	4.0cm	10.6cm	5.8cm	13.7cm	7.6cm	16.7cm	9.4cm
2°	水深h	0.77m	0.51m	0.98m	0.66m	1.16m	0.78m	1.32m	0.88m
	流速U	4.53m/s	3.76m/s	5.14m/s	4.38m/s	5.63m/s	4.86m/s	8.34m/s	5.23m/s
	流体力モーメントM	0.36kNm	0.06kNm	1.03kNm	0.21kNm	2.19kNm	0.46kNm	3.93kNm	0.80kNm
	引倒し抵抗モーメントP	0.36kNm	0.06kNm	1.03kNm	0.21kNm	2.21kNm	0.46kNm	3.97kNm	0.80kNm
	倒伏限界胸高直径	6.8cm	3.8cm	9.7cm	5.7cm	12.9cm	7.4cm	15.2cm	8.9cm
樹種		オノエヤナギ ($\alpha = 0.00133$)							

勾配	区分	計画高水流量							
		51~100m ³ /s		101~150m ³ /s		151~200m ³ /s		201~250m ³ /s	
	流下幅(流路幅)	10m以下	11~15m	15m以下	16~20m	20m以下	21~30m	25m以下	26~35m
8°	水深h	0.88m	0.69m	0.88m	0.75m	0.88m	0.69m	0.88m	0.72m
	流速U	10.50m/s	10.83m/s	10.77m/s	9.85m/s	10.95m/s	9.47m/s	11.03m/s	9.76m/s
	流体力モーメントM	6.53kNm	2.24kNm	7.08kNm	3.42kNm	7.44kNm	2.39kNm	7.59kNm	2.95kNm
	引倒し抵抗モーメントP	6.59kNm	2.26kNm	7.15kNm	3.44kNm	7.51kNm	2.43kNm	7.63kNm	2.97kNm
	倒伏限界胸高直径	18.0cm	12.6cm	18.5cm	14.5cm	18.8cm	12.9cm	18.9cm	13.8cm
2°	水深h	1.38m	1.05m	1.34m	1.13m	1.34m	1.05m	1.34m	1.10m
	流速U	6.64m/s	5.98m/s	6.91m/s	6.35m/s	7.03m/s	6.19m/s	7.15m/s	6.39m/s
	流体力モーメントM	5.26kNm	1.99kNm	6.12kNm	2.95kNm	6.44kNm	2.23kNm	6.78kNm	2.78kNm
	引倒し抵抗モーメントP	5.26kNm	2.00kNm	6.16kNm	2.97kNm	6.48kNm	2.26kNm	6.81kNm	2.78kNm
	倒伏限界胸高直径	16.7cm	12.1cm	17.6cm	13.8cm	17.9cm	12.6cm	18.2cm	13.5cm
樹種		オノエヤナギ ($\alpha = 0.00133$)							

(5) 倒木堆積地（斜面風倒木地等）及び今後崩壊すると想定される山腹斜面における流木流出率 $t3$ の設定手法

倒木堆積地（斜面風倒地等）及び今後崩壊すると想定される山腹斜面における流木流出率 $t3$ は、防災施設及び森林による土砂捕捉機能が期待できる場合については0.1、これらの機能が期待できない場合は0.9とする。

(6) 流下・発生区間における流木流出量

流下・発生区間の流木流出量 Tr は、流下・発生区間内における治山施設整備状況に基づき算定することとし、流木発生範囲である溪床、倒木堆積地及び今後崩壊すると想定される山腹斜面の倒木量及び立木量に流下・発生区間の流木流出率 t を乗じて算定する。

$$Tr = t \cdot (Trk + t3 \cdot Trt + t3 \cdot Trh) \quad \dots \text{式 4.2.2}$$

<<立木及び倒木量：3.2章図3.2.3参照>>

Tr ：流下・発生区間における流木流出量[m³]

Trk ：流下・発生区間における溪床内の立木及び倒木の量[m³]

Trt ：流下・発生区間の溪床兩岸の倒木堆積地（崩壊地及び斜面風倒木地）に堆積している倒木の量[m³]

Trh ：流下・発生区間兩岸の今後崩壊すると想定される山腹斜面における立木及び倒木の量[m³]

<<流木流出率 >>

t ：流下・発生区間の流木流出率

(0.1~0.9：治山施設整備状況により設定)

$t3$ ：倒木堆積地（斜面風倒木地等）及び今後崩壊すると想定される山腹斜面における立木及び倒木の流木流出率

(0.1若しくは0.9：下流森林の土砂捕捉機能により設定、p38参照)

4.2. 流木流出量の算定

掃流・堆積区間及び流下・発生区間における流木発生範囲の流木流出量の総和を以て、その流域の計画流木量とする。

[解説]

流木流出量及び計画流木量の算定事例を以下に示す。

表 4.3.1. 計画流木量の算定事例

区分	分類	林分	面積 (ha)	立木材積量 (m ³)	倒木材積量 (m ³)	流木流出率		流木流出量 (m ³)	
						数値	根拠		
掃流・堆積区間	溪畔林	1	0.81	52.7	0	0.65	倒伏限界胸高直径16cm	34.2	
		2	0.62	40.3	0	0.65	〃	26.2	
		3	0.38	24.7	0	0.72	倒伏限界胸高直径18cm	17.8	
		4	1.21	78.7	0	0.72	〃	56.6	
	今後崩壊すると想定される山腹斜面	1	0.35	22.8	0	0.10	直下に道路防災施設あり	2.3	
		2	0.25	16.3	0	0.10	〃	1.6	
		3	0.81	52.7	0	0.90	防災施設なし	47.4	
	斜面風倒地	1	0.02	0.00	5.1	0.90	〃	4.6	
	小計		4.45	287.95	5.1	0.66		190.8	T_s
	流下・発生区間	区間流木流出量				$t=0.5$	治山ダムが階段状に整備された安定家流		
溪床		1	5.52	358.8	0	0.50		179.4	$t \cdot Trk$
今後崩壊すると想定される山腹斜面		1	0.05	0.00	3.2	0.45	$0.9(t3) \times 0.5(t)$	1.4	
		2	0.23	15.0	0	0.45	〃	6.7	
		3	0.67	43.6	5	0.45	〃	19.6	
		4	0.58	37.7	0	0.45	〃	17.0	
		5	0.45	29.3	0	0.45	〃	13.2	
		6	0.54	35.1	0	0.45	〃	15.8	
倒木帯		1	0.05	0.00	3.2	0.50	〃	1.6	$t \cdot Trt$
小計			8.09	519.35	11.4	0.49		254.7	Tr
合計		12.54	807.3	16.5	0.55		445.5	$T_s + Tr$	

調査・計画ガイドライン

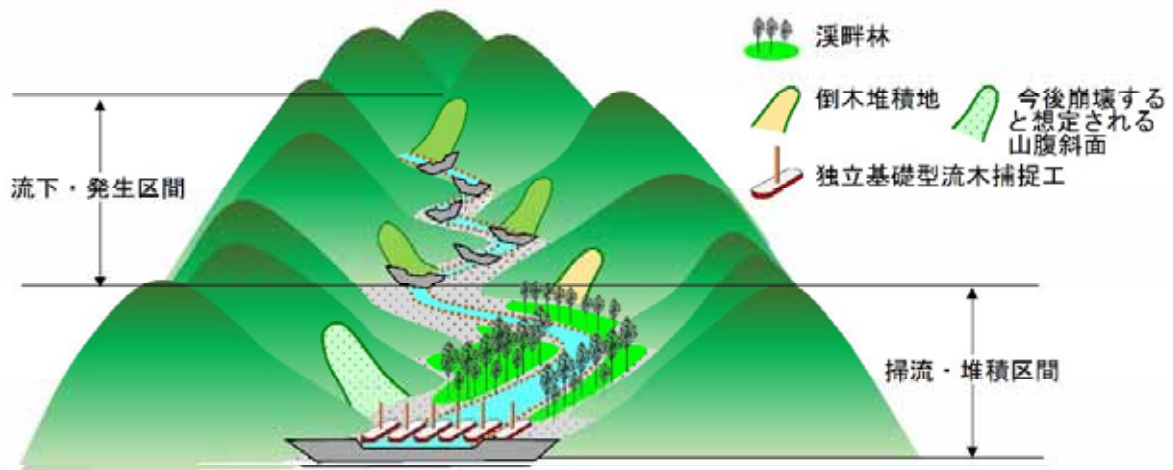
5. 独立基礎型流木捕捉工を活用した治山計画

5. 独立基礎型流木捕捉工を活用した治山計画

5.1. 施設整備の考え方

(1) 独立基礎型流木捕捉工を活用した施設整備

独立基礎型流木捕捉工については、階段状治山ダム群や山腹工等の整備により安定した溪床を確保した上で、流木発生範囲を発生源として想定される流木の効果的な捕捉及び溪畔林の保全を目的として活用する。



(2) 整備目標及び整備水準

独立基礎型流木捕捉工による流木対策の整備目標は、流木捕捉量が計画流木量を上回ることを原則とする。

但し、計画流木量が多く、複数基の独立基礎型流木捕捉工の配置を要する場合は、当面1箇所のみを配置することを整備水準とする。

[解説]

独立基礎型流木捕捉工の流木捕捉量は以下に示される（独立基礎型流木捕捉工設計・施工ガイドライン（案）P16⁹⁾）。

$$V_r = V_d \times \beta \quad \dots \text{式 5.1.1}$$

$$V_d = A_w \times h$$

ここで、 V_r ：流木捕捉量[実材積 m^3]

β ：流木容積率（平均的な値として0.2とする：「指針⁹⁾」2流木の捕捉量のみの評価）

V_d ：見かけの捕捉容量 m^3]

A_w ：独立基礎型流木捕捉工流木閉塞時の湛水面積 m^2]

h ：堆砂地若しくは湛水部の平均深 m]

独立基礎型流木捕捉工による整備率は以下に示される。

$$\text{整備率} = \frac{V_r}{T} \times 100 \quad \dots \text{式 5.1.2}$$

ここで、 T ：計画流木量

5.2. 溪畔林保全手法の考え方

(1) 独立基礎型流木捕捉工による溪畔林保全の考え方

溪畔林内に生育する比較的小径で流木化し易い立木を、独立基礎型流木捕捉工により一定期間保全することで、比較的大径の流木化しにくい立木から構成される溪畔林（**緩衝林**）に誘導する。

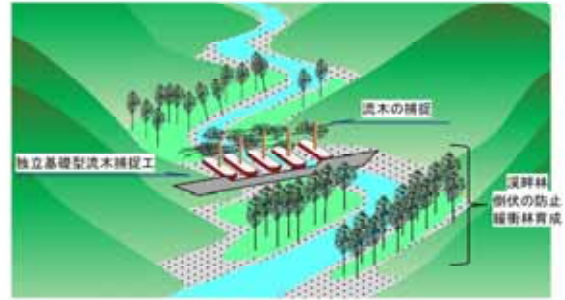


図 5.2.3. 溪畔林上流に設置した独立基礎型流木捕捉工による保全効果

(2) 独立基礎型流木捕捉工に期待される溪畔林の保全効果

溪畔林下流に独立基礎型流木捕捉工を設置することで、溪畔林内の立木が流木化した際の捕捉効果が期待できることから、流木対策としての危険木伐採が不要となる（**捕捉効果**）。また、溪畔林上流に独立基礎型流木捕捉工を設置することで、溪畔林内に流入する流木を捕捉し、流木が溪畔林内の立木を巻き込み倒伏させることを抑制する効果が期待できる（**倒伏防止効果**）。

掃流や土砂流の流体力が立木に作用するモーメントの位置（溪床からの高さ）は、4章 式4.1.2より、清水状態では $L=1/2 h$ （ h ：水深）として与えられる。

流木が溪畔林等の立木に衝突する際は、流木が水面付近を浮遊しながら流下することから、水深に近い高さに大きな外力が作用するため、流体力に対する倒伏限界胸高直径がより大きくなる（清水時よりも大径の立木が倒伏する）可能性がある

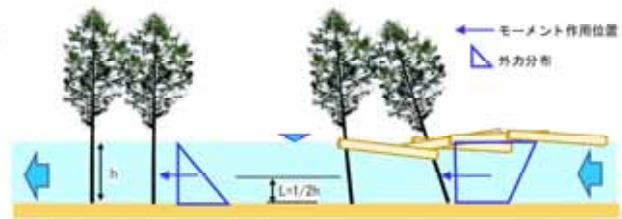


図 5.2.2. 溪畔林立木に作用する外力の模式図（左：清水時、右：流木衝突時）

5.3. 維持管理の考え方

独立基礎型流木捕捉工は、山地災害や洪水の発生により流木を捕捉した際に、次期降雨時において満砂等による機能低下が発生しないよう、**背面土砂及び流木を速やかに除去することを念頭に**、配置計画や管理道計画を行うことが望ましい。

[解説]

独立基礎型流木捕捉工は、堆積した土砂及び流木の除去を前提として計画する必要がある。

独立基礎型流木捕捉工に隣接した既設道等が無く、車両の乗入れが困難な際には、管理道を併せて計画する。管理道を設置する際の留意点については以下のとおりである。

- ・独立基礎型流木捕捉工が流木を捕捉し流水が越流した際に、流水が管理道内を流下することが無いよう計画する。
- ・溪畔林周辺で計画する際は、「国有林野の溪畔周辺の取扱いについて 平成24年7月12日付24林国経第18号 林野庁国有林野部長通知¹⁵⁾」、「溪畔林整備指針（素案）平成30年3月 林野庁⁷⁾」等を踏まえ、溪畔林を損傷させぬよう計画する。



独立基礎型流木捕捉工

設計・施工ガイドライン（抜粋）

設計・施工ガイドライン

1. 独立基礎型流木捕捉工の計画

1.3. 計画

1-3-1. 計画できる溪流の条件

独立基礎型流木捕捉工を計画できる溪流の条件は以下のとおりである。

- ① 溪床勾配が 2° 以下の掃流区間を有する溪流
土石流区間下流の掃流区間（ $2^\circ \rightarrow 3.5\%$ 未満）において計画する（図1.3.1）。
- ② 酸性河川ではない溪流
鋼材を主体とする構造であるため、pHが4以下の酸性河川では計画しない。
（pHについては「鋼製砂防構造物設計便覧」7）より引用）

[参考-1] 掃流区間における縦断勾配

掃流区間は溪床勾配が緩いことから堆砂域と元溪床の境界が不明瞭であることが多い。独立基礎型流木捕捉工設置箇所となる既設治山ダムの堆砂勾配については溪床縦断図を基に適切に把握することとし、設置箇所の上流がいずれも掃流区間（溪床勾配が $2^\circ \rightarrow 3.5\%$ 未満）に該当していることを確認することが重要である。特に既設治山ダムの放水路直上流は接近流速により堆砂勾配が緩くなることが多いため注意が必要である。

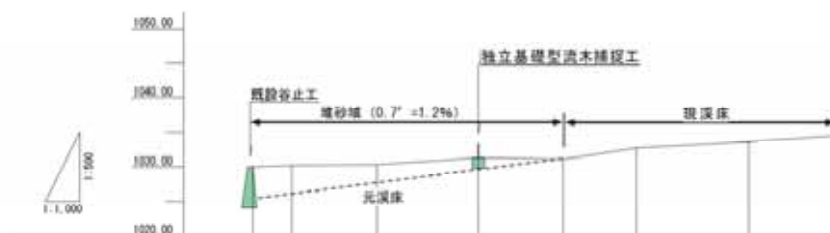


図1.3.2. 掃流区間における独立基礎型流木捕捉工の事例（恵那市ホコロ沢）

[参考-2] 土石流堆積区間における設置

保全対象との関係等、やむを得ず土石流堆積区間（ $2^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 、 $3.5\% \sim 14\%$ ）において独立基礎型流木捕捉工を設置する場合は、既設治山ダムが複数基設置されている等、溪床変動が少ない安定した溪流で、設置箇所の上流に既設治山ダムが設置されている箇所とする。この場合、土砂流出による堆積土砂により上部構造の柱用鋼管が埋塞するおそれがあることを考慮する。

なお、土石流流下区間及び発生区間では計画しない。

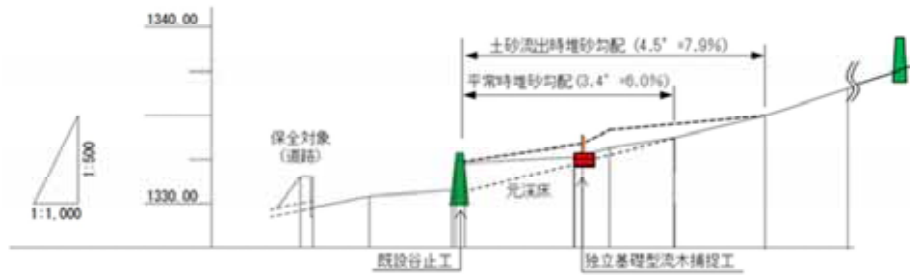


図1.3.3.土石流堆積区間における独立基礎型流木捕捉工の事例（塩尻市シシ沢）

土石流堆積区間において独立基礎型流木捕捉工を設置する場合は、土石流時の安定計算に基づく構造検討を行うと共に、洪水時の勾配形成時に柱用鋼管上端が洪水時の水位を上回っていることを検証しておくことが必要である。

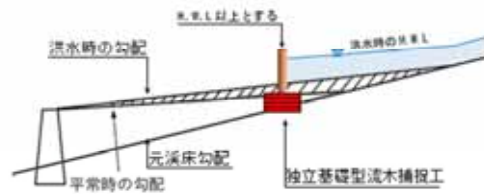


図1.3.4.土石流堆積区間における洪水時の勾配

1-3-3. 透過部（スリット）の間隔

独立基礎型流木捕捉工の透過部（スリット）の間隔（ d ）は、その構造上**最小間隔を2.5m**とし、想定される流木長に応じて決定する。
 （「土石流・流木指針」2-6治山ダムの透過部の間隔を一部引用、改正）

【解説】

独立基礎型流木捕捉工については下部構造の全幅2.0mを標準としており、施工上隣接したライナープレートの間隔を0.5m以上確保する必要があることから、スリット間隔（上部構造柱用鋼管中心間の距離）を2.5m以上とする。

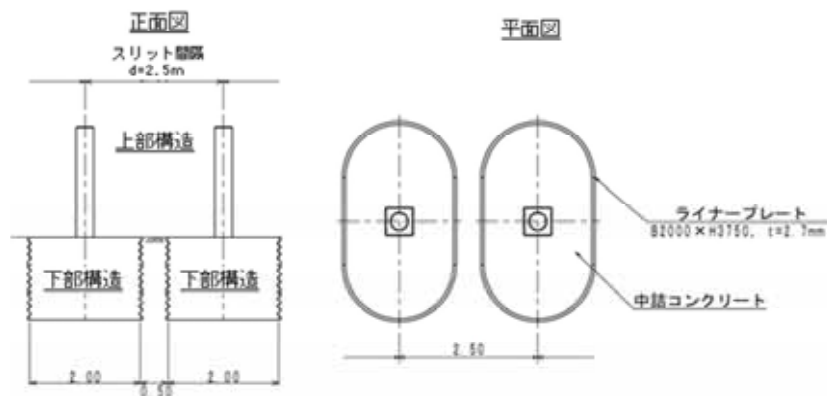


図1.3.8.独立基礎型流木捕捉工の標準図
 （上部構造である鋼管のスリット間隔を $d = 2.5\text{m}$ 以上とする）

1-3-4. 独立基礎型流木捕捉工の設置幅

- ①独立基礎型流木捕捉工の設置幅は、設置位置の横断形状に基づき両岸から流木がすり抜けないように設定する。
 ②必要に応じて溪岸の侵食対策（護岸）を検討する（「土石流・流木指針」3-2 [参考3] を引用）。

[解説]

両岸からの流木すり抜けを防止するため、独立基礎型流木捕捉工を設置した際に最も両岸に近い柱用鋼管上端から溪岸までの水平距離（ d_R 、 d_L ）がスリット間隔（ d ）以下となるように設置幅を設定する。

設置箇所の溪岸部分が土砂である等、溪岸侵食が懸念される場合においては護岸工を設置し、最も両岸に近い柱用鋼管上端から溪岸までの水平距離（ d_R 、 d_L ）がスリット間隔（ d ）以下となるように設置幅若しくは護岸工の位置を設定する。護岸工の高さは設置箇所の越流水深（ h_c ）を上回る高さとする。

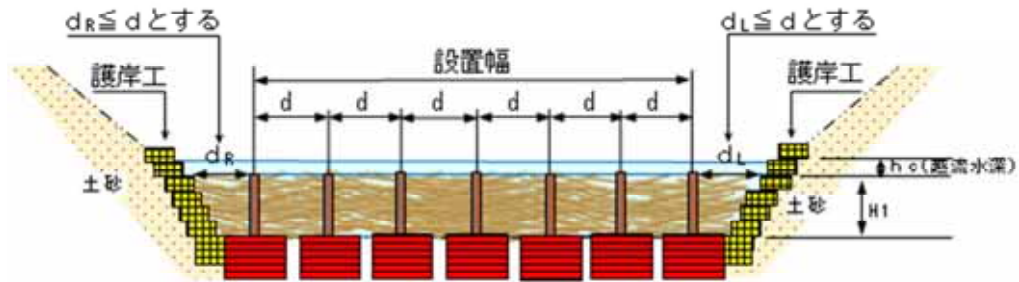


図1.3.10.独立基礎型流木捕捉工の設置幅
 (溪岸侵食が懸念される場合)

設計・施工ガイドライン

2. 独立基礎型流木捕捉工の設計

1.1. 構造

2-1-1. 独立基礎型流木捕捉工の構造

独立基礎型流木捕捉工の構造は、流下する流木を効果的に捕捉することの出来る構造とし、流水に対し安定を確保できる構造とする。

[解説]

独立基礎型流木捕捉工は、溪床より突出した流木捕捉機能を有する流木捕捉部（上部構造）と、安定を確保するための基礎部（下部構造）からなる構造とする。

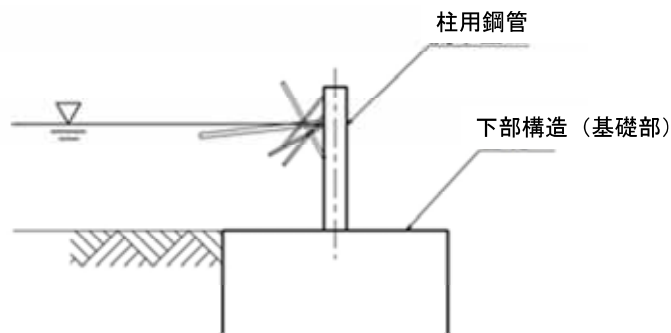


図2.1.1.独立基礎型流木捕捉工の構造

2.2. 安定計算

2-2-1. 独立基礎型流木捕捉工の安定計算に用いる荷重

独立基礎型流木捕捉工の安定計算に用いる荷重は、原則として、自重、静水圧及び堆砂圧とする。

[解説]

①独立基礎型流木捕捉工の安定計算に用いる荷重は、洪水時を想定して、捕捉工の自重、静水圧及び堆砂圧を標準とする。

独立基礎型流木捕捉工に作用する静水圧については、流木によるスリット閉塞時とスリット未閉塞時（せき上げを考慮）の2種類が想定されるが、スリット未閉塞時のせき上げ高は比較的小さいことから、流木によるスリット閉塞時を想定して静水圧を算定する。

スリット閉塞時に作用する水圧は、以下の式により求められる。

$$P1 = hc \cdot \rho \cdot \lambda$$

$$P2 = H1 \cdot \rho \cdot \lambda$$

P1：天端部に作用する水圧 (kN)

P2：基礎部に作用する水圧 (kN)

ρ ：流水の単位体積重量 (kN/m³)

H1：柱用鋼管の高さ (m)

hc：越流水深 (m)

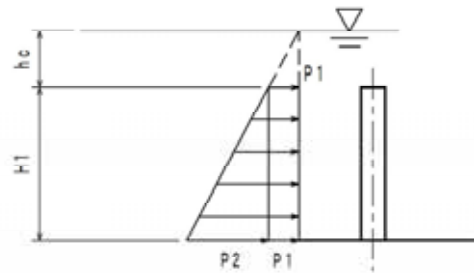


図 2.2.1. スリット閉塞時の水圧モデル

②独立基礎型流木捕捉工の安定計算に用いる単位体積重量は、次の数値を標準とする。

- ・コンクリート（試験等を行わない場合）：23kN/m³
- ・静水：11.8kN/m³
- ・越流水：11.8kN/m³
- ・堆砂礫：18kN/m³

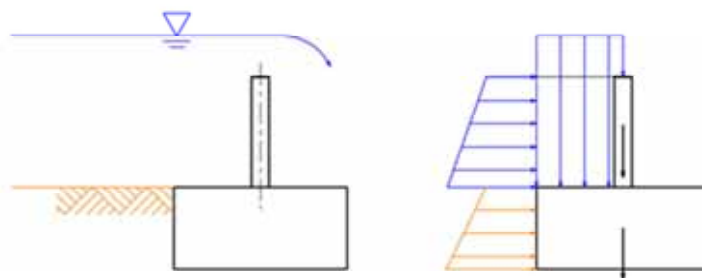


図2.2.3.荷重モデル図

[参考] 堆砂圧

一般に、堆砂圧（土圧）は、次のランキン式により求められる。

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot K_A \cdot \gamma \cdot H^2$$

$$K_A = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$h = \frac{l}{3} \cdot H$$

P_A：土圧 (kN/m)

K_A：主動土圧係数

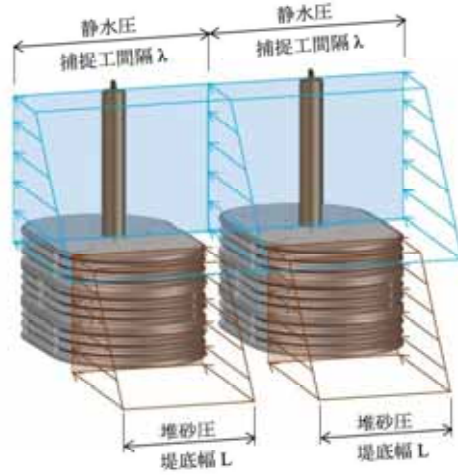
γ ：堆砂の単位体積重量 (kN/m³)

H：土圧が作用する高さ (m)

ϕ ：堆砂の内部摩擦角 (°)

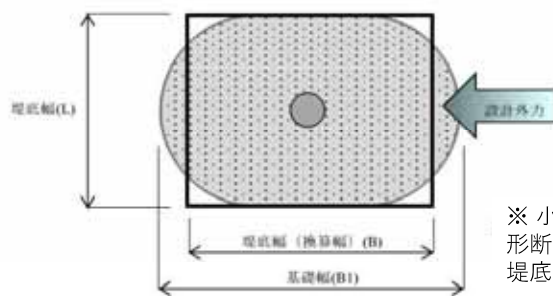
h：土圧の作用位置の壁底面からの高さ (m)

(補足説明)



1. 静水圧：捕捉工間隔λとする。
2. 堆砂圧：堤底幅Lとする。

図 独立基礎型流木捕捉工の荷重モデル図（外力分担幅）



※ 小判形基礎の底面積を同幅の矩形断面に換算した幅を安定計算上の堤底幅Bとする。

図 安定計算に用いる堤底幅

2-2-2. 独立基礎型流木捕捉工の安定条件

独立基礎型流木捕捉工は、次の条件のすべてを満たすものでなければならない。

- ① **転倒**に対する安定
独立基礎型流木捕捉工が転倒を引き起こさないこと。
- ② **滑動**に対する安定
独立基礎型流木捕捉工が滑動を引き起こさないこと。
- ③ **基礎地盤**に対する安定
独立基礎型流木捕捉工の最大応力に対して基礎地盤の地耐力が十分であること。

[解説]

独立基礎型流木捕捉工は、自重によって水圧等の外力に抵抗するものであり、その安定を保つために、3条件を満たさなければならない。なお、安定計算は原則として標準的な二次元断面を仮定し、独立基礎型流木捕捉工1基当たりについて実施する。

① 転倒に対する安定

荷重による応力又は反力が、独立基礎型流木捕捉工の基礎地盤の許容値を超えない範囲では、堤体の自重及び諸外力の合力作用線が、独立基礎型流木捕捉工の中央1/3 (**middle third**) 内にあれば引張力を生じないので、転倒に対し安定である。

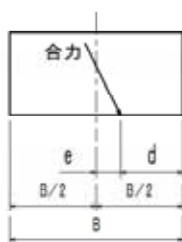


図 2.2.4. 合力の作用位置

$$d = \frac{M}{V}$$

$$e = \frac{B}{2} - d$$

$$e \leq \frac{B}{6} \quad \dots \text{OK}$$

d : 基礎下流端から合力の作用位置までの距離 (m)
M : 基礎下流端と支点として、独立基礎型流木捕捉工に作用するモーメントの合計 (kN・m)
V : 独立基礎型流木捕捉工に作用する垂直成分の合力 (kN)
e : 基礎中央から合力作用位置までの距離 (m)
B : 堤底厚 (m)

②滑動に対する安定

独立基礎型流木捕捉工が滑動に対して安定であるためには、次の条件が必要である。

$$V \cdot f > H \quad \dots \cdot OK$$

V: 独立基礎型流木捕捉工に作用する垂直成分の合力 (kN)
 H: 独立基礎型流木捕捉工に作用する水平成分の合力 (kN)
 f: 基礎地盤の摩擦係数

③基礎地盤に対する安定

独立基礎型流木捕捉工底面における応力 (P) は基礎地盤の反力でもあり、最大反力 (P₁) が基礎地盤の許容支持力より小さければ地盤は安定である。基礎地盤の最大反力は次式で求める。

$$P_1 = \frac{V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B} \right)$$

[参考] 基礎地盤の摩擦係数

基礎地盤の摩擦係数の標準値は、表 2.2.1 のとおりである。

表 2.2.1. 基礎地盤の摩擦係数

基礎の状態	摩擦係数
岩盤・締まった砂礫層	0.7
締まった普通土	0.6

[参考] 基礎の許容支持力

独立基礎型流木捕捉工の許容支持力は、経験的に次のような値とすることが多い (長期荷重の場合)。

表 2.2.2. 地盤の許容支持力

地盤の種類	許容支持力 (長期荷重)
岩盤	700kN/m ²
礫層	300~600kN/m ²
砂質地盤	200~300kN/m ²

2-2-3. 独立基礎型流木捕捉工の構造計算条件

独立基礎型流木捕捉工の部材は、地表突出部である流木止工に作用する水圧に対し、安全な構造とする。

[参考]

部材の構造計算に用いる諸元及び計算手法は以下を参照してよい。

表 2.2.3. 標準的な独立基礎型流木捕捉工の構造計算諸元

項目	諸元	備考
独立基礎型流木捕捉工間隔	λ (m)	最小間隔 2.5m
鋼管高さ	H1 (m)	標準 2.0m
越流水深	hc (m)	
流水の単位体積重量	ρ (kN/m ³)	標準 11.80 kN/m ³
鋼管断面形状	φ 318.5mm t=10.3mm	STK490 (標準)
断面積	A=79.84cm ²	STK490 (標準)
断面係数	Z=595.50cm ³	STK490 (標準)
鋼管の許容曲げ応力度	σ _{ba} =185.00N/mm ²	長期強度
鋼管の許容せん断応力度	τ _a =105.00N/mm ²	長期強度

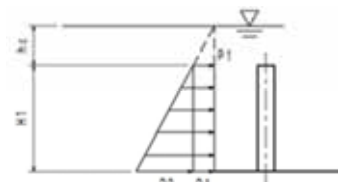


図2.2.5.作用外力モデル図

①作用外力の算定

$$P1 = hc \cdot \rho \cdot \lambda \quad (\text{kN})$$

$$P2 = H1 \cdot \rho \cdot \lambda \quad (\text{kN})$$

②断面力の算定

・最大曲げモーメント

$$M_{\max} = 1/2 \times P1 \times H1^2 + 1/6 \times P2 \times H1^2 \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$$

・最大せん断力

$$Q = P1 \times H1 + 1/2 \times P2 \times H1 \quad (\text{kN})$$

③応力度照査

柱用鋼管の曲げ応力度、せん断応力度及び合成応力度に対して以下を照査する。

・曲げ応力度

$$\sigma_b = \frac{M_{\max}}{Z} \leq \sigma_{ba}$$

・せん断応力度

$$\tau = \frac{Q}{A} \leq \tau_a$$

・合成応力度

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} + \left(\frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 \leq 1.0$$

3. 独立基礎型流木捕捉工の施工

3.2. 施工管理

3-2-1. 管理基準

独立基礎型流木捕捉工の施工管理については、所管の森林整備保全事業施工管理基準にある項目および基準値を参考とする。

[参考] 中部森林管理局における管理基準

施工時の管理において、以下の項目については、記載する値を標準として管理し、以下によらない場合は、精度および施工性を考慮し、監督職員と協議の上で決定する。

①床掘

独立基礎型流木捕捉工は、一定規格で支柱鞘管がセットされたライナープレート成型枠を用いた独立基礎であることから、床付面が竣工時の構造物高さを規制する。

このため、掘削面の基準は②設置高さの基準に従うものとし、コンクリート治山ダムの高さの基準で管理する。

(コンクリート治山ダム本体工；高さ $h \pm 30\text{mm}$)

②設置高さ

当施設は独立基礎であることから、連続基礎を持った一般的なスリットダムの高さの管理基準値 ($h \pm 10\text{mm}$) による設置が極めて厳しい。

このため、鞘管、基礎コンクリート天端、支柱頭部について、コンクリート治山ダムの高さの基準で管理する。

(コンクリート治山ダム本体工；高さ $h \pm 30\text{mm}$)

③基礎ライナープレートと支柱の設置間隔および堤長

独立基礎型流木捕捉工の設置間隔は、支柱鞘管の位置において、それぞれの間隔および両端の施設間の延長により管理する。

不連続構造で設置するスリットダム鋼材の間隔を管理する基準値がないことから、管理基準としては、独立して設置する待ち受け治山施設の値(なだれ予防施設の値を参照し、 -200mm 、+はNG)を参考として、各スリットの間隔を $\pm 100\text{mm}$ で管理するとともに、両端の施設間延長をコンクリート治山ダムの延長の基準で管理する。(コンクリート治山ダム本体工；延長 $L = -50 \sim -150\text{mm}/300\text{m}$)

④支柱の傾き

支柱の傾きについては、鋼製ダム工本体工(不透過型)の法勾配の基準値で管理する。

(法勾配 $\pm 0.2\text{分} = 1.1^\circ$)

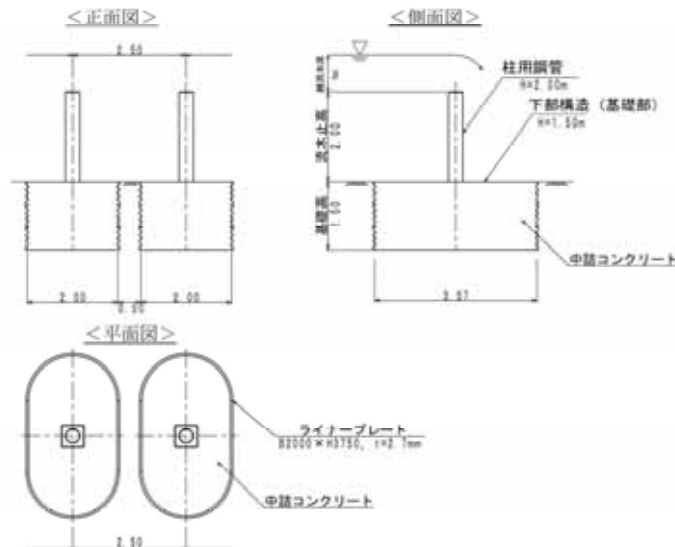


図2.1.2.独立基礎型流木捕捉工の標準的な構造図

5. まとめ（今後の課題について）

設計・施工における今後の課題について （ 過大な浸食 や 堆積の発生 ）

【設計・施工編】二次元氾濫シミュレーション

(1) 目的と方針

設計・施工ガイドライン1-3-1において、独立基礎型流木捕捉工はその設置により安定した溪床に影響を及ぼさないこととしている。ここでは過大な侵食や堆積が発生しない施設の配置案について、土石流シミュレーションを用いて検討を行ったものである。

（略）

④ 解析パターン

以下の4パターンの施設配置に無施設時を加えた5パターンでの解析を行った（シシ沢及びホコロ沢いずれも現況施設はV字型）

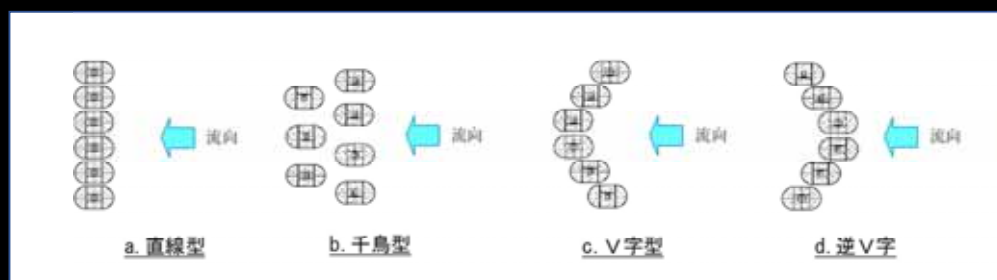


図5.3. 独立基礎型流木捕捉工の平面配置パターン

平面配置型	シシ沢（土石流堆積区間）			ホコロ沢（掃流区間）		
	流動深分布	堆積深分布	評価	流動深分布	堆積深分布	評価
無施設時			概ね一定幅で流下し比較的均等に堆積する。			下流解析範囲まで到達しているものの、土石流堆積区間と比較して土砂は流れにくい。
直線均等配置 ◎2.5m (現況)			右岸への側方流及び中央付近に明瞭な堆積が発生する。			明瞭な側方流は発生していない。
千鳥型 相互間隔：4.0m			右岸への側方流の発生は僅かであるが堆積土砂量は最も大きくなる。			明瞭な側方流は発生せず、堆積土砂量は最も少ない。
V字型 ◎2.5m			右岸への側方流及び中央付近に明瞭な堆積が発生する。			明瞭な側方流は発生していないが、堆積土砂量は最も多い。
逆V字型 ◎2.5m			両岸への側方流及び中央付近に明瞭な堆積が発生する。			明瞭な側方流は発生していない。

表 5.2 二次元定常シミュレーションによる土石流堆積区間・掃流区間における流動深と堆積深の解析結果

(3) 解析結果

シシ沢（土石流堆積区間）においては配置パターンと流動深分布・堆積分布に明瞭な違いが無かった。ホコロ沢（掃流区間）では、千鳥配置型パターンの堆積土砂量が最も小さく、V字型配置パターンの堆積土砂量が最も大きくなること判った。

このことから、土砂濃度が小さく土砂流状に流下する掃流区間では、千鳥型配置を行うことで堆積土砂による埋塞が発生しにくい傾向が示唆される。また、V字型配置を行うことにより、流木のみならず土砂を一定量捕捉する機能が期待できるものと察する。

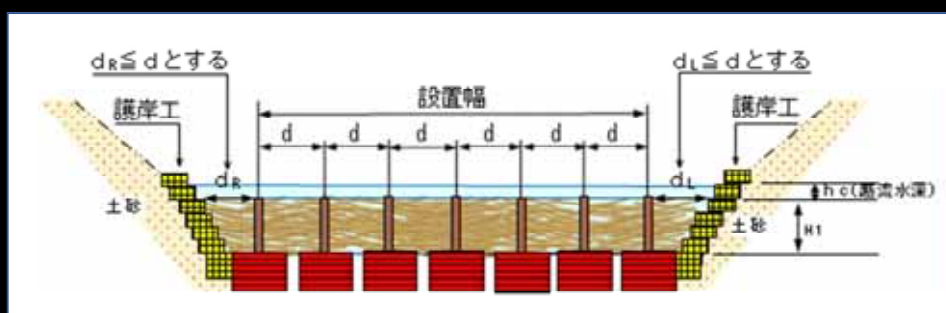
【設計・施工編】 1.3. 計画

1-3-4. 独立基礎型流木捕捉工の設置幅

②必要に応じて溪岸の侵食対策（護岸）を検討する。

〔解説〕

設置箇所の溪岸部分が土砂である等、溪岸侵食が懸念される場合においては護岸工を設置し、最も両岸に近い柱用鋼管上端から溪岸までの水平距離（ d_R 、 d_L ）がスリット間隔（ d ）以下となるように設置幅若しくは護岸工の位置を設定する。護岸工の高さは設置箇所の越流水深（ h_c ）を上回る高さとする。



調査・計画における今後の課題について

(防災事業の推進 と 生物多様性の保全)

○ 2021年より、流域治水関連法案が閣議決定されると共に「流域治水推進行動計画」が策定され、国や流域自治体、企業・住民等、あらゆる関係者の協働による治水対策「流域治水」の推進が始まっている。このような中、林野庁においては、「流域治水」の取組として、国土交通省と連携した流木対策等の森林整備・治山対策を推進していくとの考えが示されている。

○ 2015年9月の国連サミットにおいて全会一致で採択されたSDGs（持続可能な開発目標）のターゲット15.4では、2030年までに持続可能な開発に不可欠な便益をもたらす生物多様性を含む山地生態系の保全を確実に行うことが示されているところである。

【調査・計画編】5.2. 溪畔林保全手法の考え方

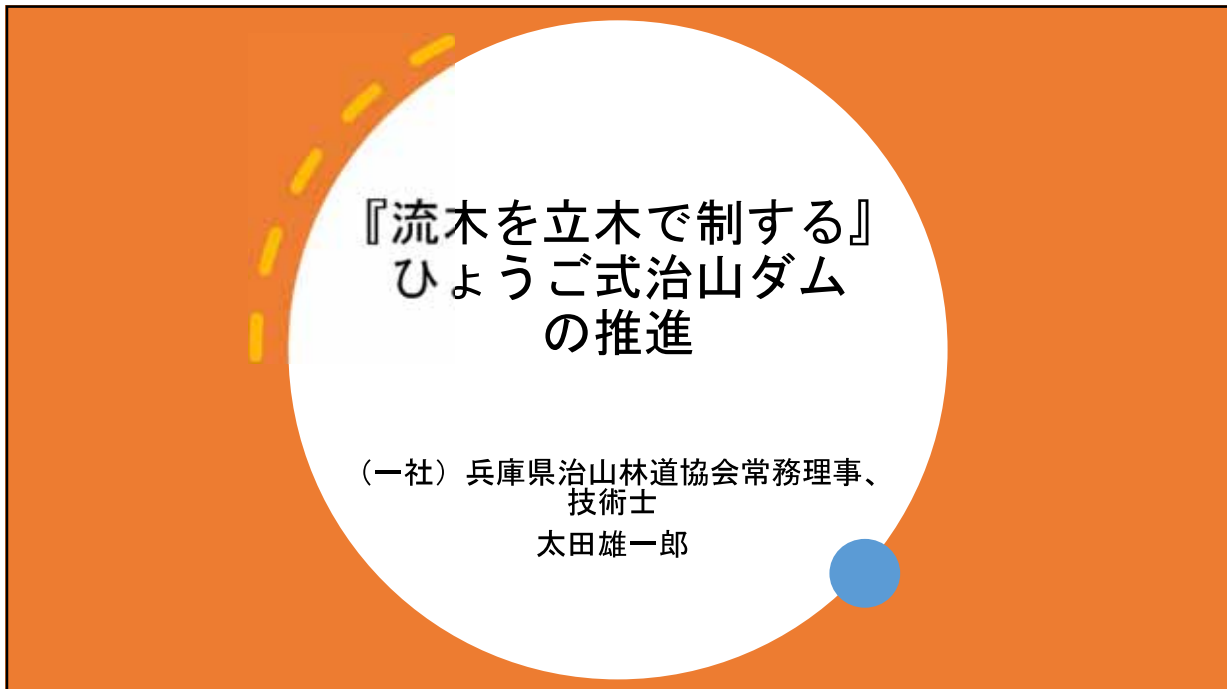
(1) 独立基礎型流木捕捉工による溪畔林保全の考え方

溪畔林内に生育する比較的小径で流木化し易い立木を、独立基礎型流木捕捉工により一定期間保全することで、比較的大径の流木化しにくい立木から構成される溪畔林（緩衝林）に誘導する。

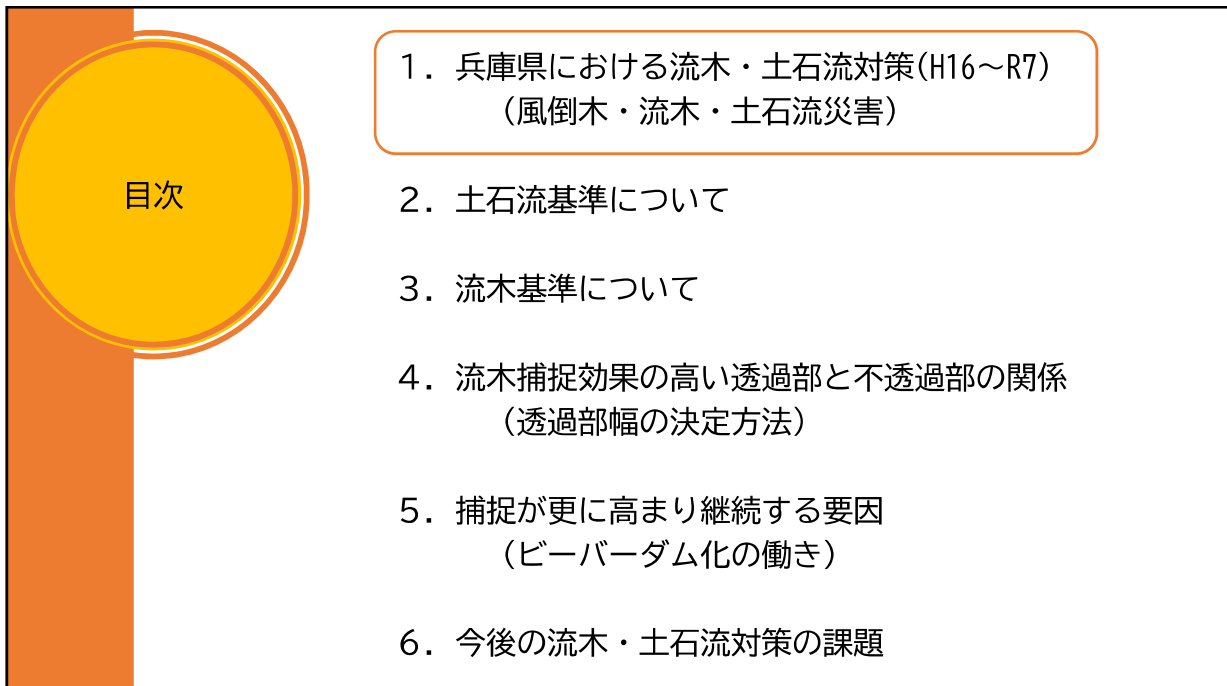
- 生物多様性(生態系・種・遺伝子)の保全
- 遺伝子の攪乱(連続性の確保)



ご静聴ありがとうございました



1



2

1. 兵庫県における流木・土石流対策 まとめ

兵庫の流木・土石流対策計画と対象地の変遷 (H16～)		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	2	3	4	～7	備考	
区分	年度	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	～2026		
主な災害		H16台風23号		H18.7月降雨		H21台風9号						H26丹波市豪雨		H30.7月豪雨									
山地災害の特徴		崩壊・土石流・風倒木		風倒木地の再度崩壊		風倒木跡地等からの崩壊・土石流・流木						0次谷等からの崩壊・土石流・流木		崩壊・土石流・流木・地すべり等		土石流の9割は人工林区域							
計画	復旧	16災復旧工事				21災復旧工事						26災復旧工事		30災復旧工事									
	予防	治山		風倒木フォローアップ作戦		終了																H30年災で影響なしを確認	
				山地防災・土砂災害対策		第1次		第2次		第3次		第4次										公共・県単独事業	
				災害に強い森づくり		第1期		第2期		第3期		第4期										県民緑税事業	
場所と工法	風倒木跡地	山腹		ロープネット・ロックボルト等		個別計画による																	
	人工林地	渓流		スリット式ダム等		治山ダム（流木止め付き）等								ひょうご式治山ダム等									
						危険木除去・間伐、簡易流木止め工等																	
治山ダムの被災と主な技術基準の変遷 (H12～)		被災状況		H16：土石流による被災3基		H21：土石流による被災3基						H30：土石流による被災1基										計7基（S53～H2施行分）	
技術基準	天端厚	H12～：2.0m										2.0～4.0m										R2改訂 土石流基準	
	設計外力	H12～：流体力考慮												H16・21災相当の流体力									
	水圧	H17～：水中土圧																					
	袖・本堤	なし		H17～：縦横鉄筋補強																			
水平編目	H9～：差筋補強																						
流木対策スリット式ダム	なし		砂防基準								ひょうご式治山ダム 企画構想		ひょうご式治山ダム開発完了 選定部と不選定部の関係等								R2改訂 流木基準		

3

H26年丹波市豪雨災害（市島町徳尾）

1. 兵庫県における流木・土石流対策 (H26丹波災害)



0次谷崩壊とおびただしい流木

4



1. 兵庫県における流木・土石流対策 (H26丹波災害)

H26年丹波市豪雨災害（乙河内）

0次谷崩壊と流木・土砂の流出（寺の本堂に流入）

5

治山ダムの被災と主な技術基準の変遷 (H12～)

区分	年度	29	30	31	2	3	4	～7	備考
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	～2026	
被災状況		H30: 土石流による被災1基							計7基 (S53～H2施行分)
技術基準	天端厚	H12～: 2.0m		2.0～4.0m					R2改訂 土石流基準
	設計外力	H12～: 流体力考慮		H16・21災相当の流体力					
	袖・本堤	なし		H17～: 縦横鉄筋補強					
	水平継目	H9～: 差筋補強							
流木対策スリット式	ひょうご式ダム企画構想・実験		ひょうご式ダム新基準スタート 透過部と不透透部の関係等					R2改訂 流木基準	

ひょうご式治山ダムに係る技術基準（兵庫県策定 令和2年10月）

R2改訂 流体力を考慮する治山ダム設計基準（土石流基準）

透過型治山ダム設計基準（流木基準）

①本堤、及び袖の安定計算
②流体力等の設計外力
③放水路の断面計算

①越流部/非越流部毎の安定計算
②急勾配溪流の透過部幅の決定

6

目次

1. 兵庫県における流木・土石流対策(H16～R7)
(風倒木・流木・土石流災害)
2. 土石流基準について
3. 流木基準について
4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係
(透過部幅の決定方法)
5. 捕捉が更に高まり継続する要因
(ビーバーダム化の働き)
6. 今後の流木・土石流対策の課題

7

2. 土石流
基準について

課題（1）急勾配渓流における有効な流木対策

① 縦断勾配による適用を急勾配に拡大

ダム種別 ^①	現渓流勾配 ^②		
	$\theta < 3^\circ$	$3 \leq \theta \leq 10^\circ$	$10 < \theta < 20^\circ$
簡易スリット式 ^③	1.5 ^④	— ^⑤	— ^⑥
スリット式 ^⑦	— ^⑧	2.0 ^⑨	2.0～4.0 ^⑩

ひょうご式ダムの範囲

② 標準化のため設計外力が一定以下範囲

→ $3 \leq \theta \leq 10^\circ$ は、透過高・幅、部材等の標準化

↕

10 < θ < 20度も、出来る限り標準化を目標とする

8

県内における土石流による治山ダムの被災状況

兵庫県内における土石流による治山ダム被災状況

地区	NO	施行年度	堤高 (m)	天端厚 (m)	構造形式	集水面積 (合流) (ha)	勾配 (tanθ)	災害年	被災状況
1	1	S57	8.0	1.2	高ダム	5.43	0.30	H16	袖流出、本体上部1.2m流出
	2	S56	6.0	1.0	低ダム	4.76	0.31	"	"、本体上から4mに水平クラック
	3	S58	7.0	"	"	4.42	"	"	"、本体上部1.4m流出
3	4	H元	6.0	1.5	高ダム	9.57 (14.42)	0.23	H21	袖流出
	5	"	4.0	"	低ダム	8.39 (13.24)	0.27	"	"
	6	H2	7.0	"	高ダム	6.93	0.29	"	"、本体上から4m流出

急勾配・小流域の崩壊土石流

1 被災ダムの立地条件

- (1) 集水面積は5～10ヘクタール前後の小流域
- (2) 渓床勾配tanθ=0.23～0.31（13度～18度）の急勾配

2 近年の降水量増加に伴う山地災害

- (1) 短時間強雨に起因する崩壊・土石流
- (2) H26年8月丹波市豪雨、91mm/hでは、急勾配・小流域の0次谷を起点とする崩壊・土石流の多発

9

被災ダムの安定計算

破壊された高さyにおける安定計算

任意の高さy（破壊された高さなど）における合力の作用位置等を計算して検証

★(1) 合力の作用位置d(y)

$$d(y) = (Mv(y) - Mh(y)) / \sum V(y)$$

★(2) 偏心距離e(y)

$$e(y) = B(y)/2 - d(y)$$

★(3) 内部応力

$$\sigma 1(y) = \sum V(y) / B(y) \times (1 + 6e(y) / B(y))$$

$$\sigma 2(y) = \sum V(y) / B(y) \times (1 - 6e(y) / B(y))$$

★(4) 安定の検討

① 転倒安全率 $Mv(y) / Mh(y) > 1.0$

② 滑動安全率 $(\sum V(y) \times 0.7 + B(y) \times 330) / \sum H(y) > 1.0$

③ 圧縮応力 $\sigma 1(y) < 700 \text{ kN}$

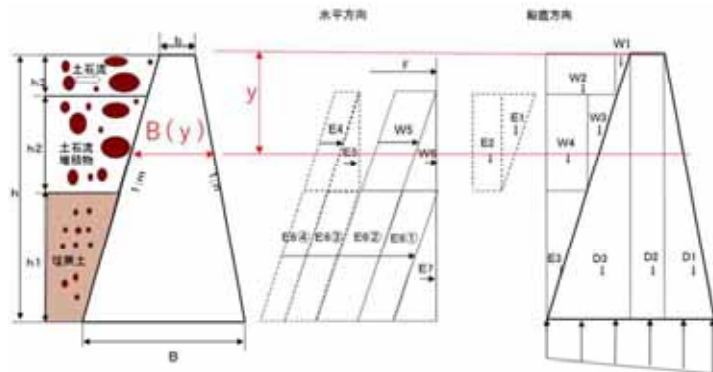
④ 引張応力 $\sigma 2(y) < 225 \text{ kN}$

コンクリート許容せん断応力

コンクリート許容引張応力

10

被災ダムの安定計算 流体力荷重分布



流体力+水中土圧+土圧による荷重

- (1) hは本堤高さ
- (2) h1は土圧高で埋戻高さ
- (3) h2は水中土圧高で (h - h1 - h3) で求められる高さ
- (4) h3は土石流の段波高さ
- (5) yは破壊が想定される本堤の任意の高さ

11

流体力の計算法

R2改訂要旨

○土石流流下幅をダム堆砂敷幅から溪流幅とした

流体力の計算法

i 土石流流下幅 $B = \alpha \sqrt{Q}$ 、 $\alpha = 2$ (溪流幅) ~ 5 (ダム堆砂敷幅)

ii 流動する土石流最大濃度 C_d 、堆砂土砂濃度 $C_0 = 0.6 \Rightarrow$

$$C_d = \rho \cdot \tan \theta / \{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)\}$$

iii 土石流のピーク流量 $Q_{sp} \Rightarrow Q_{sp} = Q \cdot C_0 / (C_0 - C_d)$

iv 段波高 $h \Rightarrow h = \{n \cdot Q_{sp} / (B \cdot \sqrt{\sin \theta})\}^{(3/5)}$

流速 $U \Rightarrow U = (1/n) \cdot h^{(2/3)} \cdot \sqrt{\sin \theta}$

流体力 $F \Rightarrow F = (\rho d / g) \cdot h \cdot U^2$

※ ρd は土石流重量 = $\sigma C_d + \rho(1 - C_d)$

流体力 F は、土石流流下幅 B と反比例の関係



土石流がダムに衝突する時の流体力を求めるため、ダム堆砂敷幅 (以下「ダム幅」) としていたが、広すぎるため改訂

12

ダム衝突時の土石流流下幅は溪流幅であることを実験的に確認

H28年以降、流木捕捉を目的とする「ひょうご式治山ダム」に関する実験

CASE2-34 (土石流の重ね:2波目)

不透過型治山ダム正面 | 不透過型治山ダム側面

・供給条件
清水流量: 17.25m³/sec
土石流ピーク流量: 37.5m³/sec
供給土砂量: 766m³
流木量: 52.5m³ (217本)
流木諸元: 直径21cm 長さ7m

・治山ダム
タイプ: 不透過型
設置位置: 15° 区間末端
治山ダム高: 5.0m

土石流は最初、勢い強く、ダム堆砂敷きを溪流幅のまま進入

土石流のダム衝突幅は、ダム幅ではなく、溪流幅である

減水すると土石流はダム敷に広がり、最初の土石流の洗堀を埋める

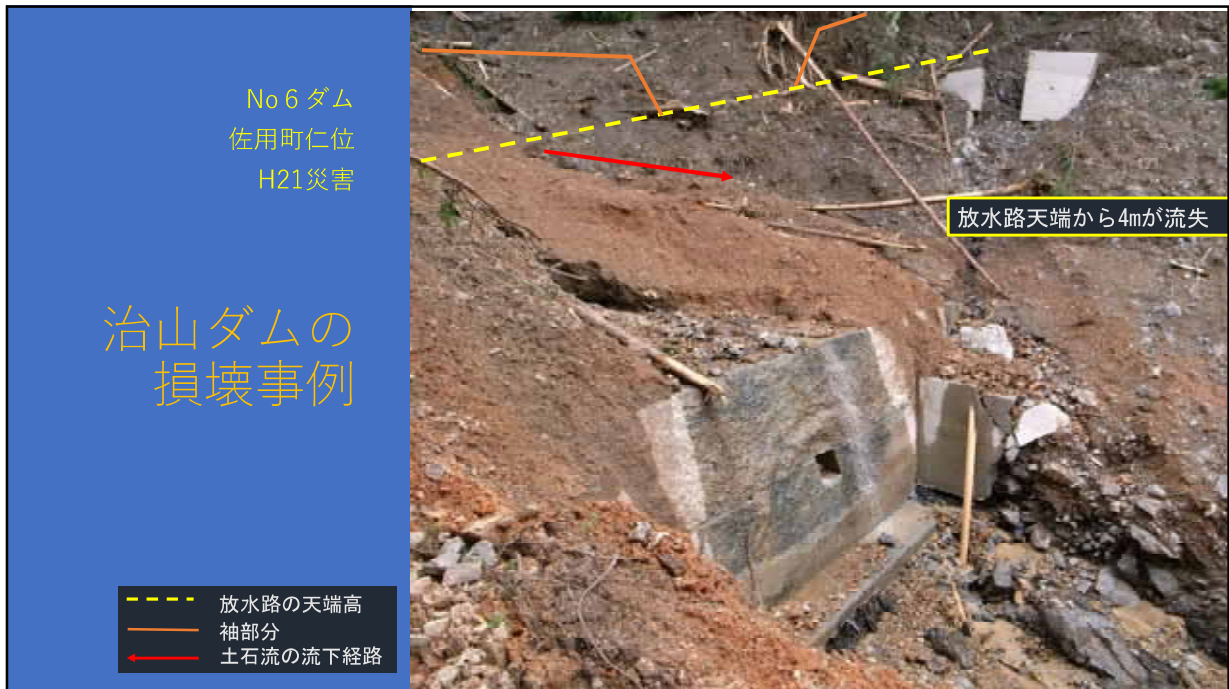
13

No 4, 5, 6 ダム
佐用町仁位
H21災害

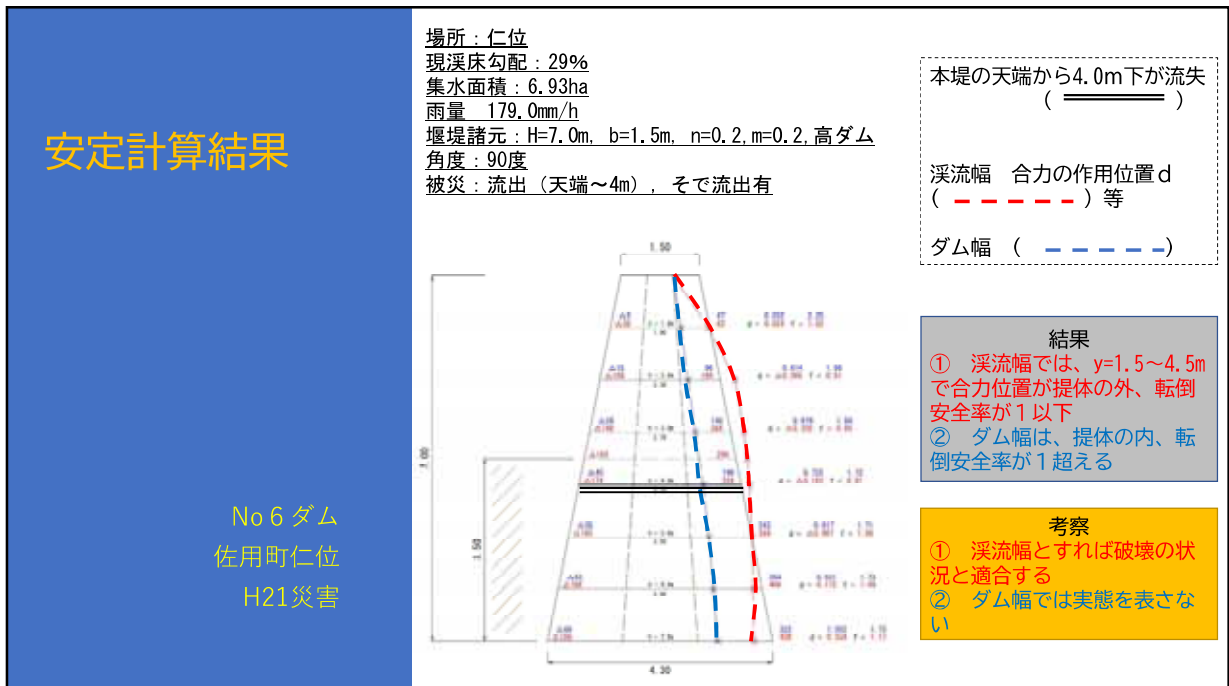
治山ダムの 損壊事例



14



15



16

各ダムの安定計算結果と妥当性

安定計算の結果と妥当性

被災ダムの被災高さにおける応力分析

地区	箇所	ダム No	分析した衝突幅	条件		原形、現渓床勾配					総合判定	
				低ダムでは土石流水深分の洗堀 (m)	土石流水深 (m)	部分高さy (クラック、流出、袖高さ等)						
					y、構造物	転倒安全率	滑動安全率	滑動1となるせん断抵抗力kN/m ²	σ1 kN/m ²	σ2 kN/m ²		
1	1	1	渓流ダム		1.13	1.2、本堤	0.96	9.04	21.5	100.4	△ 51.6	○
					0.66		2.25	23.50	△0	54.1	△ 5.8	×
2	2	2	渓流ダム	△ 1.20	1.15	4.0、本堤	0.94	8.20	0.0	333.5	△ 189.8	○
					0.67		1.81	13.74	△0	177.2	△ 33.5	×
	3	3	渓流ダム	△ 1.10	1.06	1.4、本堤	0.59	7.74	25.5	172.5	△ 118.0	○
					0.61		1.56	22.50	△0	78.7	△ 23.2	×
3	4	4	渓流ダム		0.94	1.5、袖部	1.06	12.96	6.1	113.7	△ 54.0	○
					0.54		2.27	23.18	△0	64.5	△ 4.8	×
	5	5	渓流ダム		1.45	1.5、袖部	0.44	4.79	52.5	246.2	△ 186.5	○
					0.83		1.03	12.85	6.5	116.1	△ 56.4	○
6	6	渓流ダム		1.29	4.0、本堤	0.91	6.55	6.0	324.1	△ 173.8	○	
				0.74		1.77	9.65	△0	172.0	△ 37.3	×	

※1 赤字は破壊に対し矛盾のない値、青字は矛盾する値、緑字はどちらともいえない値
 ※2 △0はマイナスを示す意味

☆ 渓流幅の流体力は本体・袖の破壊と全て適合 R2改訂土石流基準として妥当

17

上流ダムの効果を考慮

上流治山ダムの効果；垂直距離が有効高で減少

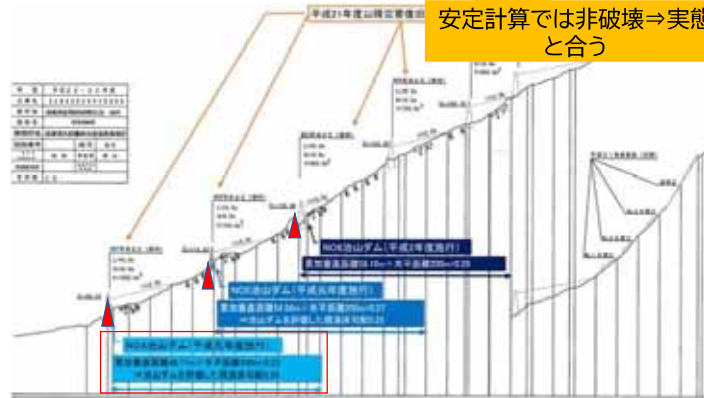
☆ 既設治山ダムの効果を評価する現渓床勾配

N04治山ダムの計画、区間長200m、
 治山ダムを評価しない場合は $\theta = 46.71/200 = 0.23$

区間内にある治山ダムを評価
 有効高7mとして、 $\theta = (46.71 - 7) / 200 = 0.20$

安定計算では破壊⇒実態と合わない

安定計算では非破壊⇒実態と合う



18



19

上流ダムの効果 による安定計算

No4ダム
佐用町仁位
H21災害

場所：仁位
 現溪床勾配：23(20)%
 集水面積：9.57ha
 雨量 179.0mm/h
 堰堤諸元：H=6.0m, b=1.5m, n=0.2, m=0.15, 高ダム
 角度：90度
 被災：そで流出有

本堤の被害なし

上流ダムを評価しない23%の
場合の作用位置 d (- - - -)

上流ダムを評価した20%の場
合の作用位置 d
(- - - -)

結果

① 上流治山ダムを評価しないと、 $y=1\sim6m$ で合力位置が堤体の外、転倒安全率が1以下

② 上流ダムの評価により、堤体内、転倒安全率が1超

考察

① 上流ダムを評価しないので実態と合わない

② 上流ダムの評価により実態を表し、下流ダム断面の節約が可能

20

2. 土石流
基準について

R2改訂土石流基準

①流体力をH16, 21災害相当の大きさとする
(溪流幅による計算)

②流体力が治山ダムを壊すほどの場所を区分

被災モデルを踏まえた新たな基準

年度	R2 (2020)			備考
天端厚 (m)	2.0~4.0			H12から転石径の2倍で最大4.0mとしたが、流体力安定計算により2.0m以上となるのはR2以降
有効高 (m)	6~7m程度			S58 (1983) 以降ほぼ変化なし
水平打継面	差筋補強; U型鉄筋			コンクリート許容引張応力の一部補強
袖・本堤の打継面	差筋補強; U型鉄筋			"
	縦横鉄筋補強			
土石流対策	流体力発生場所による区分			R2から場所を特定
	$3 \leq \theta \leq 10$ 度	$10 < \theta < 20$ 度	左の内A < 15ha	θ : 現渓床勾配、A: 集水面積
安定計算	全高	全高	部分高	全高と部分高安定計算
設計外力	HWL	HDL	無し	HWL: 越流水深、HDL: 土石流水深
	1/2水圧	水中土圧	流体力破壊 チェック	R2から流体力はこれまでの約3倍
	土圧	土圧	土圧	R2から土圧は任意の高さ
基準改訂のきっかけ	2004年台風23号、2009台風9号、2014丹波市豪雨、2018西日本豪雨			2016流木対策のため「ひょうご式治山ダム」開発構想

21

目次

1. 兵庫県における流木・土石流対策(H16~R7)
(風倒木・流木・土石流災害)
2. 土石流基準について
3. 流木基準について
4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係
(透過部幅の決定方法)
5. 捕捉が更に高まり継続する要因
(ビーバーダム化の働き)
6. 今後の流木・土石流対策の課題

22

3. 流木基準

① 兵庫県ではH22年度から流木対策として県単独緊急防災事業を創設し、透過型治山ダムを整備推進

→ 砂防技術基準を準用、満砂後は流木等の除去

② 治山ダムの多くは山脚固定を目的、かつ、急勾配や狭い谷地形では、除石のための道路の設置が困難

→ 透過型治山ダムの設置可能な適地が少なくなる

透過型治山ダムの施工数が年々減少傾向
(H22~28県単事業での透過型治山ダム70基)

→ 課題(2) 資源循環型林業を進める中山間地で有効な流木対策ができない

23

3. 流木基準

課題(2) 透過型治山ダム適地が無く有効な対策ができない

① 満砂後、流木等の除去をしなくてもよい、道路設置を標準としない

→ 満砂後も透過部からの土砂流出がなく、山脚固定機能が継続すること

② 設計の標準化を図り、現場において採用しやすい

→ 設計外力が一定以下になる範囲

→ 効果的な流木対策の促進が可能

24

3. 流木基準

ひょうご式治山ダムの設計コンセプト

① 土石流に伴う流木を捕捉 丹波市豪雨、0次谷崩壊・流木

ア) 土石流流体力を考慮する

イ) 流木捕捉率の高い透過型

道路設置困難・透過ダム適地減少

② 山脚固定機能により満砂後の除石等が不要

ウ) 透過部からの土砂流出が少ない

エ) 満砂後も流木・土砂流出防止効果が継続する

現場において採用されやすい

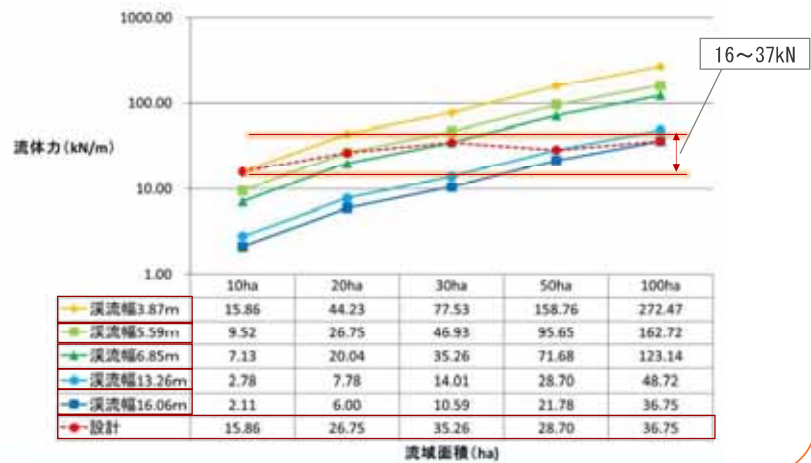
③ 流木対策の促進のため透過部の構造設計が標準化

25

3. 流木基準

ア) 土石流流体力を考慮する

溪流勾配10度におけるダム衝突時の流体力 F



26

3. 流木基準

ア) 土石流流体力を考慮する

近年の兵庫県における治山の高ダム計画件数
最頻度流域面積は10~15haで、100haを超える場合は数件
⇒面積の限度を100ha

溪流幅をレジーム幅で標準化

$\theta \leq 10$ 度では、流体力 $F=16 \sim 37 \text{ k N/m}$ 、流速 $V=3.5 \sim 4.4 \text{ m/s}$

$\theta \leq 20$ 度では、 $F=135 \sim 318 \text{ k N/m}^2$ 、 $V=7.1 \sim 9.1 \text{ m/s}$ と増大

27

3. 流木基準

イ) 流木捕捉率の高い透過型

スリット透過構造は、砂防基準から溪流の状況により、開口部の高
さを変動させたり、流木止め部材の構造が多様化
⇒設計が煩雑

溪流幅をレジーム幅で標準化

透過高=2 mを標準とする

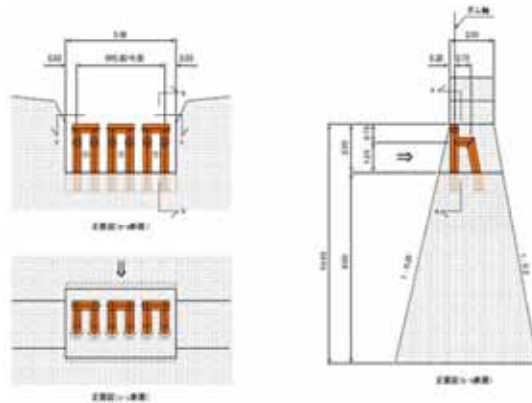
$\theta \leq 10$ 度まで、 $H=0.76 \sim 1.09 \text{ m} \Rightarrow \text{OK}$

$\theta \leq 20$ 度まで、 $H=1.35 \sim 1.95 \text{ m} \Rightarrow$ 袖で溢水防止、OK

28

3. 流木基準

「土石流に伴う流木を捕捉する」ひょうご式ダムのイメージ



- i 透過部と不透過部を持つ構造
- ii 透過部高さは2m
- iii 全高5~8mの高ダム型
- iv 透過部幅は放水路下幅で、現溪流幅（レジーム幅）ほど広くとる

29

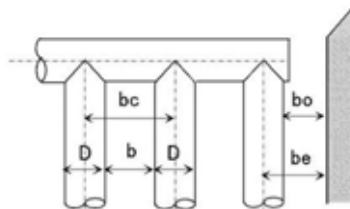
3. 流木基準

ウ) 透過部からの土砂流出が少ない

縦材の間隔

土砂流出を少なくするため、極力、部材間隔を狭く

⇒ 444mmに標準化（開口部空隙率55%）



- D : 鋼管径 (355.6φ)
- b : 鋼管間の純間隔 (444mm)
- bc : 柱芯間隔 (800mm)
- bo : 柱と非越流部の端部との純間隔 (約422mm)
- be : 柱芯と非越流部の端部との距離 (約600mm)

30

3. 流木基準

エ) 満砂後も流木・土砂流出防止効果が継続する

鋼管諸元（鋼製砂防構造物設計便覧）

- i 外径 $D=355.6\text{mm}$ （h型スリットとして実績）
- ii 安全代 $\Delta t=4.0\text{mm}$ （腐食代 0.5mm +余裕代 3.5mm ）
- iii 最上流板厚 $t=16\text{mm}$ （鋼管外径 $D=355.6\text{mm}$ /板厚 $t\leq 40$ ）とした
○外径 $D/t\leq 40$ から最小マーケットサイズは 12.7mm だが
h型スリットの最上流以外は 16mm →資材統一が図られた

iv 性能

- ・山脚固定の効果発揮のためメンテなしで恒久的に使用可能
- ・土石流流体力 318kN/m （溪床勾配 20 度）に耐える
- ・土石流時の礫や流木の衝突に耐える
 - $\theta \leq 10$ 度は、礫径 2m 、流木直径 40cm ・長 20m までOK
 - $\theta \leq 20$ 度は、礫径 1.2m 、流木直径 40cm ・長 20m までOK

→ 効果継続の要求から、土石流に係る性能をほぼ網羅

31

3. 流木基準

ひょうご式治山ダムの設計コンセプト

① 土石流に伴う流木を捕捉

ア) 土石流流体力を考慮する

イ) 流木捕捉率の高い透過型

② 山脚固定機能により満砂後の除石等が不要

ウ) 透過部からの土砂流出が少ない

エ) 満砂後も流木・土砂流出防止効果が継続する

実験で検証

32

3. 流木基準

ひょうご式治山ダムの性能・効果の検証実験

① 模型水路によるモデル実験

H29年度実施、1/25二次元の勾配可変式水路実験

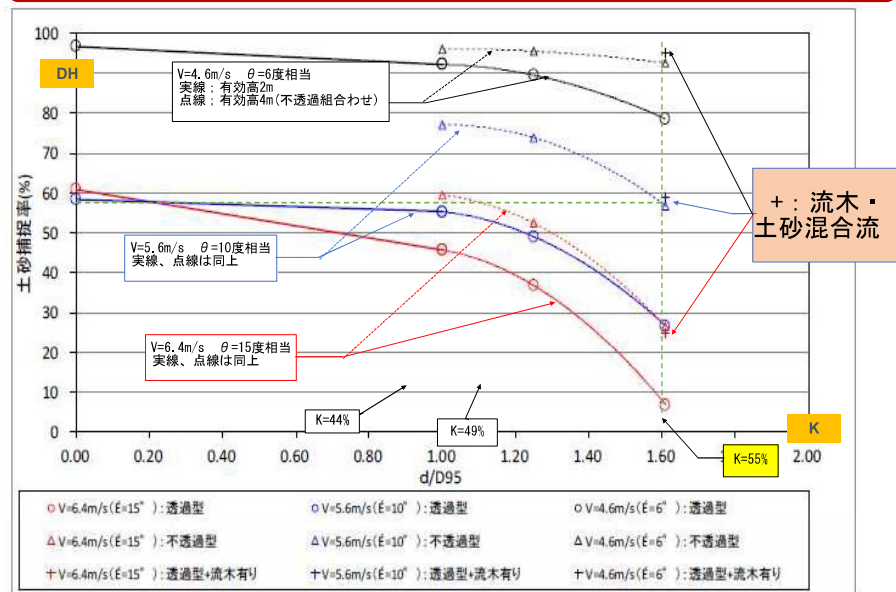


実験水路幅20cmにおいて、流木長を13.3cm（現場3.3m相当）と間伐玉切材ほど短くしているのは、水路側壁による抵抗を排除するため

33

3. 流木基準

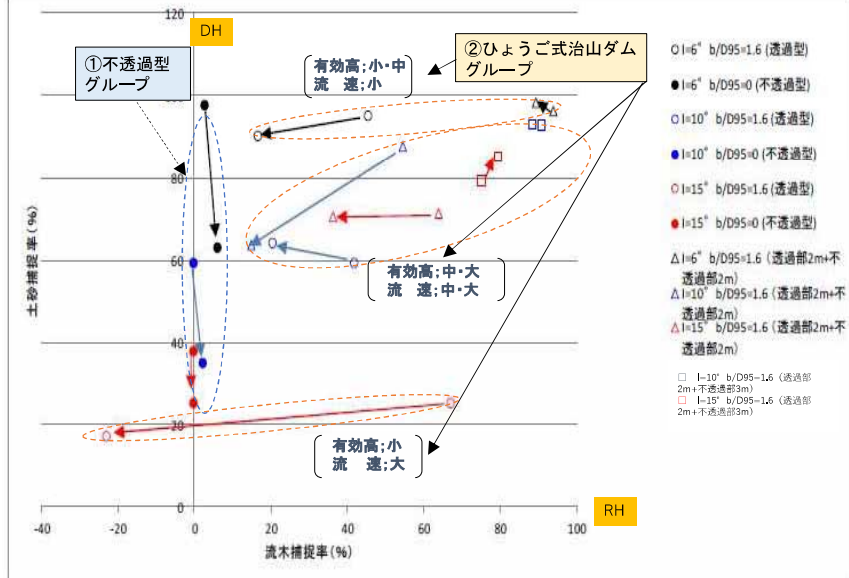
開口部空隙率と流速別の土砂捕捉率



34

3. 流木基準

満砂後も流木・土砂流出防止効果が継続する
(満砂後の捕捉率の変化)



35

3. 流木基準

ひょうご式ダムの開口部空隙率55%の検証結果

ア 流速が低下する10度以下の溪流において有効

イ 10度以下では、満砂後も効果が継続

維持管理上、異常な堆積時以外の除石等は不要である可能性
今後の土砂流出の恐れを勘案して、治山ダムの嵩上げや新設を検討

ウ 土砂のみの流下の捕捉率が不透過型に比べて小さいので、下流に土砂止
ダムが必要

エ 横方向に変化のある三次元水路実験でさらに検証、透過幅や不透過部の有効高の検討が必要

10度を超える場合の性能は保留

36

目次

1. 兵庫県における流木・土石流対策(H16～R7)
(風倒木・流木・土石流災害)
2. 土石流基準について
3. 流木基準について
4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係
(透過部幅の決定方法)
5. 捕捉が更に高まり継続する要因
(ビーバーダム化の働き)
6. 今後の流木・土石流対策の課題

37

4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係

三次元水路による実験

H30～R2年度実施、1/30の寺勾配、V字谷の三次元水路実験

上流ほど勾配が急になる縦断面形



V字谷による横断面形



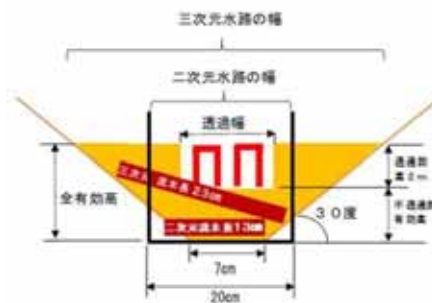
設置勾配	2°	6°	10°	12.5°	15°	20°	25°	30°	合計
斜距離m	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	4,000	18,000
水平区間距離L(m)	1,999	1,989	1,970	1,953	1,932	1,879	1,813	3,464	
累加水平距離ΣL(m)	1,999	3,988	5,958	7,911	9,843	11,722	13,535	16,999	16,999
垂直区間距離H(m)	0.070	0.209	0.347	0.433	0.518	0.684	0.845	2,000	
累加垂直距離ΣH(m)	0.070	0.279	0.626	1.059	1.577	2.261	3.106	5.106	5.106

38

4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係

三次元水路による実験

横断面形の特徴

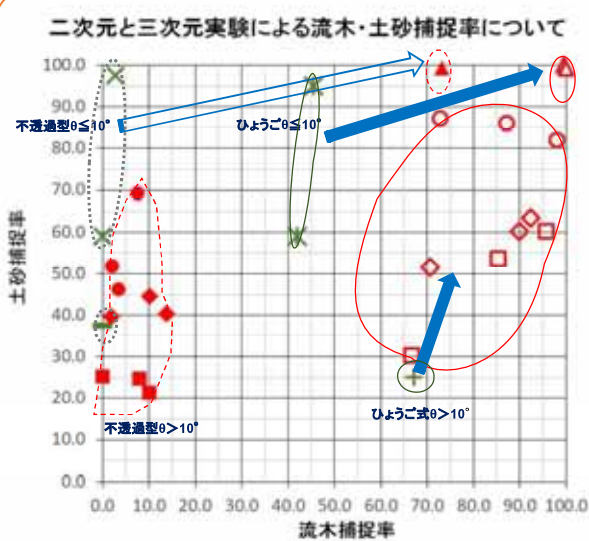


- ① 現場条件により近いV字谷モデル三次元水路、実験縮尺は1/30
- ② 上図の二次元水路（黒太線）は開口部試験における矩形水路断面1/25

39

4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係

ひょうご式と不透過型ダムの流木・土砂捕捉率比較



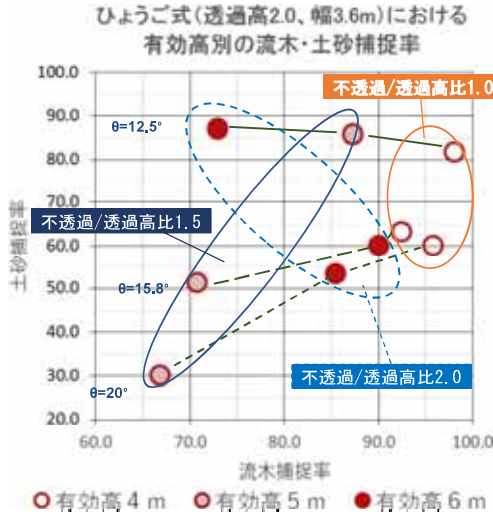
項目	二次元水路(100)	三次元水路(100-101)
ダム形式	不透過型(φ3.6)式	半透過型(φ3.6)式
有効水深	3m	4-6m
透過率	0	0
透過高さ	3.0m	3.0m
不透過高さ	3.0m	3.0m
二次元から三次元への変化	→	→

- 三次元の実験条件**
- ひょうご式の透過幅はレジャー用幅の3.6m(集水面積10ha)
 - ◎高さは4, 5, 6mの3種類
 - ひょうご式は、緑楕円(二次元)から赤楕円(三次元)に右肩上がり
 - 適用勾配10度を超える範囲に拡大可能
 - 不透過型は $\theta > 10^\circ$ では低位だが、 $\theta \leq 10^\circ$ において一定の有効性

40

4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係

ひょうご式捕捉率の改善に向けた検討



i 標準の透過幅における捕捉率

- ア) 有効高 4 m は、 $\theta > 10$ 度でも流木捕捉率 90%
- イ) 有効高 5 ~ 6 m は、流木捕捉率 66 ~ 90% 前後のバラツキ
- ウ) 急勾配ほど捕捉率が低下

ii 捕捉率改善の方向

- ア) 有効高 4 m は、不透過高/透過高比 = 1.0、正面面積に対する透過率 = 11.09%
- イ) 有効高の大きいものについて、透過率 10 ~ 12% を目安として透過幅の拡幅を検討

41

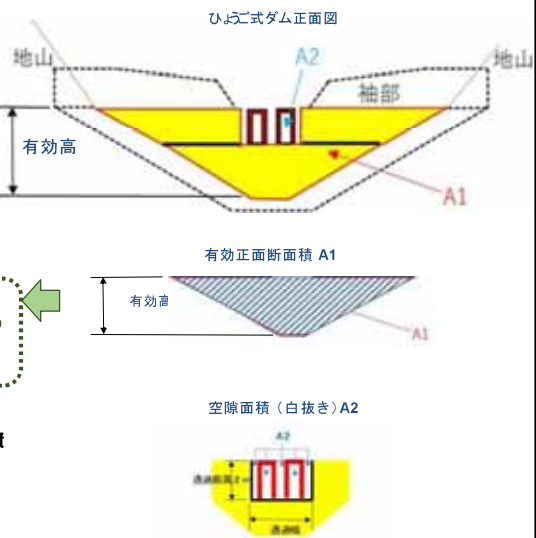
4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係

ひょうご式捕捉率の改善に向けた検討

標準化項目	どうするか?
透過高; 2m	そのまま
透過幅 = 溪流幅	最適長の検討
空隙率; 55%	そのまま

透過率 = 「有効正面断面積に対する空隙面積の比」

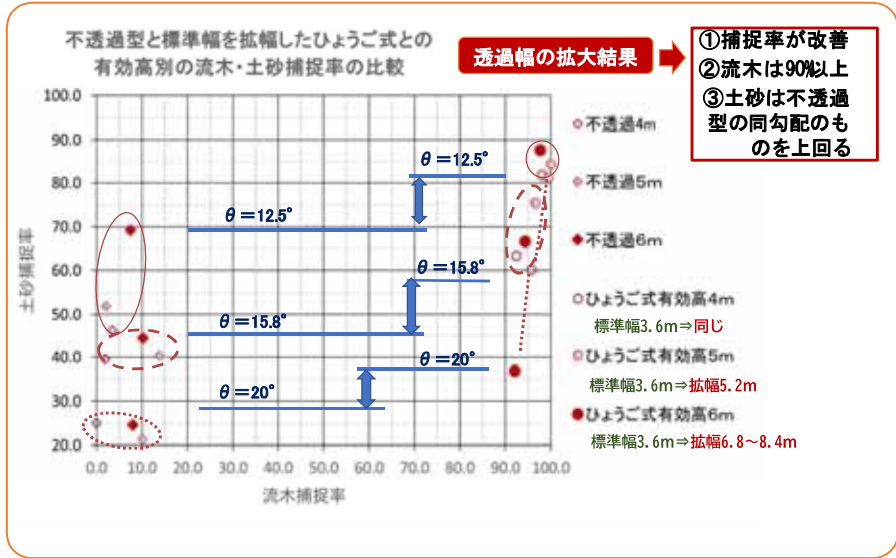
- ① 有効正面断面積; A1
青斜線、正面図黄色+透過部の面積
- ② 空隙面積; A2
透過部の白抜き部分
 $A2 = \text{空隙率} 55\% \times \text{透過部の面積} / 100$
- ③ 透過率; $A2 / A1 \times 100 (\%)$



42

4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係

ひょうご式捕捉率の改善に向けた検討



43

4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係

ひょうご式捕捉率の改善に向けた検討

現渓床勾配毎の実験結果による流木捕捉率90%以上の最小透過幅

ダム有効高			200m程度の平均勾配(実験設置勾配)(度)			
透過部	不透過部	全高	9.5(6)	12.5(10)	15.8(12.5)	20(15)
2	2	4	3.6m	3.6m	3.6m	3.6m
2	3	5	3.6m	5.2m	5.2m	5.2m
2	4	6	3.6m	6.8m	6.8m	8.4m

↓ 渓流幅を基本とした有効高・勾配別の拡幅倍数

急勾配では不透過/透過高比、透過率に従う

ダム有効高			現渓床勾配θ度				備考	
透過部	不透過部	θ ≤ 10	10 < θ ≤ 12.5	12.5 < θ ≤ 15	15 < θ < 20	透過率TK		
2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	11.09		
2.0	3.0	1.0	1.5	1.5	1.5	7.43	10.73	
2.0	4.0	1.0	2.0	2.0	2.4	5.33	10.06~12.43	

44

目次

1. 兵庫県における流木・土石流対策(H16～R7)
(風倒木・流木・土石流災害)
2. 土石流基準について
3. 流木基準について
4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係
(透過部幅の決定方法)
5. 捕捉が更に高まり継続する要因
(ビーバーダム化の働き)
6. 今後の流木・土石流対策の課題

45

5. 捕捉が更に高まり継続する要因

流木の滞留フォーメーション 絡み具合強固；ビーバーダム化

ダム堆砂敷における流木の滞留フォーメーション

- ・ 溪床勾配が緩勾配 ($\theta \leq 10^\circ$) の場合は流木は横配列が卓越、流木・土砂絡みが緩い
- ・ 急勾配 ($\theta > 10^\circ$) の場合は縦配列が卓越、流木・土砂絡み具合が強固







$\theta \leq 10^\circ$ の流木捕捉形状

- ①速度低下、水/土/流木の分離
- ②横に広く、縦に短い
- ③高さが低い
- ④安定的な状態



$\theta > 10^\circ$ の流木捕捉形状

- ①速度大のまま、水/土/流木が混合
- ②横に狭く、縦に長い
- ③高さが高い
- ④一見、危険そうな状態

46

5. 捕捉が更に高まり継続する要因

流木の滞留フォーメーション 絡み具合強固；ビーバーダム化

急勾配において流木捕捉のはじまり（きっかけ）は全てビーバーダム化

どんどん大きくなるビーバーダム化



流木捕捉のきっかけ
小さなビーバーダム化

最後までビーバーダム化が繰り返される

47

5. 捕捉が更に高まり継続する要因

流木の滞留フォーメーション 絡み具合強固；ビーバーダム化

有効高が大きくなると更に大きくなるビーバーダム化

壁のように大きくなるビーバーダム化



有効高大、はじまりも
大きなビーバーダム化

後続の流木が横配列で停止するようになる

48

5. 捕捉が
更に高まり
継続する要
因

流木の滞留フォーメーション 絡み具合強固；ビーバーダム化

急勾配でも不透過型では大きくならないビーバーダム化

はじめ小さな
ビーバーダム化？



流木が絡み合わないで
ビーバーダムの決壊

49

5. 捕捉が
更に高まり
継続する要
因

流木の滞留フォーメーション 絡み具合強固；ビーバーダム化

緩勾配では流木・土砂の分離によりビーバーダム化しない

後続流に押し出される
流木



縦配列の流れが
横配列しながら停止

適切な透過部の設置により流木の捕捉が可能

50

5. 捕捉が
更に高まり
継続する要
因

流木の滞留フォーメーション 絡み具合強固；ビーバーダム化

- ① 急勾配では、透過率が一定程度大きいこと ($\theta > 10$ 度で10.06~12.43%)
- ② 捕捉のきっかけはダム堆砂数におけるビーバーダム化である (")

溪流幅を基本とした有効高・勾配別の拡幅倍数 (縦・横配列色分け)

ダム有効高		不透過/透 過高比	現渓床勾配 θ 度				備考	
透過部	不透過部		$\theta \leq 10$	$10 < \theta \leq 12.5$	$12.5 < \theta \leq 15$	$15 < \theta < 20$	透過率TK	
2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	11.09	11.09
2.0	3.0	1.5	1.0	1.5	1.5	1.5	7.43	10.73
2.0	4.0	2.0	1.0	2.0	2.0	2.4	5.33	10.06~ 12.43

縦配列
横配列
横配列

- 1 透過部の水圧減少により、堆砂数でビーバーダム化し縦配列が卓越
- 2 1と同様にビーバーダム化が起こるが、有効高が高く、堆砂数も広いことから、後続流の流木・土砂が広がりながら、高く、大きな壁のような傾向があり、この壁の影響で更に減速する流木は横配列でふわりと停止
- 3 $\theta \leq 10$ 度では更なる減速によりビーバーダム化はなく流木・土砂分離により横配列でゆっくり停止

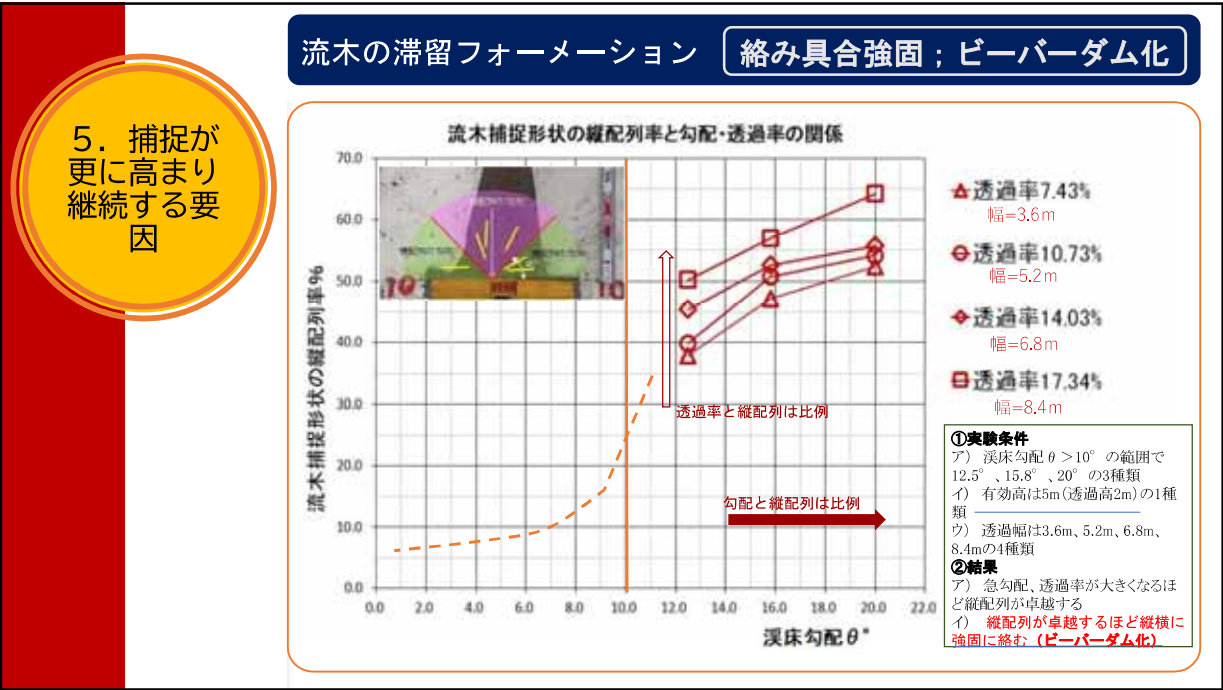
5. 捕捉が
更に高まり
継続する要
因

流木の滞留フォーメーション 絡み具合強固；ビーバーダム化

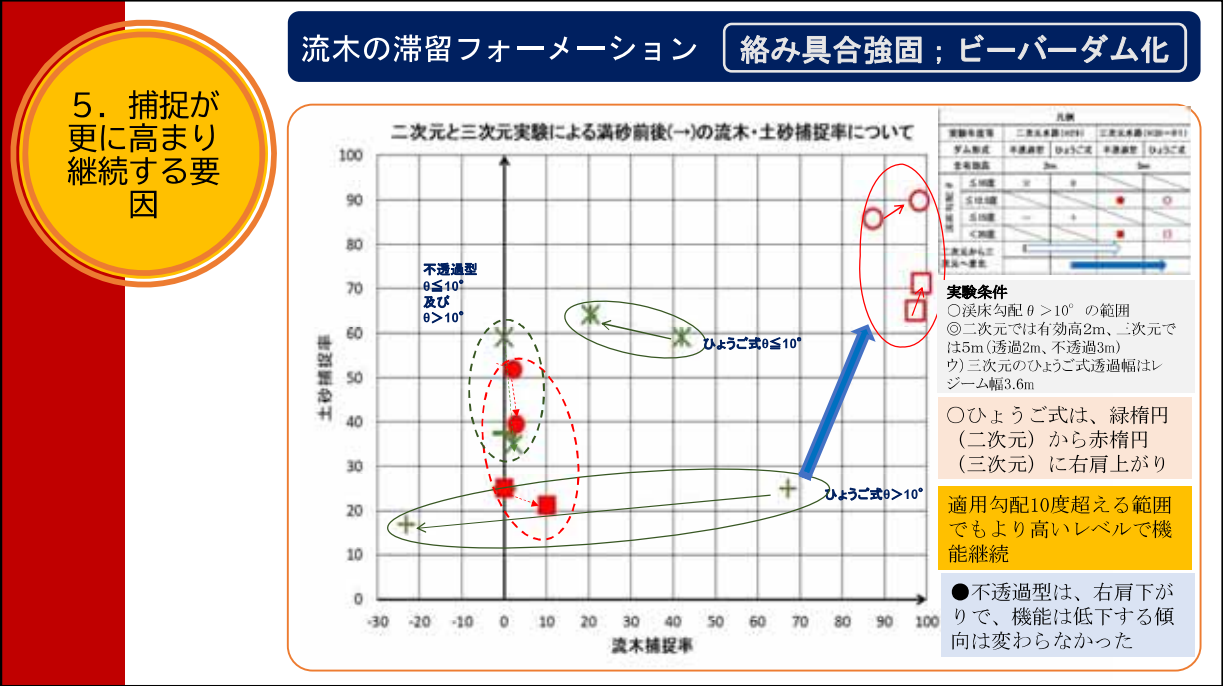
- ① 小枝を何本も運び、川の底に突き刺して、基礎工事。
このとき、小枝は、かじって尖った方を川底に刺し、枝先は斜めにして、上流を向くようにする。
すると、枝先が川の流れに押されるので、川が流れるほど
小枝はますますしっかりと川底に固定される。 ひょうご式治山ダム
- ② 次に、ちょっと太めの木を底の方までしっかりと突き刺して、頑丈な柱を作る。
- ③ こうして土台ができると、その上流側に
泥を塗りこむ。
泥には、木の根や枯葉、水草などが
たくさん混ざっており、それらが土台に
からまって、水を漏らさない。
- ④ さらにその上に太い木を乗せ、木の重み
で土台を押さえつけ、隙間を減らす。
・・中略・・最初は小規模でも、水が溢れ
そうになるにつれてダムも増築するので、
次第に大きくなっていく。 総合ポータルサイト「カナダシアターズ」より



写真：[Larry Lee Photography]/[The Image Bank]/
ゲッティイメージズ/ライセンス (兵庫県治山林道
協会)



53



54

5. 捕捉が
更に高まり
継続する要
因

④三次元水路 ii 満砂後の継続

動画は透過幅を拡幅倍数1.5からW3.6から6.8に拡大した事例、満砂後の捕捉率の継続が確認され、空容量を超える供給量に対しても機能することが判明

CASE2-7 (土石流:2波目)

ひょうご式治山ダム正面 ひょうご式治山ダム側面



・供給条件
清水流量: 17.25m³/sec
土石流ピーク流量: 37.5m³/sec
供給土砂量: 1.161m³
流木量: 79.6m³ (329本)
流木諸元: 直径21cm 長さ7m

・治山ダム
タイプ: ひょうご式
設置位置: 10° 区間末端
治山ダム高: 5.0m
(透過部2.0m+不透過部3.0m)
スリット幅: 7.0m(6.8m)

5. 捕捉が
更に高まり
継続する要
因

④三次元水路 ii 満砂後の継続

動画は拡幅倍数1.5からW3.6から6.8に拡大したもの、満砂後の捕捉率の継続は、急勾配においても確認

CASE2-28 (土石流の重ね:2波目)

ひょうご式治山ダム正面 ひょうご式治山ダム側面



・供給条件
清水流量: 17.25m³/sec
土石流ピーク流量: 37.5m³/sec
供給土砂量: 766m³
流木量: 52.5m³ (217本)
流木諸元: 直径21cm 長さ7m

・治山ダム
タイプ: ひょうご式
設置位置: 15° 区間末端
治山ダム高: 5.0m
(透過部2.0m+不透過部3.0m)
スリット幅: 7.0m(6.8m)

④三次元水路 ii 満砂後の継続

不透過型は、満砂後、流木捕捉率は5~10%、土砂は20~30%であり、全く機能がなくなるわけではないが、ひょうご式に比べれば低調

5. 捕捉が更に高まり継続する要因

CASE2-34 (土石流の重ね:2波目)

不透過型治山ダム正面



不透過型治山ダム側面



・供給条件
 清水流量: 17.25m³/sec
 土石流ピーク流量: 37.5m³/sec
 供給土砂量: 766m³
 流木量: 52.5m³ (217本)
 流木諸元: 直径21cm 長さ7m

・治山ダム
 タイプ: 不透過型
 設置位置: 15° 区間末端
 治山ダム高: 5.0m

57

5. 捕捉が更に高まり継続する要因

ひょうご式治山ダム設計コンセプト達成状況

区分	ひょうご式治山ダムの設計コンセプト	目標管理項目	H29まで			H30~R2		
			目標	検討等	捕捉率実験(二次元)	目標	検討等	捕捉率実験(三次元)
①	土石流に伴う流木を捕捉する性能	ア) 土石流流体力Fを考慮	$\theta \leq 10^\circ$ F ≤ 37 kN/m	設計	OK	$10^\circ < \theta < 20^\circ$ F ≤ 318 kN/m	設計	OK
		イ) 流木捕捉率RHの高い	$\theta \leq 10^\circ$ 空隙率55%	実験	$\theta = 10^\circ$ RH=40%超	透過率10%超	実験	$10^\circ < \theta < 20^\circ$ RH>90%
②	山脚固定機能により満砂後の除石等を不要とする性能	ウ) 透過部からの土砂流出が少ない(捕捉率DH)	"	"	$\theta = 10^\circ$ DH=60%	"	"	$\theta = 12.5^\circ$ DH>80% $\theta = 15.8^\circ$ DH>60% $\theta = 20.0^\circ$ DH>37%
		エ) 満砂後も流木・土砂流出防止効果の継続	"	"	$\theta = 10^\circ$ RH=20% DH=60%超	"	"	$\theta = 12.5^\circ$ RH>90% DH>85% $\theta = 20.0^\circ$ RH>90% DH>70%
		オ) 縦配列が卓越するピーバーダム化(縦配列率VL)	"	"	"	"	"	$\theta = 12.5^\circ$ VL=40% $\theta = 15.8^\circ$ VL=50% $\theta = 20.0^\circ$ VL=55%
③	透過部の構造設計が標準化	カ) 透過部の高さH	$\theta \leq 10^\circ$ H=2m	設計 実験	OK	$\theta < 20^\circ$ H=2m	設計 実験	OK
		キ) 透過部の幅W	$\theta \leq 10^\circ$ レジーム幅	"	OK	$10^\circ < \theta < 20^\circ$ 拡幅	"	拡幅倍数1.0~2.4
		ク) 鋼管径φ、板厚t	φ 36cm t 16mm	設計	OK	φ 36cm t 16mm	設計	OK

58

目次

1. 兵庫県における流木・土石流対策(H16～R7)
(風倒木・流木・土石流災害)
2. 土石流基準について
3. 流木基準について
4. 流木捕捉効果の高い透過部と不透過部の関係
(透過部幅の決定方法)
5. 捕捉が更に高まり継続する要因
(ビーバーダム化の働き)
6. 今後の流木・土石流対策の課題

59

(1) ひょうご式治山ダムの普及と設計演習

5. 今後の流木・土石流対策の課題


丹波市豪雨災害の爪痕とN01、N02 治山ダムの流域



60

5. 今後の流木・土石流対策の課題

(1) ひょうご式治山ダムの普及と設計演習



下流側N01治山ダムの立木・土砂堆積状況と緊急取り除き状況

61

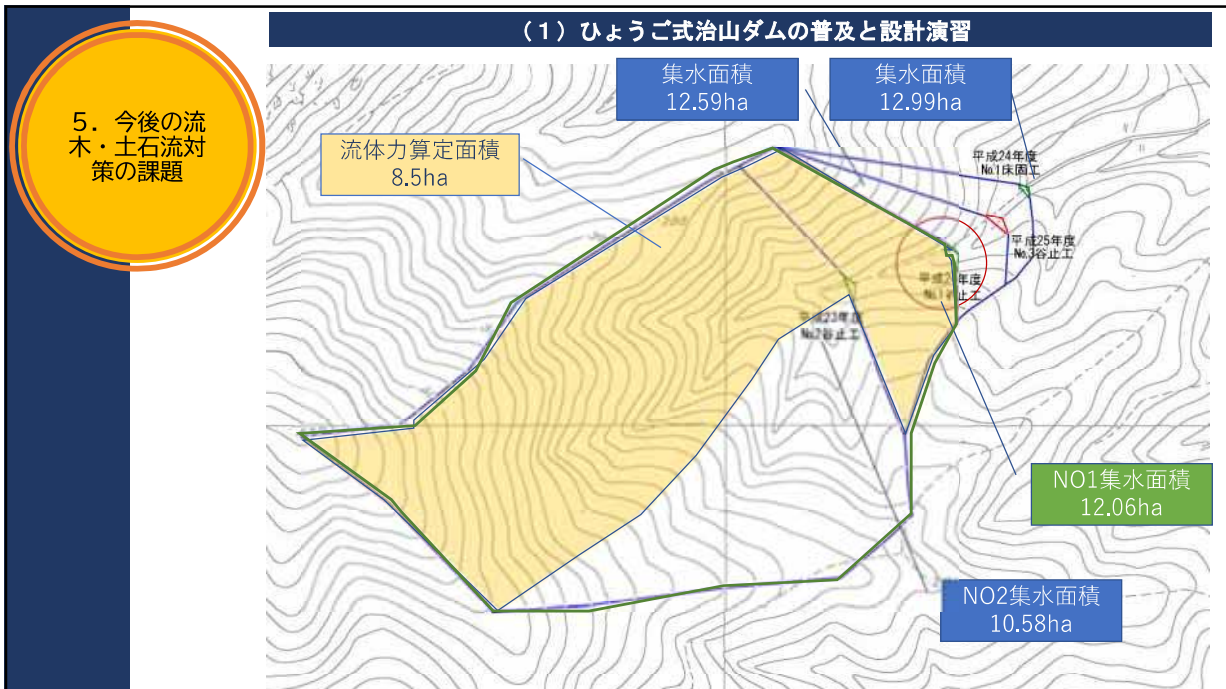
5. 今後の流木・土石流対策の課題

(1) ひょうご式治山ダムの普及と設計演習

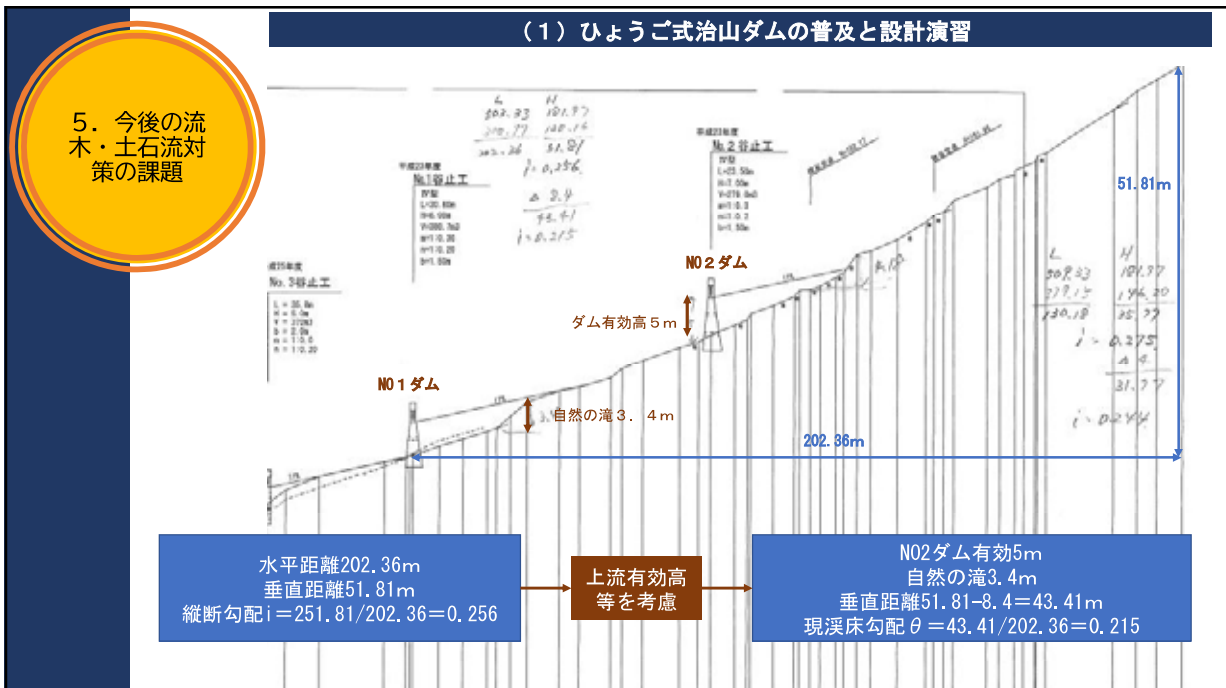


上流側N02治山ダムの流木・土砂堆積状況と緊急取り除き状況

62



63



64

5. 今後の流木・土石流対策の課題

演習 (1) ひょうご式治山ダムの普及と設計演習

丹波市市島町中竹田大谷 3

- NO1 谷止工をひょうご式治山ダムにする場合の検討

①基本条件
 A=12.06ha、 $\theta = 21.5\%$ 、 $R=215\text{mm}$ 、 $f = 0.75$ 、基礎地盤摩擦係数0.7、許容地耐力700 k N
 堤高 $h = 6.0\text{m}$ 、天端厚2.0m、埋戻高さ3.0m、埋戻幅7.0m、本堤上長22.0m、入射角度90.0度、放水路側辺のり勾配1.0、高ダム型、縮流せき流量係数0.6、計画勾配11%、下流のり0.2とする

②ひょうご式条件
 当該流域における標準幅は？5.2m
 不透過有効高2.5として、最適な透過幅は？8.4m
 放水路幅は、？8.4m以上
 越流部におけるHWL、HDL、袖高さ？
 HWL=0.5m、HDL = 0.6m、袖1.2m

透過幅の検討

流域状況におけるレジーム幅

集水面積 ha	降雨強度 mm/h	流出係数	レジーム幅 m
12.06	215.0	0.75	460

現況床勾配と有効高による拡幅係数

現況床勾配%	有効高	不透過高	拡幅係数 n
22	12.407	2.00	2.50

1. ひょうご式治山ダム透過部の標準幅 5.2 m
 2. 同上 透過幅=レジーム幅×n 8.4 m

ダム有効高	現況床勾配の度					備考
透過幅	$\theta \leq 10$	$10 < \theta \leq 12.5$	$12.5 < \theta \leq 15$	$15 < \theta < 20$		透過率TK
2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	11.09
2.0	3.0	1.0	1.5	1.5	1.5	7.43 16.71
2.0	4.0	1.0	2.0	2.0	2.4	5.33 16.43

■ ; 透過部
■ ; コンクリート削減部
■ ; コンクリート増量部

65

5. 今後の流木・土石流対策の課題

演習 (1) ひょうご式治山ダムの設計コンセプトの普及と演習

丹波市市島町中竹田大谷 3

越流部
 全高部天端厚2.5m、 $m = 0.40$

非越流部
 天端厚2.5m、 $m = 0.20$

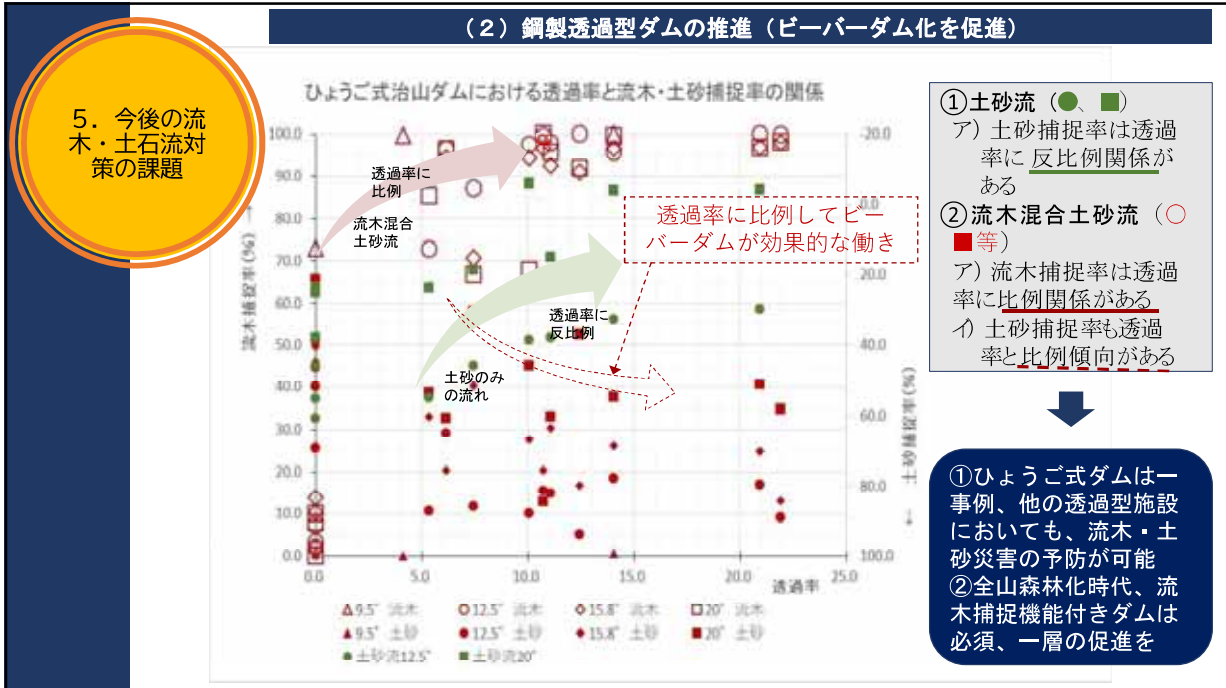
断面図 (IV型)

— ; 越流部
— ; 非越流部上流面
■ ; 透過部
■ ; コンクリート削減部
■ ; コンクリート増量部

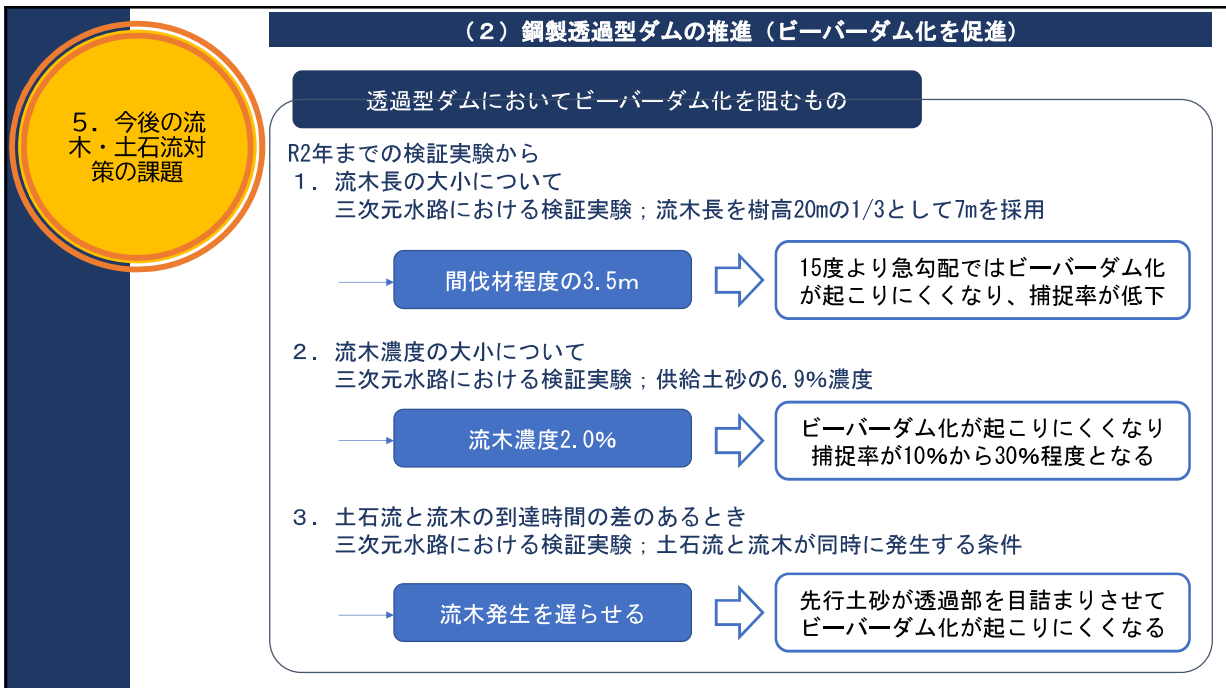
水抜閉塞防止 2.0mタイプ 1基
 水抜閉塞防止 3.0mタイプ 3基

■ ; 透過部
■ ; コンクリート削減部
■ ; コンクリート増量部

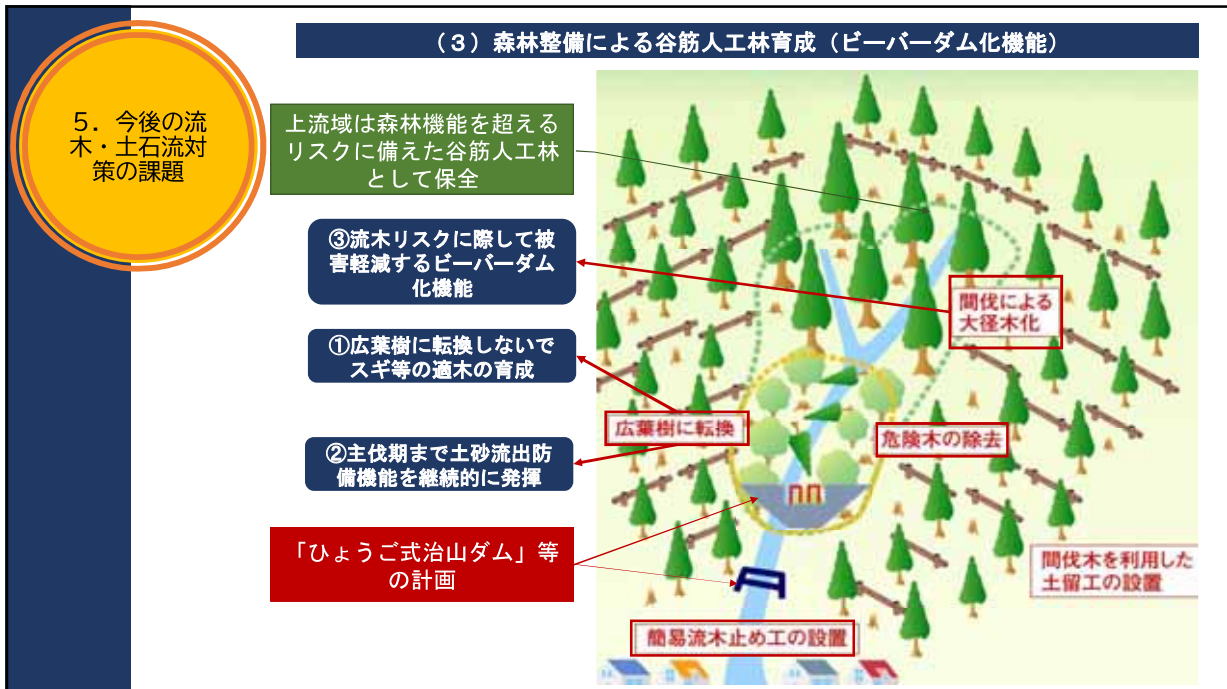
66



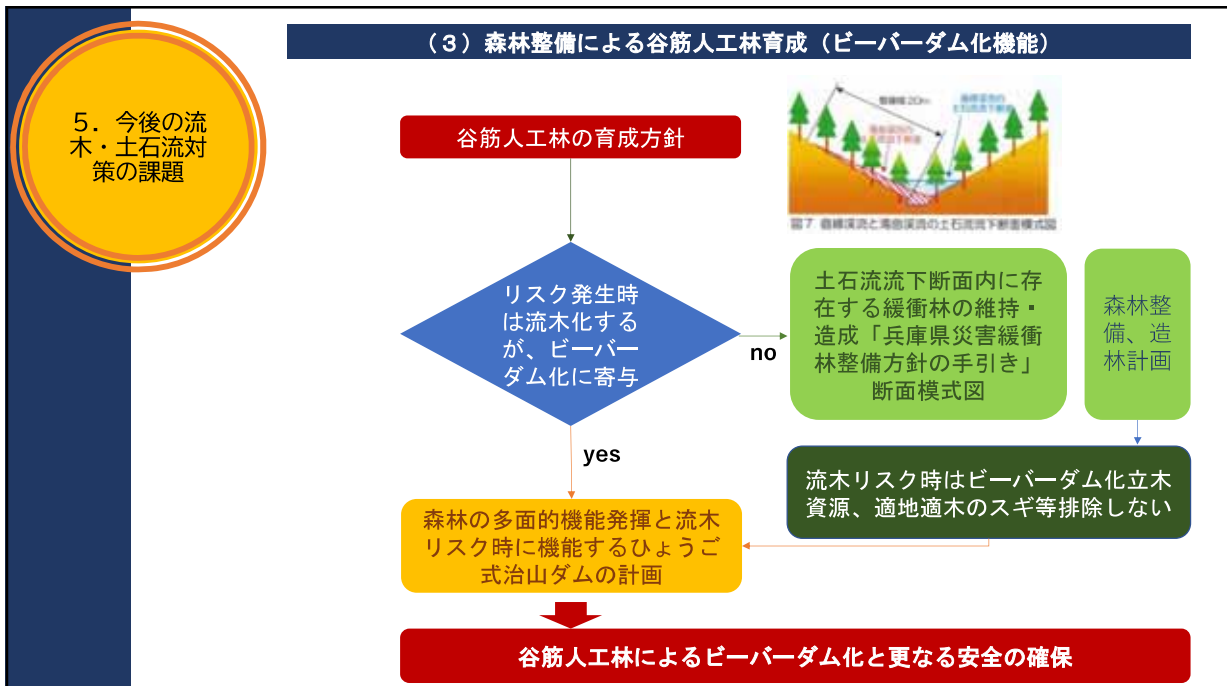
67



68



69



70

5. 今後の流木・土石流対策の課題

(3) 森林整備による谷筋人工林育成（ビーバーダム化機能）

実験条件：空容量の1.5倍の土砂・流木を供給

CASE3-2

ひょうご式治山ダム正面 | ひょうご式治山ダム側面

・試験条件

清水流量：17.25m³/sec
 土石流ピーク流量：37.5m³/sec
 供給土砂量：1765m³
 流木量：121.5m（502本）
 投入タイミング：6秒遅れ（留地33秒）
 流木諸元：直径21cm 長さ7m

・治山ダム

タイプ：ひょうご式
 設置位置：10° 既設末端
 治山ダム高：5.0m
 （透過部2.0m＋不透透部3.0m）
 スリット幅：5.2m
 谷筋の立木：0本

CASE3-6

ひょうご式治山ダム正面 | ひょうご式治山ダム側面

・試験条件

清水流量：17.25m³/sec
 土石流ピーク流量：37.5m³/sec
 供給土砂量：1765m³
 流木量：121.5m（502本）
 投入タイミング：6秒遅れ（留地33秒）
 流木諸元：直径21cm 長さ7m

・治山ダム

タイプ：ひょうご式
 設置位置：10° 既設末端
 治山ダム高：5.0m
 （透過部2.0m＋不透透部3.0m）
 スリット幅：5.2m
 谷筋の立木：12.5°～20° 既設

ビーバーダム化しない場合、捕捉機能が働かない

↓

谷筋の立木が土石流に巻き込まれてビーバーダム化、後続の流木を捕捉

①ビーバーダム化がないと機能が低減（土石流が先にダムに衝突等）

②上流谷筋人工林を土石流出防備林、及びビーバーダム化機能を有する森林に育成・保全

③「流木を立木で制する」ひょうご式治山ダムと谷筋人工林

71



ひょうご式治山ダム第1号
兵庫県豊岡市

ご静聴ありがとうございました

72

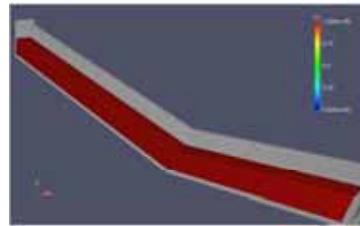
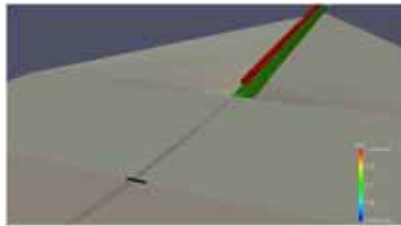
74



新たな数値シミュレーション手法を用いた流木被害軽減手法の検討

(国研)森林研究・整備機構 森林総合研究所
鈴木 拓郎

本発表の内容



池山施設(透過型池山ダム)の流木捕獲状況(佐田地区)

林野庁資料

池山施設(不透透型の池山ダム)の流木捕獲状況(藤城地区)

粒子法を用いた流木被害軽減対策手法の検討の取り組みの紹介



背景

- 平成29年7月九州北部豪雨など、近年極端豪雨により、斜面崩壊等により発生した大量の流木が土石流とともに流下し、甚大な被害が発生している。
- 極端豪雨の発生は増加している。
- 流木災害にどう対応すべきなのか。



山腹崩壊の状況(福岡県朝倉市)



流木の堆積状況

林野庁資料

3

流木災害等に対する治山対策検討チームの中間とりまとめ内容

具体的な対策

➤ 森林の山地災害防止機能の向上を図ることを基本とした上で、大規模な山腹崩壊が発生する場合は想定し、下流域での流木による被害を防止・軽減するため、森林域での適切な対策を実施。

➤ 具体的には、流木災害の発生メカニズム等を踏まえつつ、0.1流域等を「発生区域」、その下流域を「流下区域」及び「堆積区域」に区分し、対策工種や流木の挙動に応じた対策を実施。

- 保安林の適正な配備
- 傾斜等による根系等の発達促進
- 土留工等による表層侵食の防止等

発生しうる可能性の高い立木

- 流木化する可能性の高い立木の性状による下流域の被害拡大の抑制
- 流木捕獲装置(山ガムの設置等)による効果的な流木の捕獲等

流木捕獲装置(山ガム)

- 森林を緑豊林として機能させることによる増勢の促進や流木の捕捉
- 治山ガムの設置等による浸透の安定や流木の流出拡大防止等

緑豊林として機能した森林

どのような箇所にどのような施設を設置すべきか？

4

流木をどのように評価すべきか？



林野庁資料

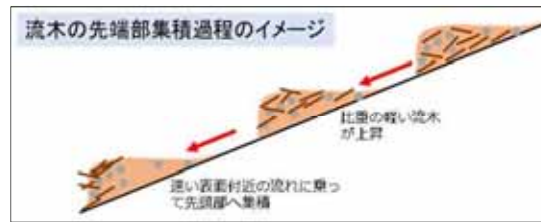
堆積域では枝が落ち、表皮が剥げる



摩擦力の低下？



源頭部では表皮、枝が残る

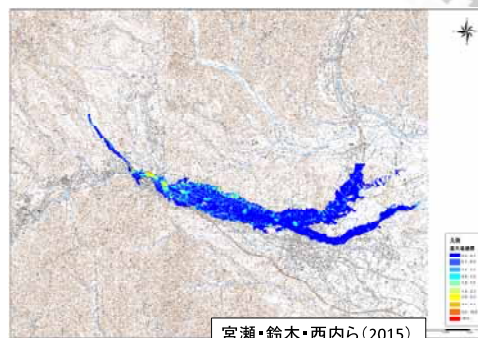
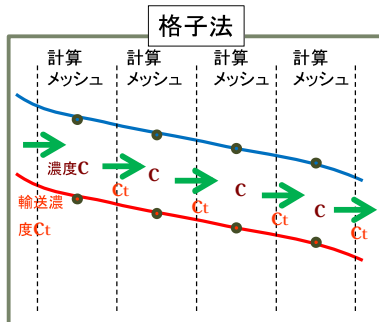


流木の摩擦力, 集積過程を評価することが必要では？



5

従来の格子法



宮瀬・鈴木・西内ら(2015)

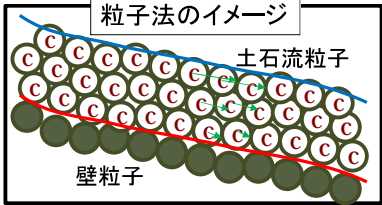
- 計算領域を格子に分割して計算する方法
- 氾濫範囲の推定などに有効(粒子法よりも計算負荷が小さい)
- 流木は平均量(流木濃度など)で取り扱う必要がある
- 個々の流木の挙動を評価することは不可

6

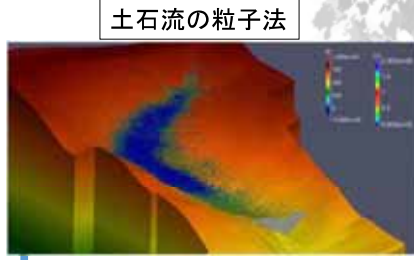
粒子法モデル

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\tau}{\rho} + g$$

圧力
応力
重力



- 流体と地形境界を粒子の集合体として扱う手法
- 粒子法の1つであるMPS法に土石流理論式を導入した手法を開発した(鈴木ら, 2015)



導入
 本研究の解析モデルを開発

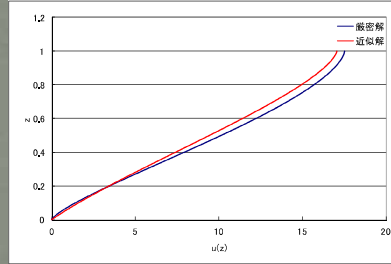
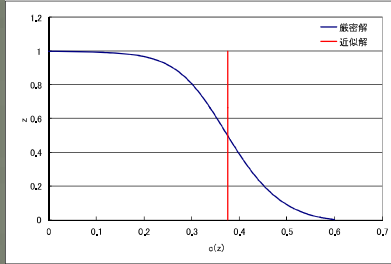
粒子法による土石流モデルを開発してきた経緯

研究の背景と目的

- ・土石流の数値シミュレーションは浅水流方程式を用いた方法が一般的→垂直方向の流速分布・濃度分布を平均化

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial (uM)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho_m}$$

h:流動深, Mフラックス, u:断面平均流速, β :運動量補正係数, g:重力加速度, H:流れの表面の標高($H=z_b+h$, z_b :河床位), τ_0 :河床面せん断応力, ρ_m は土石流の密度

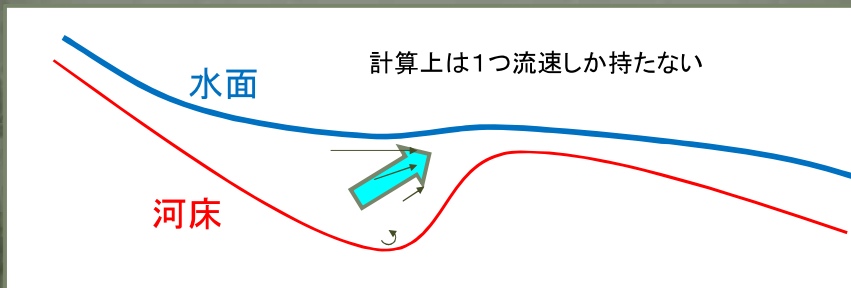


- ・垂直方向には分割していないため、断面平均流速で評価
- ・せん断応力を断面平均流速の関係式として評価するためには濃度分布を平均化する必要がある

9

研究の背景と目的

- ・流れの上層と下層で流下方向が異なる場合には十分な精度が得られない可能性がある



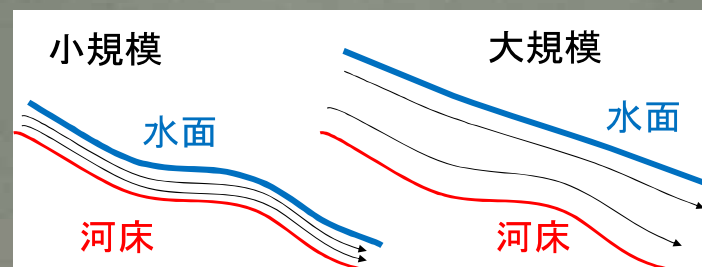
(例) 逆勾配の流れ、流路からの溢水など？

- 人工構造物周辺などメッシュでは表現しきれないような地形条件が急激に変化する箇所では影響が大きい。
- そこで、垂直分布を計算可能な方法を検討

10

研究の背景と目的

- ・大規模な土石流ほど、河床の地形と上層の流れの方向が異なる可能性がある。



3次元的に解析により、高精度での評価が可能

11

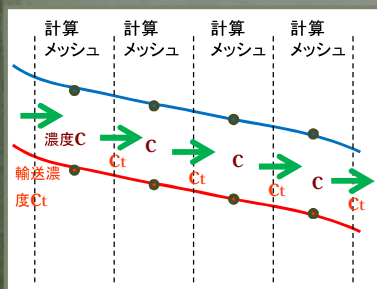
研究の背景と目的

- ・粒子法は垂直方向の分布を容易に扱うことができる。
 - ・土石流の構成則は一流体モデル(土砂を濃度として取り扱い、1つの流体として解く)が一般的。土石流の構成則が**流速分布、濃度分布を概ね再現可能**であることが既往研究で示されている。
- 構成則に基づく流れを粒子法の枠組みで解析する手法を構築(鈴木・堀田, 2015)

12

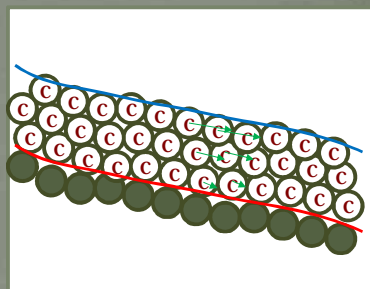
モデルの概要: 粒子法のイメージ

浅水流方程式



- ・空間をメッシュで分割
- ・メッシュごとに水深、流速、土砂濃度などの情報を持つ

粒子法



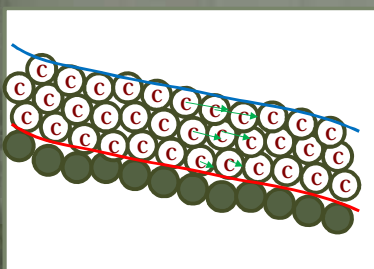
- ・流体を粒子で分割
- ・粒子ごとに流速、土砂濃度の情報を持つ
- ・地形条件は移動しない粒子として表現

13

モデルの概要: 構成則の導入

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\tau}{\rho} + g$$

圧力 応力 重力



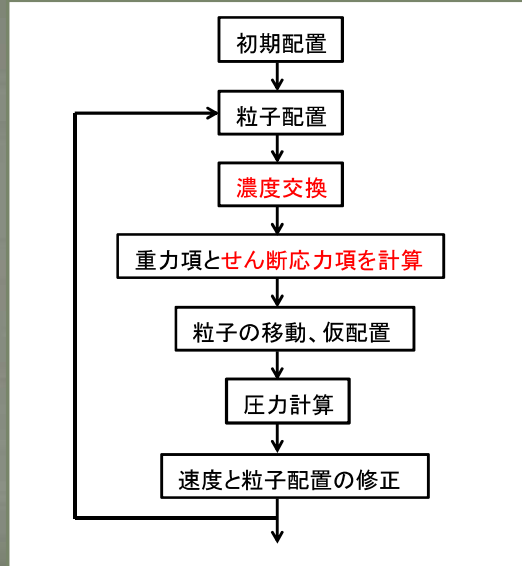
- ・粒子法は1つ1つの粒子の運動方程式を解く方法(ラグランジュ法の1つ)

- ・応力項を構成則から導く
- ・構成則に基づく濃度分布を満たすようにモデル化する(粒子間で濃度を移動させる)

- 土石流の構成則には以下の理由から江頭らの構成則を用いた。
- せん断応力の中に降伏応力が入っている。(濃度変化に伴う侵食・堆積(粒子の移動・停止)を扱いたいため)
 - 河床の濃度が c_* に接続しない、平衡濃度に達していない条件でも適用可能な濃度分布式である。

14

計算過程



15

抵抗則の導入

江頭らの構成則による、河床からの高さ z におけるせん断応力 $\tau(z)$ は下記のように示される。

$$\tau(z) = \tau_y + \rho_w f(c) \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\tau_y = \left(\frac{c}{c_s} \right)^{\frac{1}{5}} \rho_w (\sigma / \rho_w - 1) g \cos \theta \tan \phi_s \int_z^h c dz$$

ここで、 τ_y は摩擦応力、 ρ_w は水の密度、 σ は砂礫密度、 ϕ_s は粒子の摩擦角、 h は水深である。 θ は河床勾配であるが、粒子法モデルにおいては、粒子の移動方向と水平ベクトルがなす角とした。 $f(c)$ は抵抗係数であり、次式で示される。

$$f(c) = (K_d + K_f) d^2$$

ここに d は粒径であり、 K_d 、 K_f は次式で示される。

$$K_d = k_g (1 - e^2) \left(\frac{\sigma}{\rho_w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad K_f = k_f \frac{(1 - c)^{\frac{5}{3}}}{c^{\frac{2}{3}}}$$

ここに、 e は反発係数、 k_g は定数で $k_g = 0.0828$ 、 k_f は粒子間隙スケールを示すパラメータである。

16

抵抗則の導入

MPS法にこのせん断応力を導入するには、変化率をとる必要がある。構成則によるせん断応力項 τ_c は次式のようになる。(平衡状態の式を拡張するため、z方向のみの評価となる)

$$\tau_c = \tau_{cy} + \rho_w f'(c) \frac{\partial c}{\partial z} \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) + 2\rho_w f(c) \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\tau_{cy} = \left[\frac{1}{5} \left(\frac{c}{c_*} \right)^{-\frac{4}{5}} \frac{\partial c}{\partial z} (h-z) \int_z^h c(z) dz - \left(\frac{c}{c_*} \right)^{\frac{1}{5}} c \right] \rho_w (\sigma/\rho_w - 1) g \cos\theta \tan\phi_s$$

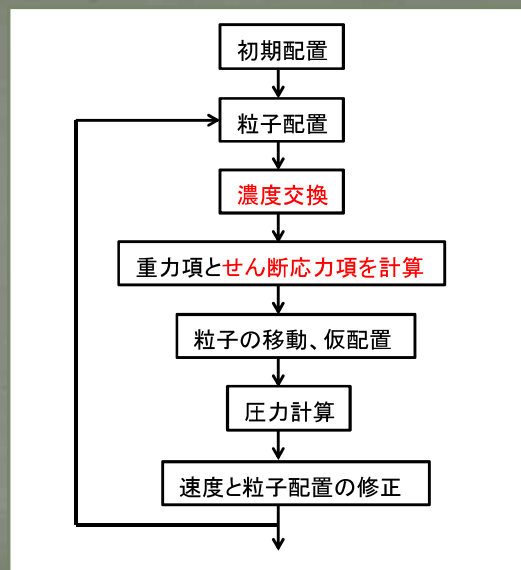
$$\bar{c}(z) = \int_z^h c dz$$

$\bar{c}(z)$ は着目粒子よりも上にある粒子の平均濃度である。式中の微分、2階微分部分はMPS法の勾配モデル、ラプラシアンモデルを用いて算出する。 τ_c をMPS法の粘性項の代わりに導入すれば、運動方程式は下記のようになる。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\tau_c}{\rho} + g$$

17

計算過程



18

濃度分布式の導入

江頭らの構成則による、濃度分布式は下記のように示される。

$$(h-z) \frac{\partial F}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial z} = F - c \rightarrow \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right)_e = \frac{F - c}{h - z} \frac{1}{\frac{\partial F}{\partial c}}$$

$$F = \frac{K_{pd} \tan \theta}{\left(\frac{\sigma}{\rho_w} - 1 \right) \left[(K_r + K_d - K_{pd} \tan \theta) - \left(\frac{c}{c_s} \right)^{\frac{1}{2}} (K_r + K_d - K_{pd} \tan \theta_s) \right]}$$

$$K_{pd} = k_g e^2 \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad K_d = k_g (1 - e^2) \left(\frac{\sigma}{\rho_w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad K_r = k_r \frac{(1 - c)^{\frac{5}{2}}}{c^3}$$

上記の濃度分布は濃度勾配として与えられ、河床濃度から積分していくことで、平衡濃度分布が算出される。

本研究の手法では、この濃度勾配(平衡濃度勾配)に遷移していくよう周辺粒子と濃度を交換する。

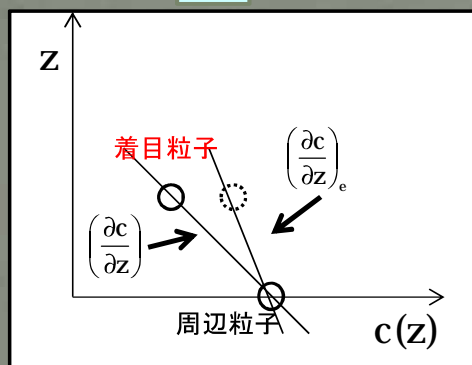
θ は粒子毎の値 \rightarrow 粒子個別の流下勾配を評価している。

19

濃度分布式の導入

$\left(\frac{\partial c}{\partial z} \right)$ 構成則による平衡濃度勾配

$\left(\frac{\partial c}{\partial z} \right)_e$ 現在の濃度勾配:
MPS法の枠組みで算出



$\left(\frac{\partial c}{\partial z} \right)_e - \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right) > 0$ の時は、平衡濃度分布になるには、着目粒子は濃度を大きくしたい

20

濃度分布式の導入

$$ccp(i) = l_0 \left[\left(\frac{\partial c}{\partial z} \right)_e - \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right) \right]$$

$ccp(i)$: i の粒子が変化したい濃度の方向(正負)と大きさ(絶対値)を示すパラメータ

周辺粒子との $ccp(i)$ の差に応じて濃度を交換する。

$ccp(i) - ccp(j) > 0$ の時は、 j から i の粒子に濃度が移動する。

i の粒子の濃度変化(時間微分)は下記のように算出する。

$$\left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)_i = \frac{1}{T} \frac{1}{n_0} \sum_{i \neq j} w(r) \frac{(ccp(i) - ccp(j))}{2} \quad w(r) = \begin{cases} r_e - 1 & (r \leq r_e) \\ r & (r > r_e) \end{cases}$$

n_0 は基本となる粒子密度、 r_e は粒子の影響半径、 $w(r)$ は影響半径内の重み付け関数

T は緩和時間(平衡への遷移に要する時間)

21

目的

➤ 粒子法モデルを侵食・堆積過程に適用して検証する。

本研究における定義

堆積粒子: 濃度が大きく、降伏応力(クーロン摩擦)が外力を常に上回り、位置がほぼ変化しない粒子(振動状態)

➡ 本研究では、事前検討により $0.9c^*$ 以上とした。

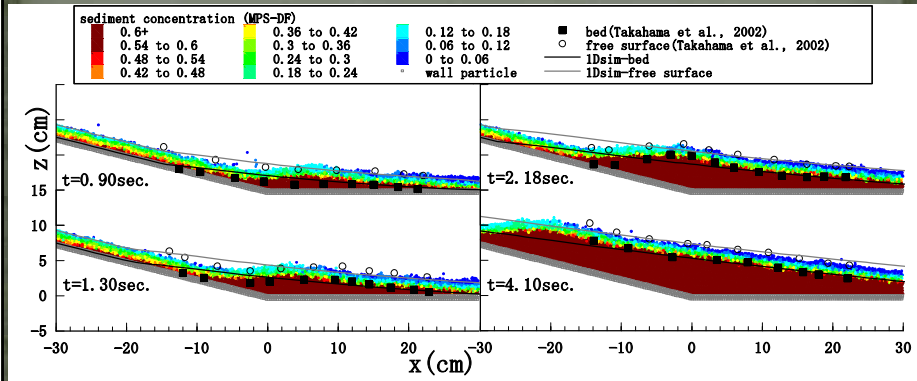
侵食過程: 堆積粒子から流動粒子に濃度が移動することにより、外力が降伏応力を上回るようになり、移動可能な状態になる

堆積過程: 流動粒子内で濃度が移動して、濃度が大きくなった粒子の降伏応力が外力を上回るようになり、移動できない状態になる

22

勾配変化点の堆積の初期過程→上に凸の堆積過程が再現可能

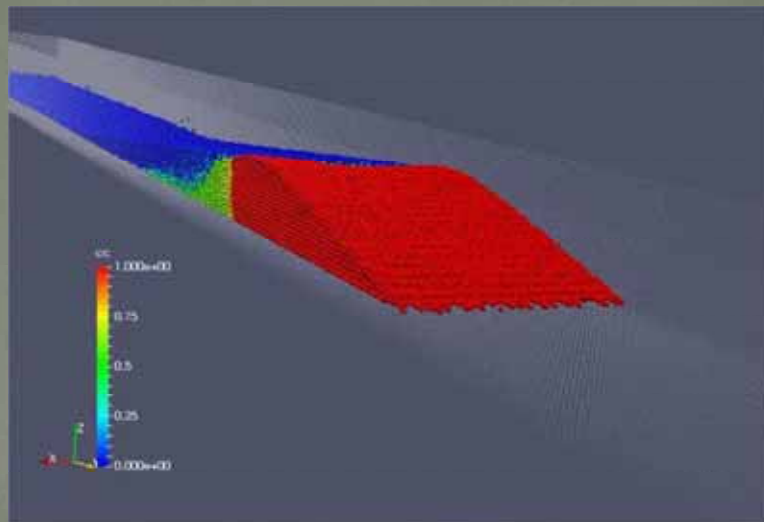
高濱ら, 水工学論文集, 第46巻, 2002



- ・緩和時間が流下時間と比較して非常に小さいと実験結果と一致
- ⇒土砂濃度の局所平衡が満たされていると考えられる条件
- ・初期過程は従来手法よりも実験結果を高精度で再現
- ・それ以降は従来手法と同様の結果となり、実験結果と一致

25

天然ダムの侵食過程

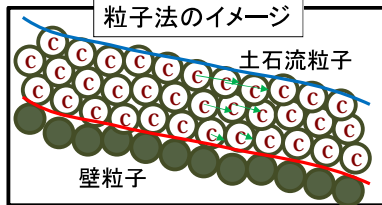


26

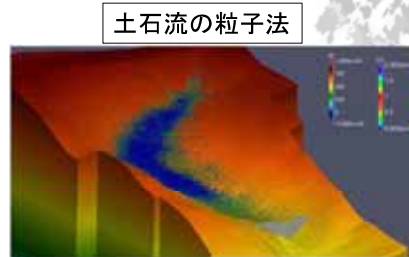
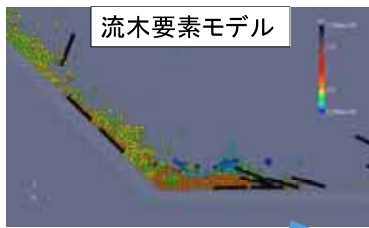
粒子法モデル

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\tau}{\rho} + g$$

圧力 応力 重力



- 流体と地形境界を粒子の集合体として扱う手法
- 粒子法の1つであるMPS法に土石流理論式を導入した手法を開発した(鈴木ら, 2015)



導入

本研究の解析モデルを開発

27

流木要素の計算方法と摩擦項の評価

- 流木は粒子の集合要素として表現
 - ① 土石流粒子として計算する
 - ② 粒子の相対位置がずれる
 - ③ 重心の座標変化量と角運動量が保たれるように、粒子の相対位置を修正する(Koshizuka et al., 1998)。
- 固体間の接触摩擦を直接的に評価。
 - 一般的に個別要素法が用いられるが、計算負荷が大
 - 簡易摩擦項を導入: 固体粒子同士がある距離より近い場合(接触判定)に、摩擦力を粒子の相対速度と逆方向に作用。摩擦力=接触応力×摩擦係数

- 流木粒子は形状を保ちつづけるように計算
- 接触粒子間で摩擦力が作用

28

施設による捕捉過程の再現性 (渋谷ら(2009)の実験)

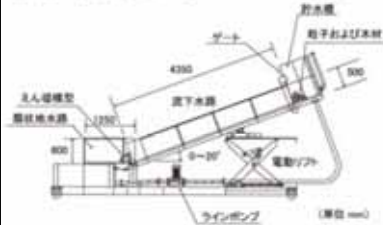


図-1 土石流実験装置の概要
Fig. 1 Side view of debris flow test device

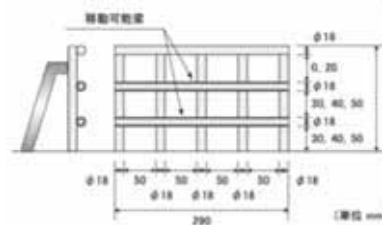


図-3 透過型砂防えん堤模型の概要
Fig. 3 Open type steel frame check dam structure model

- 勾配15度の条件で、土石流中の流木の割合(0~20%)や、透過型堰堤の横梁の間隔を変化させて、流木捕捉率を検討

29

実験例

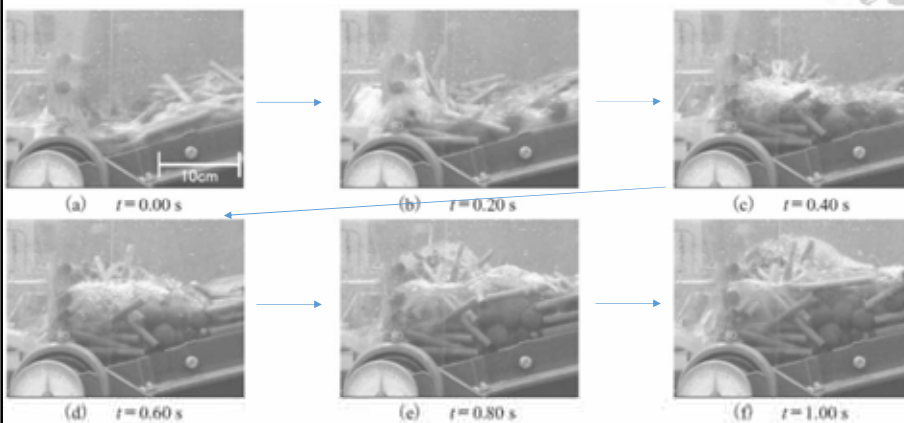
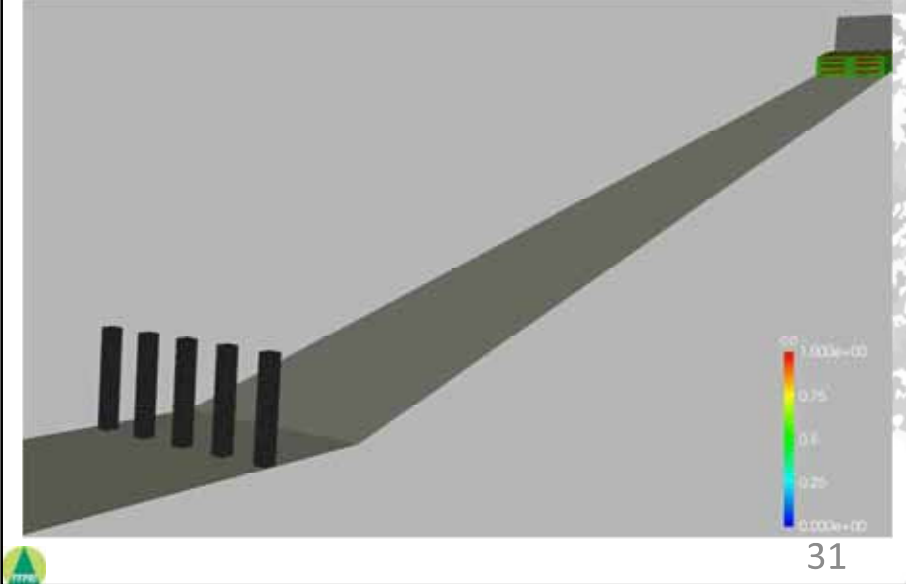


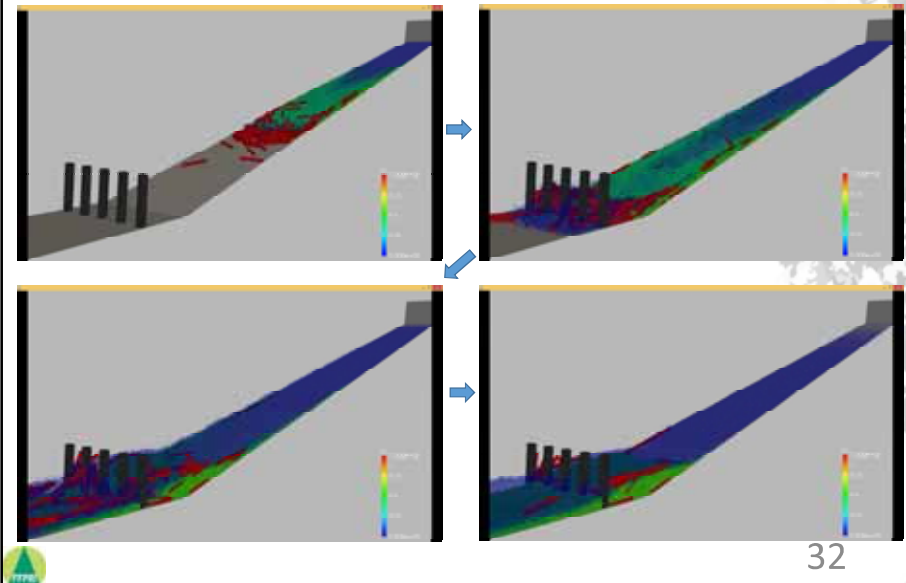
写真-3 捕捉状況 ($K_c = 20\%$, $l_c/d_m = 1.5$)
Photo 3 Capture process of debris ($K_c = 20\%$, $l_c/d_m = 1.5$)

30

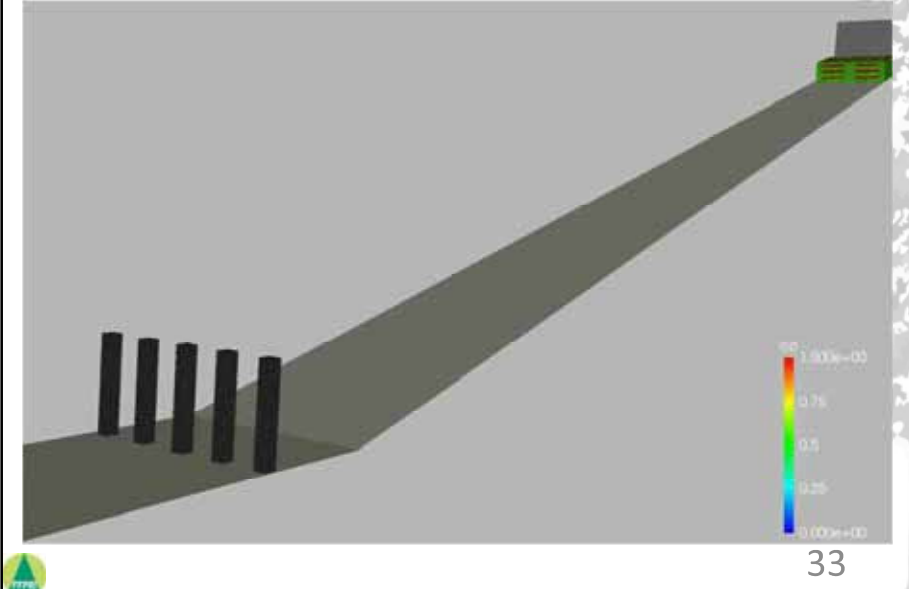
摩擦項の影響→摩擦力がないと



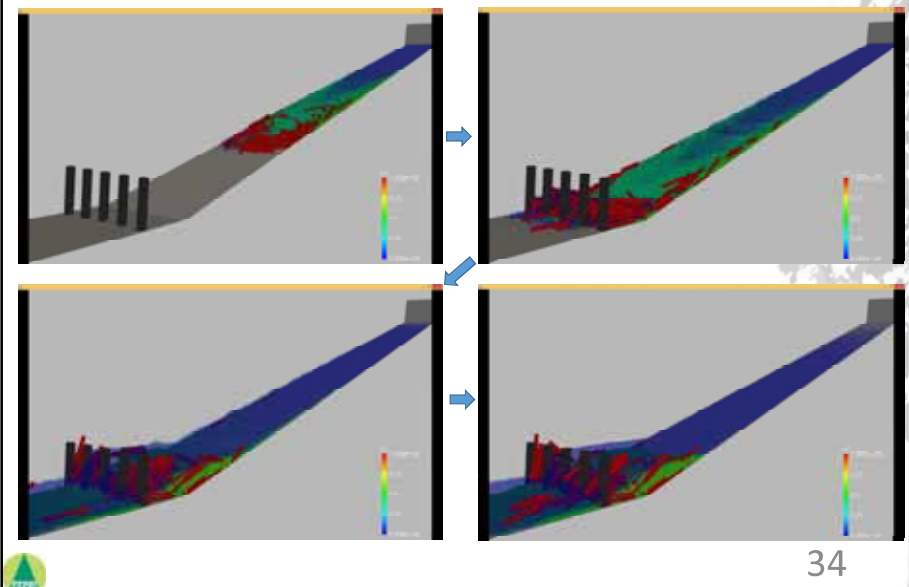
摩擦項の影響→摩擦力がないと



摩擦項の影響→摩擦力があると

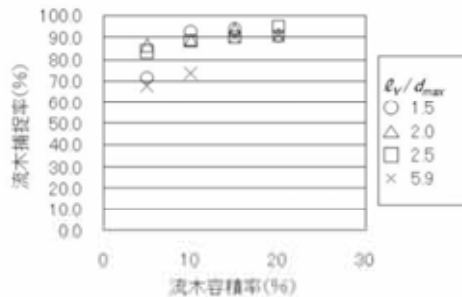


摩擦項の影響→摩擦力があると



流木捕捉率の関係

実験結果 (渋谷ら, 2009)



計算結果

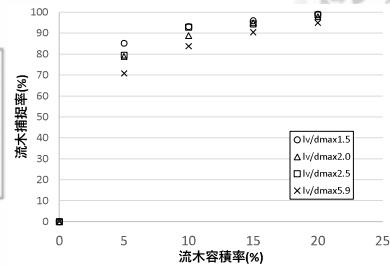


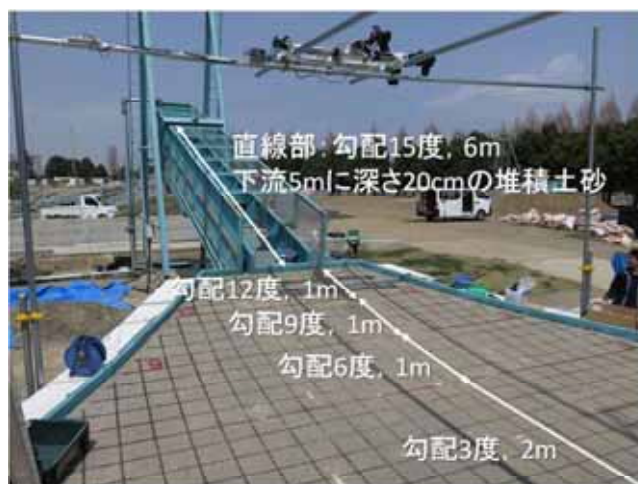
図-7 流木捕捉率-流木容積率関係

Fig.7 Relationship between drift woods capture ratio and drift woods containment ratio

流木の割合が大きいほど捕捉率が上昇(実験結果)という関係を概ね再現

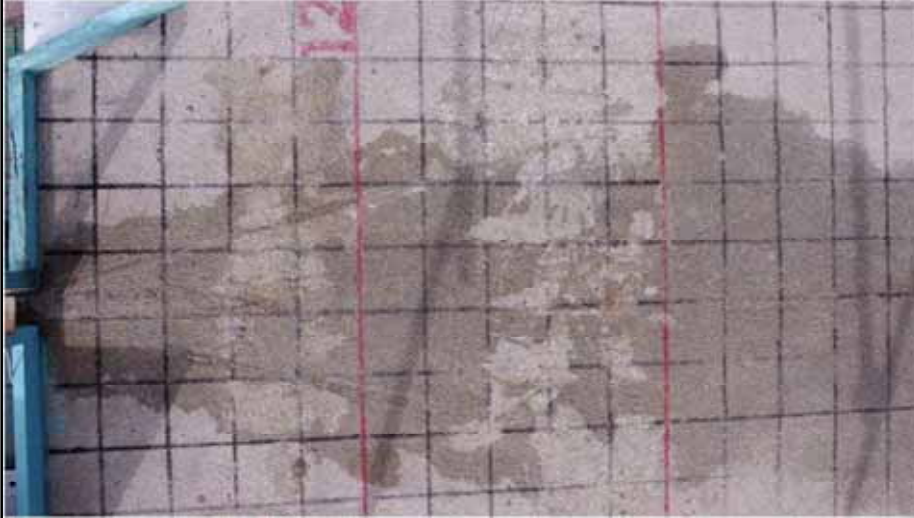
35

摩擦力の違いによる流木の挙動の変化: 劔持ら(筑波大学(当時))の実験



円柱の木材, 実際の枝の2種類を用いた 36

円柱状の木材



37

枝



38

摩擦力の違いの影響

- 円柱材料は一旦停止・堆積しても後続流によって再流出しやすい
- 枝は堆積しやすく、再流出しにくい



39

摩擦力小



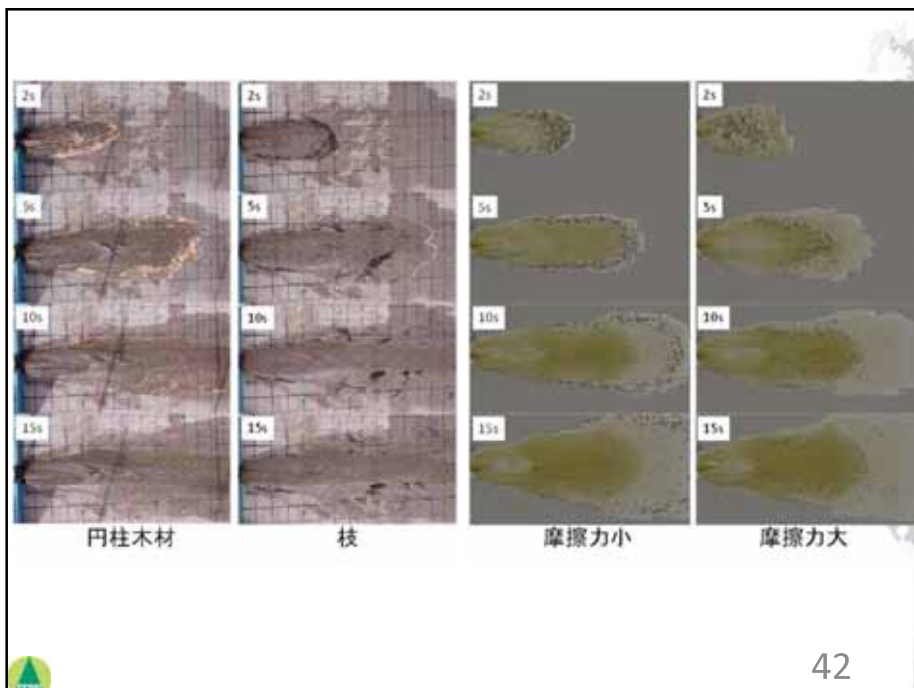
40

摩擦力大



➤ 摩擦係数を変化させることで、材料による
違いの傾向を概ね再現可能

41



円柱木材

枝

摩擦力小

摩擦力大

42

農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究
森林・林業、水産業分野における気候変動適応技術の開発

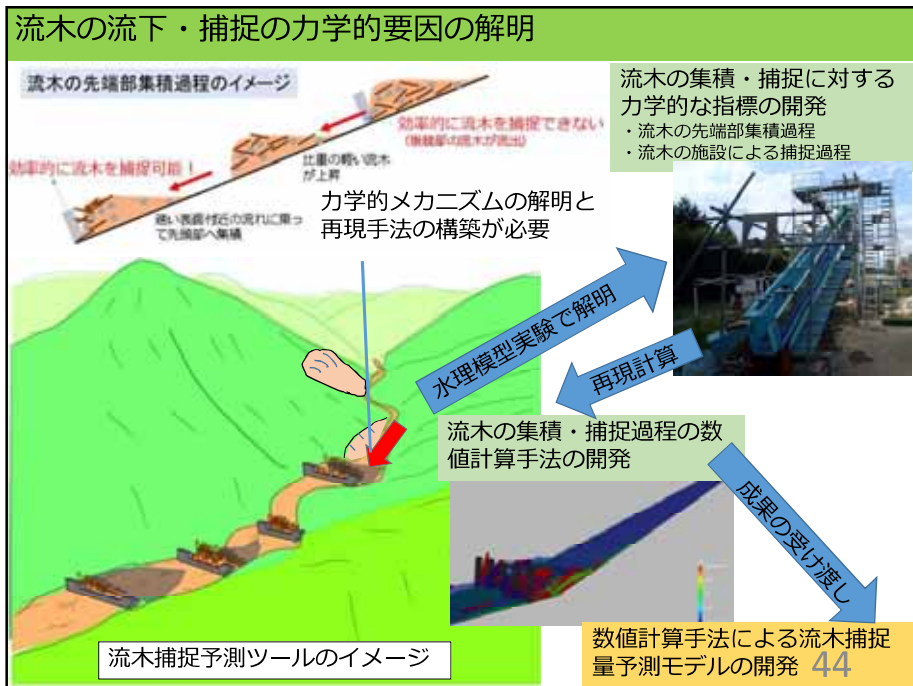


流木災害防止・被害軽減技術の開発

実施期間：令和元年度～令和5年度

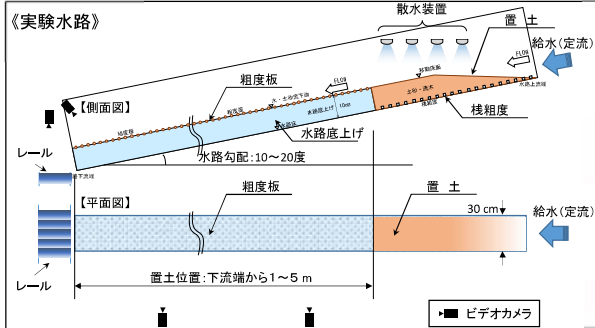
検討内容の紹介

43

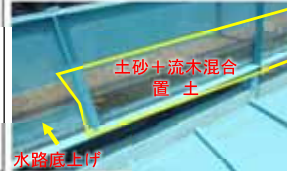


流木の集積・捕捉に対する力学的な指標の開発

実験方法



実験水路 : 全長 10 m、幅 30 cm
 水路勾配 : 10、15、20度
 置土 : 下流端から 1 m、3 m、5 m
 水路床 : 粗度板を貼付
 給水条件 : 定流
 カメラ : 側面2台、下流端2台
 捕捉箱 : 8台



◇各捕捉箱での計測項目

計測項目	単位	計測方法
採取開始時間	秒	ビデオ解析
採取終了時間	秒	ビデオ解析
流木	本	採取流木をカウント
混合量(水・土砂)	cc	メスシリンダーによる計測
土砂量	cc	メスシリンダーによる計測

これらの計測項目より、各捕捉箱における流出流量、流出流木容積濃度を算出した

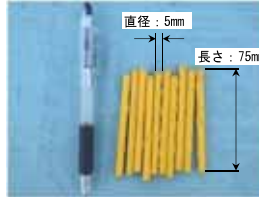
流木の集積・捕捉に対する力学的な指標の開発

実験の条件と用いた材料

区分	項目	諸元
水路条件	水路長	10 m
	水路幅	30 cm
	水路高	50 cm
流量条件	流量(定流)	4.5 L/s
実験砂	粒径(均一)	3 mm
	空隙率	38 %
流木模型	直径	5 mm
	長さ	75 mm

■流木模型

【丸棒】



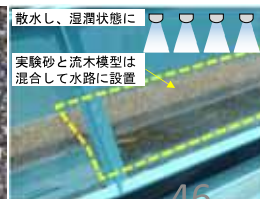
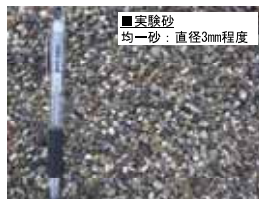
【自然木】



■流木模型湿潤状態比重

丸棒	0.82 g/cm ³
自然木	0.92 g/cm ³

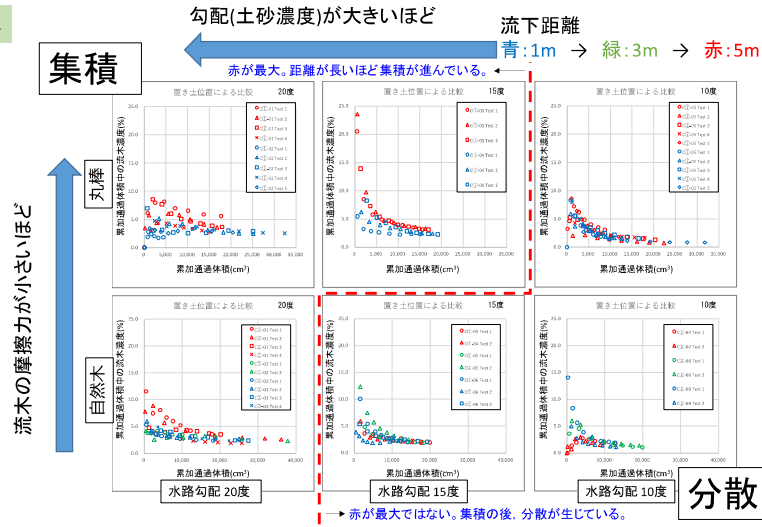
自然木はダケカンバ枝材(φ5~10mm)を長さ75mmに切り揃えて作成した



- 水路勾配 : 10~20度で設定
- 水路床には粗度板を貼付
- 流木模型と実験砂は攪拌・混合
- 散水装置により湿潤状態に

流木の集積・捕捉に対する力学的な指標の開発

実験結果



- 急勾配領域の方が先端部への集積が進行しやすい(集積状態を保つことができる)
- ただし、流木が底面等の境界条件から受ける摩擦力による影響を強く受ける

47

流木の集積・捕捉過程の数値計算手法の開発

流木の先端部集積過程のイメージ

下流では枝が落ち、表皮が剥げる

上流では表皮、枝が残る

摩擦力の違いを考慮可能なモデルを構築

固体同士の接触

速度1

速度2

摩擦力

相対速度と逆方向に摩擦力を発生させる

簡易摩擦項の導入

2s

5s

10s

15s

2s

5s

10s

15s

摩擦力小

摩擦力大

- 扇状地の氾濫過程(既往研究)を対象に試計算 → 摩擦力の違いを考慮可能であることを確認

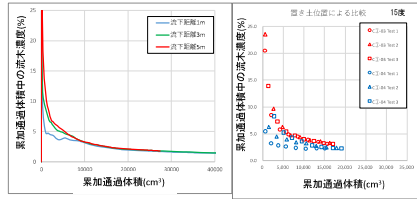
48

流木の集積・捕捉過程の数値計算手法の開発

水路勾配 15度, 摩擦小



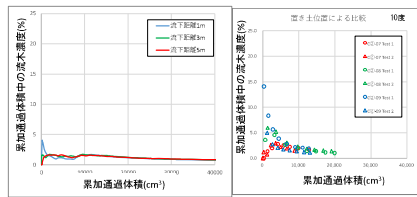
流下とともに(青→緑→赤), 集積が進行



水路勾配 10度, 摩擦大



流下距離5m(赤)で先端部集積が分散



49

2-1 流木の集積・捕捉に対する力学的な指標の開発

計算結果

集積

勾配(土砂濃度)が大きいほど

流下距離

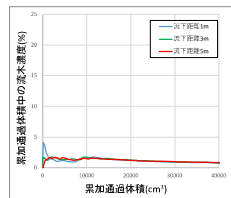
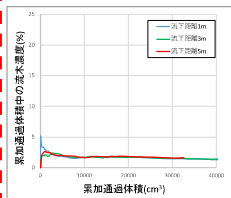
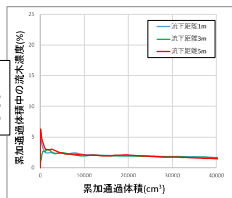
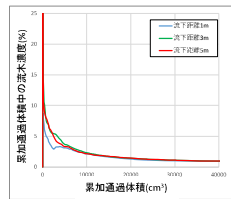
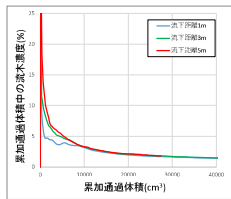
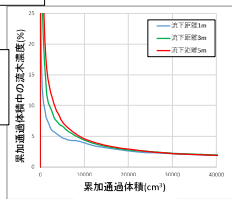
赤が最大。距離が長いほど集積が進んでいる。

青:1m → 緑:3m → 赤:5m

流木の摩擦力が小さいほど

摩擦小

摩擦大



水路勾配 20度

水路勾配 15度

水路勾配 10度

実験結果と同様の傾向を再現

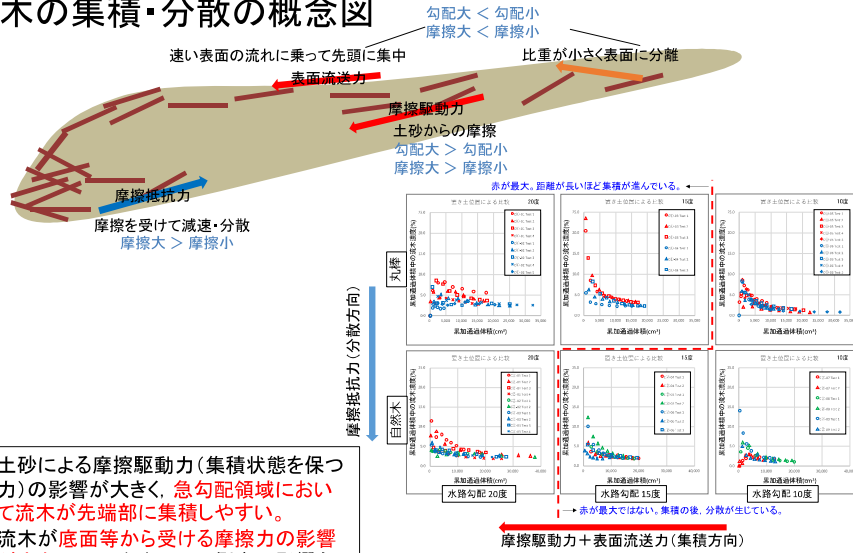
→ 赤が最大ではない。集積の後、分散が生じている。

分散

50

小課題2 流木の流下・捕捉の力学的要因の解明

流木の集積・分散の概念図



- 土砂による摩擦駆動力(集積状態を保つ力)の影響が大きく、急勾配領域において流木が先端部に集積しやすい。
- 流木が底面等から受ける摩擦力の影響が大きい→現地地形では側岸の影響もあるため重要。

51

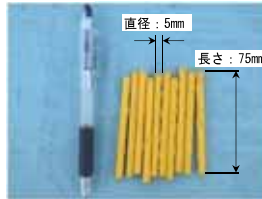
集積の逆、分散過程はどうか？

実験の条件と用いた材料

区分	項目	諸元
水路条件	水路長	10 m
	水路幅	30 cm
	水路高	50 cm
流量条件	流量(定流)	4.5 L/s
実験砂	粒径(均一)	3 mm
	空隙率	38 %
流木模型	直径	5 mm
	長さ	75 mm

流木模型

【丸棒】



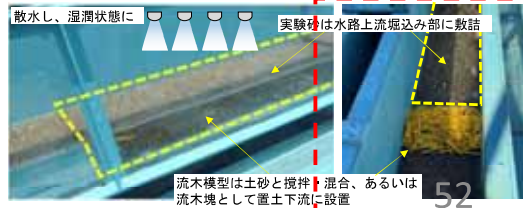
【自然木】



流木模型湿润状態比重

丸棒	0.82 g/cm ³
自然木	0.92 g/cm ³

自然木はダケカンバ枝材(φ5~10mm)を長さ75mmに切り揃えて作成した



- 水路勾配：10~20度で設定
- 水路床には粗度板を貼付
- 流木模型は土砂と攪拌・混合、または流木塊として置土下流に設置
- 散水装置により湿润状態に

52

2-1 流木の集積・捕捉に対する力学的な指標の開発

流木塊条件結果

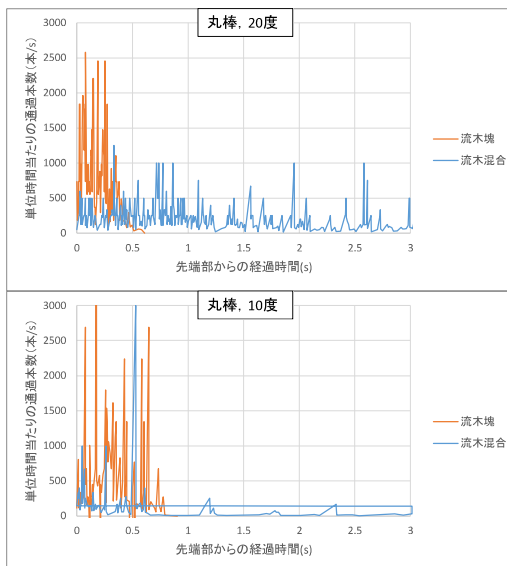


数値計算と同様に集積状態で流下するケースが多数

53

2-1 流木の集積・捕捉に対する力学的な指標の開発

流木塊条件結果

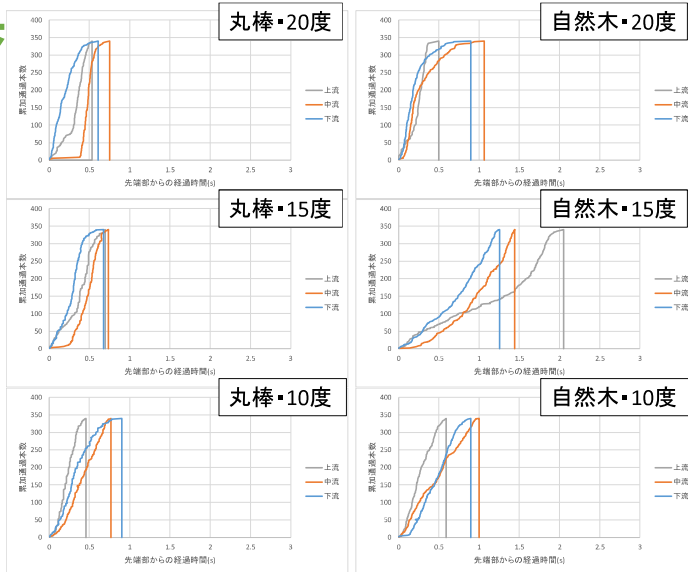


➤ 混合条件の最大状態（下流）よりも明らかに流木濃度が高濃度の状態で流木が流下する（少しずつ分散はするが）

54

実験結果

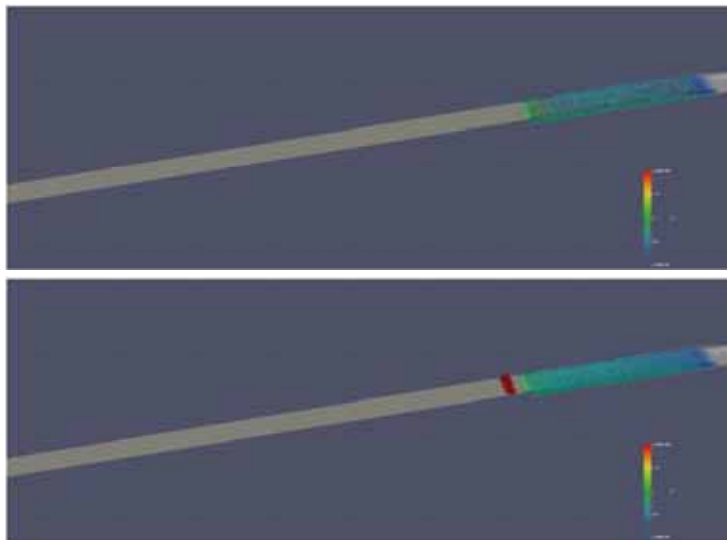
3回のうち、流木が最も短時間で流出した結果



➤ 自然木・15度を除き、どの条件でも流木塊全体が短時間で流下を開始している

55

2-2 流木の集積・捕捉過程の数値計算手法の開発



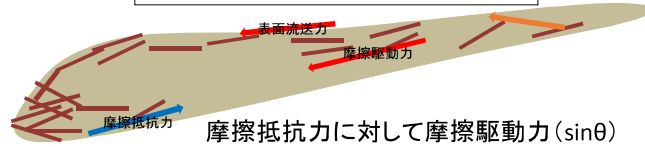
➤ 先端に集中した流木群は分散しにくい

56

小課題2 流木の流下・捕捉の力学的要因の解明

検討結果

流下に伴い徐々に集積していく場合



摩擦抵抗力に対して摩擦駆動力 ($\sin\theta$)
が大きいほど先端に集積しやすい

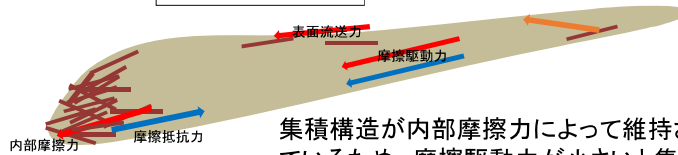
集積方向の力
(集積を維持)



分散方向の力



集積状態の場合



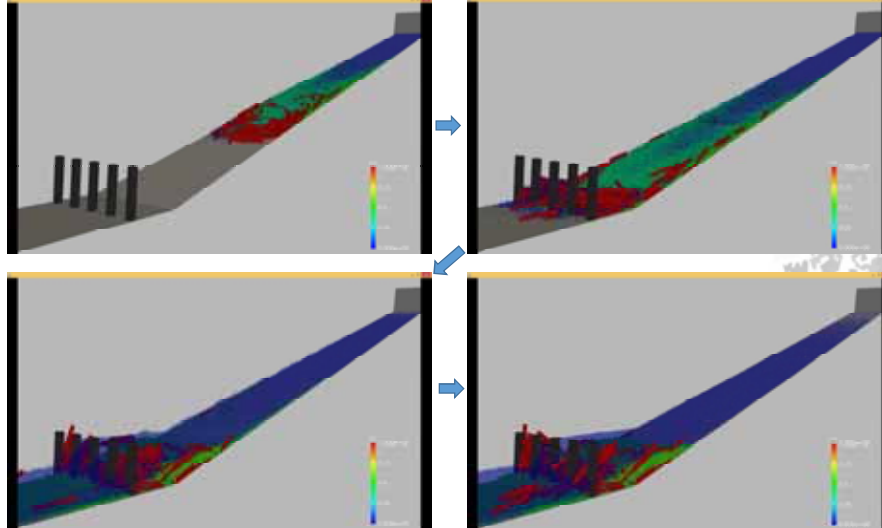
集積構造が内部摩擦力によって維持され
ているため、摩擦駆動力が小さいと集積
構造を破壊できない(維持される)
→集積状態で下流まで流下する可能性

57

効果的な流木捕捉のための予測ツールの開発

58

粒子法による施設の評価



個々の施設評価は可能だが、流域全体の施設配置計画を検討するには計算負荷が大きすぎる

59

目的

- 格子法に基づいて、流木の先端部集積過程や施設による捕捉過程を評価可能な計算手法を構築する
- 構築した手法を用いた数値計算により、再現性を検証する

60

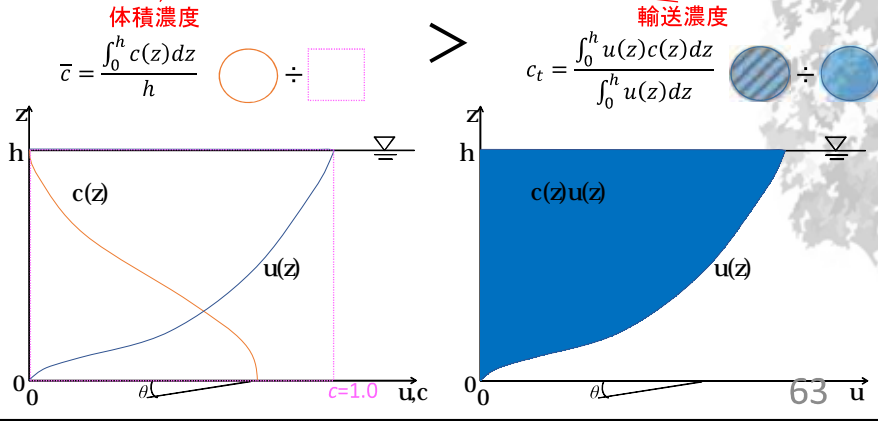
格子法の支配方程式

連続式 $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = E$

運動方程式 $\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta \frac{\partial(UQ)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho_m}$

砂礫の連続式 $\frac{\partial(\bar{c}h)}{\partial t} + \frac{\partial(Qc_t)}{\partial x} = E c_*$

h : 水深, Q : 単位幅流量, E : 侵食速度 (負は堆積速度), β : 運動量補正係数, U : 断面平均流速, g : 重力加速度, H : 水位, τ_0 : 河床せん断応力, ρ_m : 土石流の密度, \bar{c} : 体積土砂濃度, c_t : 土砂輸送濃度, c_* : 堆積土砂濃度



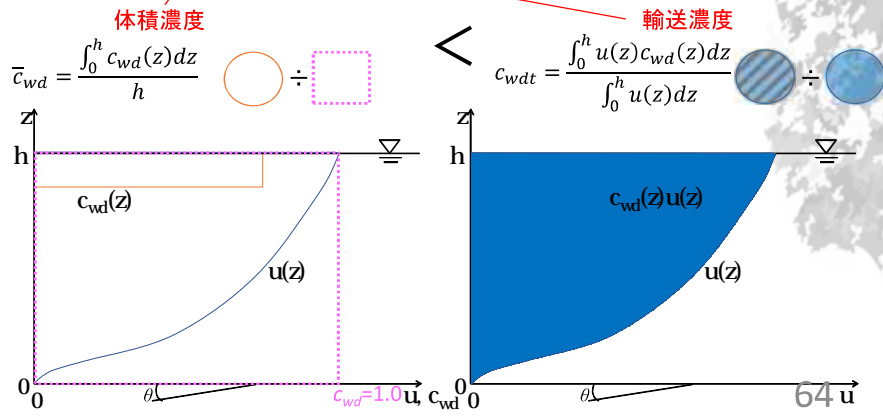
流木に関する連続式が必要

連続式 $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = E$

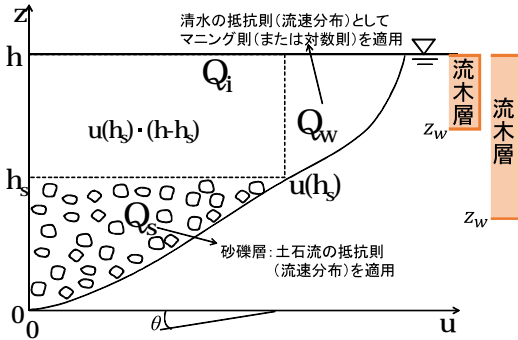
運動方程式 $\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta \frac{\partial(UQ)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho_m}$

流木の連続式 $\frac{\partial(\bar{c}_{wd}h)}{\partial t} + \frac{\partial(Qc_{twd})}{\partial x} = E_{wd} c_{*wd}$

h : 水深, Q : 単位幅流量, E : 侵食速度 (負は堆積速度), β : 運動量補正係数, U : 断面平均流速, g : 重力加速度, H : 水位, τ_0 : 河床せん断応力, ρ_m : 土石流の密度, \bar{c}_{wd} : 体積流木濃度, c_{twd} : 流木輸送濃度, E_{wd} : 流木侵食速度 (負は堆積速度), c_{*wd} : 堆積流木濃度



河床せん断応力と土砂輸送濃度式の再構築, 流木輸送濃度式の誘導



流木層の下境界位置 z_w が砂礫層に入っているかどうかで, 式を使い分ける必要がある

- 宮本・伊藤(2002)は江頭モデルだが, 一部強引な(少し不合理な)式の誘導がある。
- 鈴木ら(2013)は, 高橋モデルを用いて連続的な河床せん断応力式を導いている。

一鈴木ら(2013)と同じ考え方で, 江頭モデルを用いた河床せん断応力式, 輸送濃度式, 流木輸送濃度の式を誘導する。

65

zにおけるせん断力とせん断応力の釣り合いの式

$$\left\{ h - z + (h_s - z) \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c_s \right\} \rho g \sin \theta = \rho K(c_s) d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2$$

$$K(c) = K_s + K_d + K_f \quad K_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} k_g e^2 \frac{\sigma}{\rho} c^{\frac{1}{3}} \tan \phi_s \quad \alpha = \left(\frac{c}{c_*} \right)^{\frac{1}{5}}$$

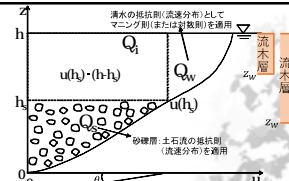
$$K_d = k_g (1 - e^2) \frac{\sigma}{\rho} c^{\frac{1}{3}} \quad K_f = k_f \frac{(1 - c)^{\frac{5}{3}}}{c^{\frac{2}{3}}}$$

$$\left(\frac{du}{dz} \right) = \frac{\sqrt{g \sin \theta} \left\{ h + c_s h_s \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) - \left[1 + c_s \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \right] z \right\}^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{K(c_s) d}}$$

$$\left(\frac{du}{dz} \right) = \frac{\sqrt{g \sin \theta} \left\{ \left[1 + \bar{c} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \right] h - \left[1 + c_s \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \right] z \right\}^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{K(c_s) d}}$$

$$\left(\frac{du}{dz} \right) = \sqrt{\frac{g \sin \theta}{K(c_s) d}} (rh - r_s z)^{\frac{1}{2}}$$

$$r = 1 + \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \bar{c}, \quad r_s = 1 + \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c_s$$



- h : 水深
- Q : 単位幅流量
- E : 侵食速度 (負は堆積速度)
- β : 運動量補正係数
- U : 断面平均流速
- g : 重力加速度
- H : 水位
- τ_b : 河床せん断応力
- ρ_{st} : 土石流の密度
- \bar{c} : 体積土砂濃度
- c_s : 土砂輸送濃度
- c : 堆積土砂濃度
- \bar{c}_{wat} : 体積流木濃度
- c_{wat} : 流木輸送濃度
- E : 流木侵食速度 (負は堆積速度)
- c_{wat} : 堆積流木濃度
- h_s : 砂礫層の高さ
- σ : 砂礫密度
- ρ : 水の密度
- ϕ_s : 内部摩擦角
- θ : 河床勾配
- u : 流速
- k_g : 定数で0.0828
- e : 反発係数
- k_f : 粒子間隙スケールの係数で0.16
- c_s : 砂礫層の土砂濃度
- d : 粒径
- K : カルマン係数
- c_{wat} : 流木層濃度

66

zにおける流速の算出

$$u(z) = A \int_0^z (rh - r_s z)^{\frac{1}{2}} dz \quad A = \sqrt{\frac{g \sin \theta}{K(c_s)}}$$

$$= A \left[-\frac{2}{3r_s} (rh - r_s z)^{\frac{3}{2}} \right]_0^z$$

$$= A \frac{2}{3r_s} \left\{ (rh)^{\frac{3}{2}} - (rh - r_s z)^{\frac{3}{2}} \right\}$$


Q_sの算出

$$Q_s(z) = \int_z^{h_s} u(z) dz = A \frac{2}{3r_s} \left[(rh)^{\frac{3}{2}} z + \frac{2}{5r_s} (rh - r_s z)^{\frac{5}{2}} \right]_{z}^{h_s}$$

$$= A \frac{2}{3r_s} \left[(rh)^{\frac{3}{2}} h_s + \frac{2}{5r_s} (h - h_s)^{\frac{5}{2}} - (rh)^{\frac{3}{2}} z - \frac{2}{5r_s} (rh - r_s z)^{\frac{5}{2}} \right]$$

$$= \frac{U_*}{\sqrt{K(c)}} \frac{h^2}{d} \frac{4}{15r_s} \left[\frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_s - \frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_w r_s + r_w^{\frac{5}{2}} - \frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_s \frac{z}{h} - \left(r - r_s \frac{z}{h} \right)^{\frac{5}{2}} \right]$$

$$U_* = \sqrt{gh \sin \theta} \quad r_w = 1 - \frac{\bar{c}}{c_s}$$

$$Q_s = Q_s(0) = \frac{U_*}{\sqrt{K(c_s)}} \frac{h^2}{d} \frac{4}{15r_s} \left[\frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_s - \frac{5}{2} r^{\frac{3}{2}} r_w r_s + r_w^{\frac{5}{2}} - r^{\frac{5}{2}} \right]$$


67

Q_wの算出(対数則を用いる)

$$Q_w(z) = \int_z^h u_w(z) dz$$

$$= \frac{U_{*w}}{\kappa} \left[(h - h_s + \eta_0) \ln \frac{h - h_s + \eta_0}{z - h_s + \eta_0} + (h - z) \ln \frac{z - h_s + \eta_0}{\eta_0} - (h - z) \right]$$

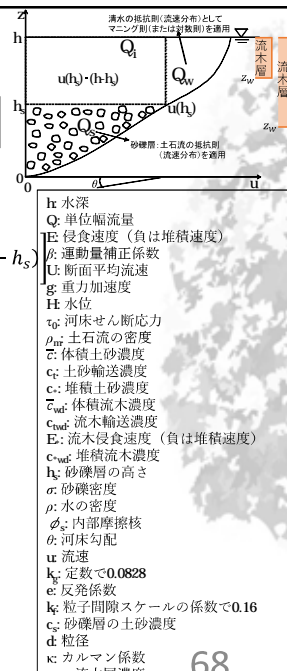
$$U_{*w} = \sqrt{g(h - h_s) \sin \theta} \quad \eta_0 = \sqrt{k_f \left(\frac{1 - c_s}{c_s} \right)^{\frac{1}{3}}} d$$

$$Q_w = Q_w(h_s) = \int_{h_s}^h u_w(z) dz = \frac{U_{*w}}{\kappa} \left[(h - h_s + \eta_0) \ln \frac{h - h_s + \eta_0}{\eta_0} - (h - h_s) \right]$$

$$= \frac{U_{*w}}{\kappa} h \left[\left(r_w + \frac{\eta_0}{h} \right) \ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h}}{\frac{\eta_0}{h}} - r_w \right]$$

Q_iの算出

$$u(h_s) = \frac{U_*}{\sqrt{K(c)}} \frac{2}{3r_s} \frac{h}{d} \left(r^{\frac{3}{2}} - r_w^{\frac{3}{2}} \right)$$

$$Q_i = u(h_s)(h - h_s) = \frac{U_*}{\sqrt{K(c)}} \frac{2}{3r_s} \frac{h^2}{d} r_w \left(r^{\frac{3}{2}} - r_w^{\frac{3}{2}} \right)$$


68

最終的に導かれた式

$$\tau_0 = \rho K(c)r(\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w)^{-2} \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} U^2 \quad \text{河床せん断応力式}$$

$$c_t = c_s \frac{\varphi_s}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \quad \text{土砂輸送濃度式}$$

$$z_w > h_s: c_{twd} = c_{swd} \frac{\varphi_i \frac{r_{wd}}{r_w} + \varphi_{wwd}}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w} \quad \text{流木輸送濃度式}$$

$$z_w \leq h_s: c_{twd} = c_{swd} \frac{\varphi_{swd} + \varphi_i + \varphi_w}{\varphi_s + \varphi_i + \varphi_w}$$

$$\varphi_s = \frac{4}{15} r_s^{-2} \left[\frac{5}{2} r^3 r_s - \frac{5}{2} r^2 r_w r_s + r_w^2 - r^2 \right]$$

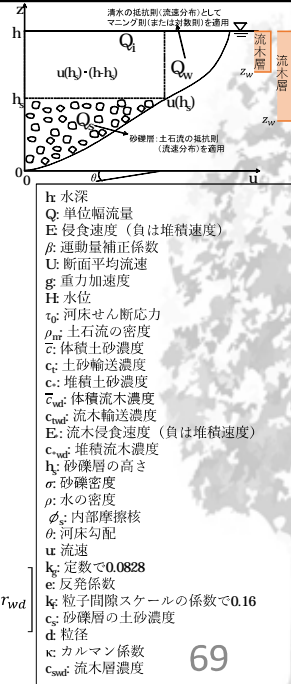
$$\varphi_i = \frac{2}{3} r_s^{-1} \left[r^3 r_w - r_w^2 \right]$$

$$\varphi_w = \frac{1}{\kappa} \sqrt{K(c)} \left(\frac{h}{d}\right)^{-1} r_w^{\frac{1}{2}} \left[\left(r_w + \frac{\eta_0}{h} \right) \ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h}}{\eta_0} - r_w \right]$$

$$\varphi_{swd} = \frac{4}{15 r_s} \left[\frac{5}{2} r^3 r_s - \frac{5}{2} r^2 r_w r_s + r_w^2 - \frac{5}{2} r^2 r_s \frac{z_w}{h} - \left(r - r_s \frac{z_w}{h} \right)^2 \right]$$

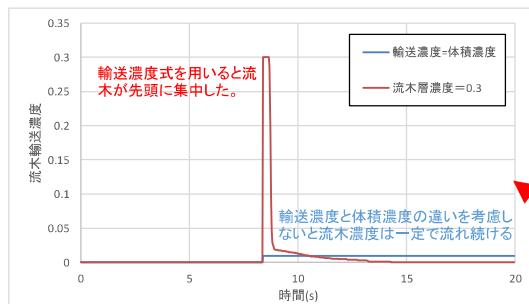
$$\varphi_{wwd} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{K(c)} \left(\frac{h}{d}\right)^{-1} r_w^{\frac{1}{2}} \left[\left(r_w + \frac{\eta_0}{h} \right) \ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h}}{r_w + \frac{\eta_0}{h} - r_{wd}} + r_{wd} \ln \frac{r_w + \frac{\eta_0}{h} - r_{wd}}{\eta_0} - r_{wd} \right]$$

$$r_{wd} = 1 - \frac{z_w}{h}$$



テスト計算

- 勾配10度で上流端から5秒間の流木混じり土石流を与えた。
- 流量一定, 流木輸送濃度0.01一定



- 流木輸送濃度式により, 流木の先端部集積過程を再現可能

流木の侵食、堆積の評価

流木の侵食・堆積速度は次のように評価する。河床に侵食可能な流木が存在する場合、土石流は流木を取り込む。数値計算では、メッシュ毎に河床に存在する流木量を単位面積当たりの流木深 d_{wd} として表す。土石流は限界濃度 c_{swd} まで流木を取り込むようにすると、侵食速度 E_{wd} は以下となる。

$$E_{wd} = \frac{1}{\Delta t} \frac{h(c_{swd} - c_{wd})}{1.0 - c_{swd}}$$

ここで、 Δt は数値計算の刻み時間である。ただし、河床存在流木量以上の流木を侵食しないよう以下の制限を加える。

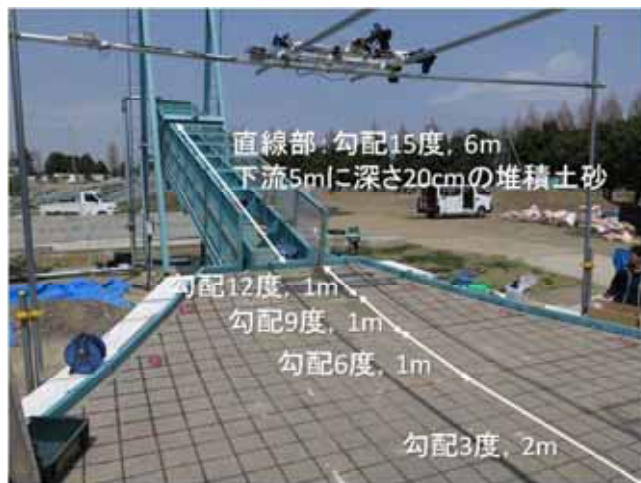
$$E_{wd} \leq \frac{d_{wd}}{\Delta t}$$

流木の堆積は流木の移動限界水深 h_{lim} に着目して考えることとした。流木は土石流の流動深が一定以下になると底面との接触摩擦力の影響で停止すると考えられる。そのため、土石流の流動深が h_{lim} を下回った時は次式に従って流木を全て堆積させる。

$$E_{wd} = \frac{-hc_{wd}}{\Delta t}$$

71

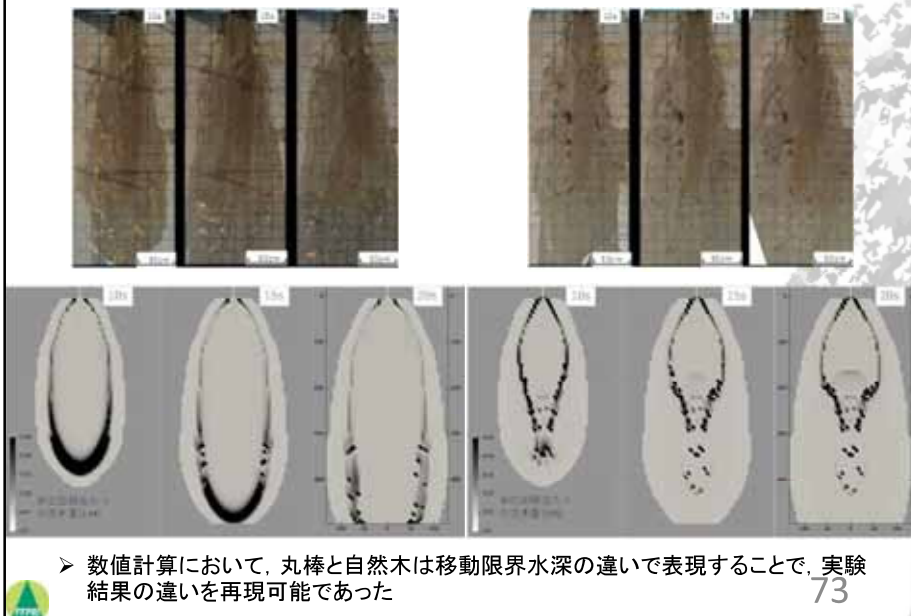
水路実験



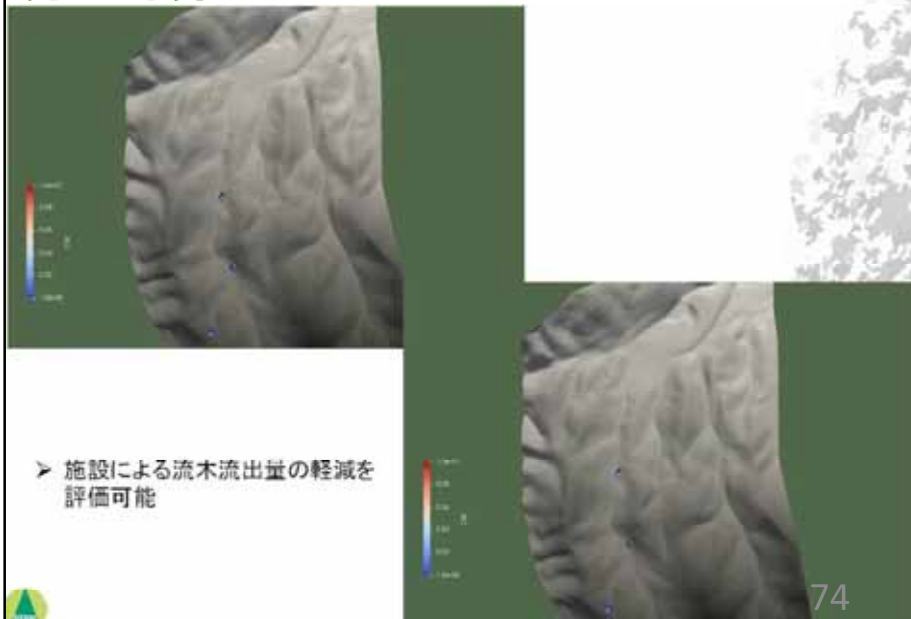
- 上流端から3.0l/sの水を60秒間供給した
- 堆積土砂に直径5mm、長さ8cmの流木を等間隔に300本差し込んだ
- 丸棒と自然木で実施した

72

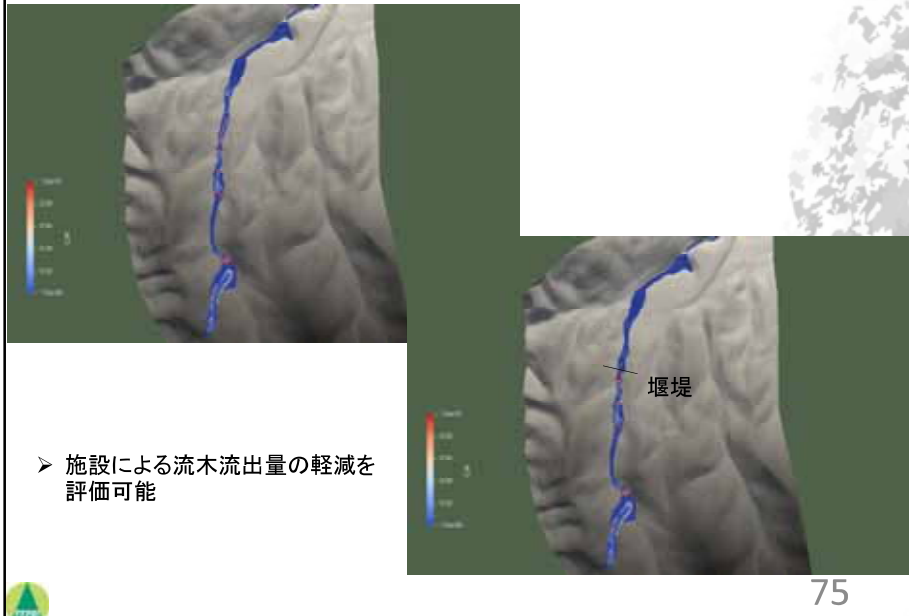
水路実験結果と計算結果



現地計算のイメージ



現地計算のイメージ



まとめと今後の予定

- 粒子法により流木の動きを再現する計算手法を構築した
 - 施設による流木の捕捉過程, 摩擦力の違いによる流木挙動の違い, 先端部集積過程を概ね再現
 - これらの知見に基づいて流木挙動を再現する格子法の計算手法を構築
 - 検討, 改良を継続し, 現場技術者が利用可能なツールの構築を目指す
- 76