

赤谷川災害復旧事業における水理模型実験を用いた流木捕捉施設の検討について

北島 大基¹・中原 寛人¹・多田 幸平¹・川野 恵司¹

¹ 筑後川河川事務所 九州北部豪雨復興出張所

(〒838-1511 福岡県朝倉市杷木池田483番地1 朝倉市役所杷木支所3階)

平成 29 年 7 月九州北部豪雨では、赤谷川流域において土砂や流木により河道が閉塞し、甚大な被害が発生した。現在、河道整備による治水安全度の向上に加え、砂防堰堤や遊砂地の整備による流木捕捉と橋梁クリアランス確保による流下阻害解消を進めている。しかし、溪流内には未だ倒木等が残存し、特に赤谷川本川沿いの溪流から流出した流木は、保全対象の多い下流へ流下するため、さらに対策が必要であった。そのため、本研究では、赤谷川流域の乙石川合流点に整備する流木捕捉施設について、平面二次元解析及び水理模型実験により、流木を最大限捕捉可能な施設配置・諸元を設定することを目的とした。

キーワード 九州北部豪雨、流木捕捉施設、平面二次元解析、模型実験

1. はじめに

平成 29 年度 7 月 5 日の昼頃から夜にかけて、九州北部の福岡県から大分県に強い雨域がかかり、短時間に記録的な雨量を降らせ、気象庁のレーダー解析（24 時間解析雨量）では、朝倉市で約 1000mm、日田市で約 600mm の記録的な豪雨を観測した。この九州北部豪雨により、同時多発的に斜面崩壊が発生し、大量の土砂や流木（写真-1）が流下した。



写真-1 赤谷川流域で発生した土砂や流木(H29.7)

このため、福岡県の管理河川である赤谷川流域や白木谷川流域等の筑後川右岸流域で多数の人的被害や家屋被害が生じた。特に、被害が甚大であった赤谷川及び乙石川、大山川について、福岡県知事の要請を受け、「権限代行制度」を全国で初めて適用し、福岡県に代わって河川災害復旧工事及び工事を実施するための調査設計、用

地補償をすることになった。

赤谷川流域において、平成 30 年応急復旧が完了し、現在、赤谷川の治水安全度を高めるため、川幅を広げ、急な湾曲区間をゆるやかにして流れやすくするとともに、砂防堰堤や遊砂地の整備による流木捕捉と橋梁クリアランス確保による流下阻害解消を進めている。しかし、溪流内には、未だ倒木等が残存し、特に赤谷川本川沿いの溪流から流出した流木は、保全対象が多い下流へ流下するため、さらに対策が必要である。

また、九州北部緊急治水対策プロジェクトにおいても、河道に流入した土砂・流木の下流への流出を抑制するための貯留施設の整備を行うとしている。

そのため、本論文では、複雑な流況を呈する乙石川合流点の赤谷川本川左岸に整備する流木捕捉施設について、平面二次元解析及び水理模型実験により、流木を最大可能な施設配置・諸元を求め、その有効性について報告する。

2. 対象区間

筑後川右支川である赤谷川は、図-1に示すとおり、流域面積19.9km²、河川延長9.4km（施工範囲7.8km）、河床勾配1/10～1/140程度である。

本研究では、検討対象区間を図-1に示す。流木捕捉施設を整備する赤谷川4.0km付近は、支川乙石川（河床勾配1/10～1/50）と小河内川（河床勾配1/30程度）が近接しており、射流状態で合流する湾曲部である。

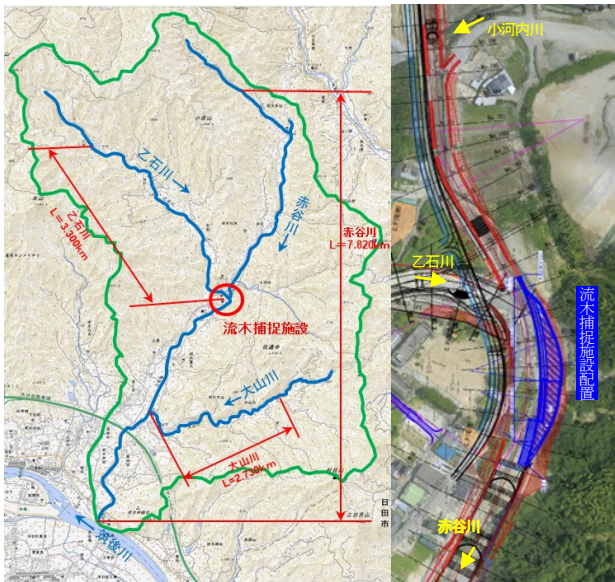


図-1 赤谷川流域の概要と検討対象区間

3. 検討概要

本研究では、流木を最大限捕捉可能な施設配置・諸元を設定することを目的に、湾曲部と乙石川合流点による偏流を活用した流木捕捉施設について、平面二次元解析で施設原案を立案し、水理模型実験（縮尺1/30、固定床）⁹⁾により機能検証（流木捕捉率と貯留可能本数）と施設改良を重ね、最終配置・諸元を設定する。施設改良は、①流木捕捉施設流入部の改良（流木捕捉率向上）、②背割堤のスリットの間隔調整（施設内水位上昇抑制と捕捉流木の再流出抑制）、③乙石川合流点上流の赤谷川落差工射路部と湾曲外岸埋戻し粒径の工夫による流況改善（施設側への流況制御）を実施する。なお対象とする流木量は、赤谷川の砂防計画で想定している倒木量 87m^3 、対象本数118本とした（流木1本あたり 0.736m^3 ）。

4. 平面二次元解析による施設原案の立案

（1）流木捕捉施設条件の初期値設定

施設条件の初期値は設計概要に準拠し、図-2のとおり設定した。なお、最終諸元は模型実験にて設定する。

a) 越流高の設定

流木捕捉施設は、河川計画規模 $W=1/50$ 以上の洪水で発生する流木を捕捉対象とし、越流堤高をHWLとした。

b) 施設敷高の設定

施設内水深を確保し、流入した流木が移動しやすいよう、最大流木径 0.4m を踏まえ、 $\text{HWL}-0.5\text{m}$ の高さとした。

c) 越流幅の設定

越流幅は、既往の乙石川模型実験の流況や溪流の流木調査結果の最大流木長（ 40m ）を踏まえ、可能な限り幅広く確保するため、 70m を設定した。

d) 流木止めの高さ、設置間隔の設定

土木設計要領²⁾と既往調査³⁾より、流木止め工によるせき上げ高は 0.6m 、流木捕捉に必要な高さは 0.8m （最大流木径 0.4m の2倍）とし、さらに計画水深 2.3m を加えた 3.7m を流木止め高さとした。設置間隔は、土木設計要領に準拠し、目安として最大転石 1m の2倍の 2m とした。

e) 背割堤の形状

背割堤の高さは、流木止めの高さ＋余裕高 0.8m と同値とし、流木止めの高さも余裕高も見込むこととした（河床高 $+4.5\text{m}$ ）。法勾配は護岸と同様に5部勾配に設定した。

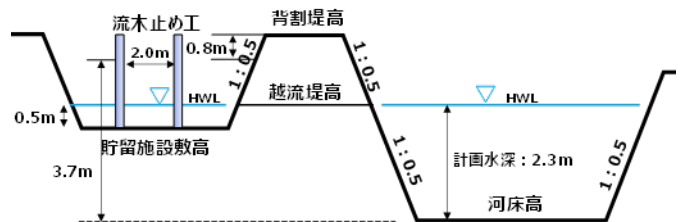


図-2 流木捕捉施設条件の初期値設定

（3）平面二次元解析による流況の確認

河道法線に沿って空間分解が可能な一般座標系の平面二次元流況解析モデル⁴⁾に流木捕捉施設範囲を追加し、流況確認を行った。計画流量 $260\text{m}^3/\text{s}$ （乙石川合流点後）流下時の流況解析結果を図-3に示す。支川合流と湾曲部の遠心力により流木捕捉施設への流入と施設内最大水深 1.2m を確認できたため、施設諸元初期値を原案として模型へ反映し、実験により詳細検証する。

表-1 解析条件

項目	条件
解析手法	一般座標系平面二次元流況解析
メッシュサイズ	縦断方向：50分割（約10～20m程度）、横断方向：18分割（約1～4m程度）
河道条件	赤谷川：計画河道＋左岸堤内地（流木捕捉施設）
粗度係数	赤谷川（乙石川合流前）：低水路 $n=0.042$ 、護岸 $n=0.024$
	赤谷川（乙石川合流後）：低水路 $n=0.035$ 、護岸 $n=0.024$
	乙石川：低水路 $n=0.042$ 、護岸 $n=0.024$
上流端流量	赤谷川： $120\text{m}^3/\text{s}$ 、乙石川： $140\text{m}^3/\text{s}$ 、※定常流
下流端水位	河床高＋計画水深（ 2.2m ）

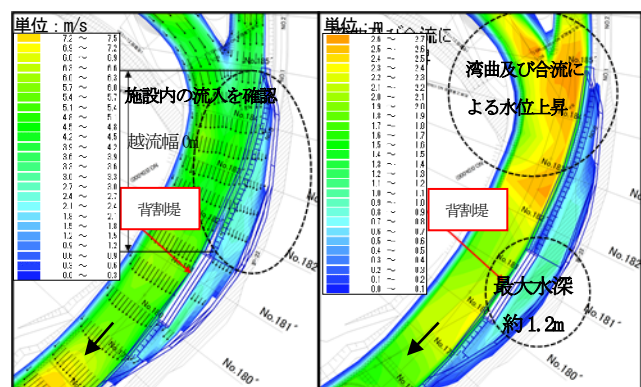


図-3 流速コンター図（左）・水深コンター図（右）

図-6 流速分布図（原案形状・流木あり）

3. 64km で河道に流出する流れが形成される。

流木捕捉率，貯留可能本数を図-7 に示す。投入する流木長の長さを変えて実験を行った結果，流木捕捉率は約 45～62%，貯留可能本数は約 250～450 本となった。

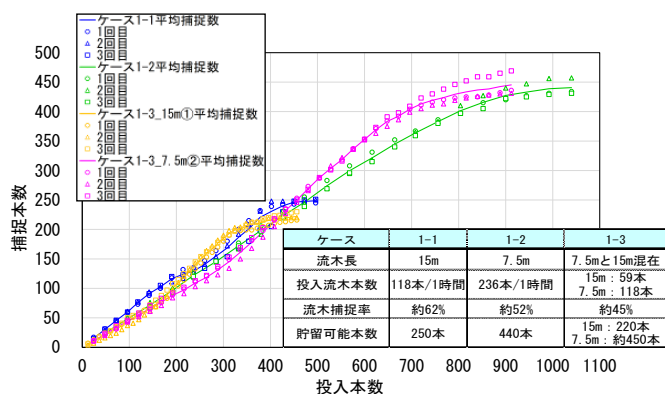


図-7 流木捕捉率（原案形状）

b) 原案形状の課題

原案形状の課題は以下のとおりである。

- ・流木なし条件でも，流木捕捉施設内の水位上昇が大きい（計画堤防高を上回る）。
- ・流木捕捉施設に設けた背割堤の上流端で剥離が発生し，流木の捕捉施設への流入阻害となる。
- ・乙石川合流点で発生する衝撃波の影響により，一旦流木捕捉施設内に流入した流木が回転することによって，再度河道に戻る現象が見られた。
- ・河道左岸側（流木捕捉施設側）を流下する流木は，施設内に流入しやすいが，河道中央を流下する流木は，施設内に流入しても流木の向きが流れに直角となり，捕捉率を低下させる。河道右岸側は，施設内に流入せず，ほとんどが下流へ流下する。

（2）検討②：改良案形状の検討

原案の効果と課題を踏まえ，改良実験を重ね，最適形状を設定する。実験ケースを表-3に，原案形状からの変更箇所を図-8に示す。ケース2-1～2-3は乙石川合流点及乙石川合流点上流とし，施設諸元確定後のケース2-4～2-5は小河内川合流等の影響も考慮できる上流とした。

表-3 実験ケース（改良案）

実験ケース	実験条件	
	形状条件	実験の狙い
2-1	貯留施設上流端変更（改良案(1)）	流木捕捉率向上
2-2	背割堤の全スリット化（改良案(2)）	
2-3	①流木流入部を3.62kmまで拡大（越流幅を55m→65mへ）（改良案(3)）	施設内水位低減抑制と捕捉流木の再流出抑制
	②①＋流木貯留エリアのスリット間隔を4mに拡大（改良案(3)）	
2-4	ケース2-3＋乙石川合流点上流落差工斜路部の工夫（改良案(4)）	施設側への流況改善
2-5	乙石川合流点上流落差工斜路部の工夫＋落差工上流右岸に巨石配置（改良案(5)）	

※290m³/sを定流通水

※流木長15mを118本/1時間流下



図-8 原案形状からの変更箇所

a) 改良案2-1（貯留施設上流端変更）の実験結果

ケース2-1の改良箇所を図-9に示す。原案形状では，捕捉施設上流端に流入した流木が赤谷川の流れにより回転し，下流に流出する現象がみられた。このため，改良案2-1では，捕捉施設上流端の位置を乙石川左岸法線に合致させ，捕捉施設に流入した流木が赤谷川より流速の速い乙石川の流れにより捕捉施設に流入することを期待した形状とした。改良の結果は図-10に示すとおりで，原案形状の捕捉率が約60%から約67%へ向上した。

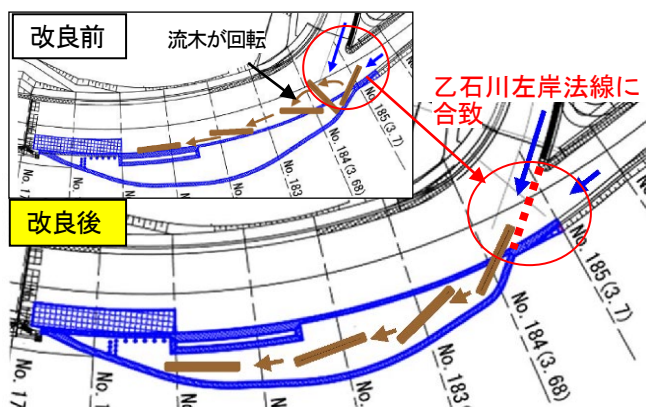


図-9 改良箇所と流木流下イメージ（ケース2-1）

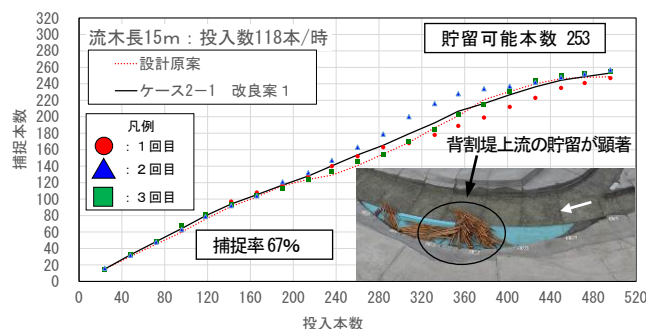


図-10 流木捕捉率・捕捉本数（ケース2-1）

b) 改良案2-2（背割堤全スリット化）の実験結果

原案形状では，背割堤内で水位が上昇し，死水域に近い流れとなるため，背割堤内に流入した流木が滞留する現象がみられた。そこで，背割堤部を流木止め工に変更し，透過性を持たせ，背割堤内側に流れ場をつくり，流木滞留を抑制することで捕捉機能を高めることとした。

改良結果は、図-11 に示すとおりで、捕捉施設内の水位上昇を抑制（流れ場を形成）できたことで、ケース2-1の捕捉率約67%から約75%へさらに向上した。

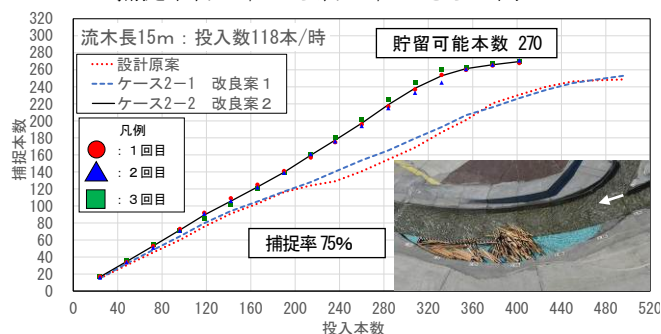


図-11 流木捕捉率・捕捉本数（ケース2-2）

c) 改良案2-3（流入部拡大）の実験結果

ケース2-2では、流木止め工の上流側は、捕捉施設内に流入する流れ場が形成されたが、流木が流木止め工上流端に衝突、停滞、下流に流下する現象がみられた。そこで、ケース2-3では、越流区間を55mから65mに延伸し、さらに、3.62 kmより上流の流木止め工の設置間隔を2mから4mに変更（流水への抵抗減）することで、流木の捕捉施設内への流入率を高めることを期待した。

改良結果は図-12 に示すように、流入部拡大によりケース2-2の捕捉率約75%から約83%へ向上した。

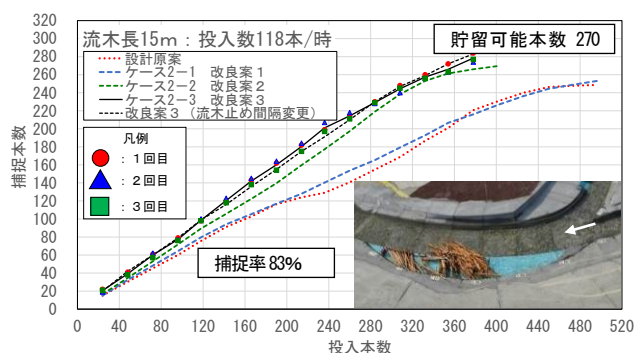


図-12 流木捕捉率・捕捉本数（ケース2-3）

d) 改良案2-4（落差工斜路部の工夫）の実験結果

乙石川合流点付近の落差工（ケース2-3までの流木投下位置）から上流は、図-4に示すように湾曲と小河内川合流による影響で主流域が右岸に寄るため、左岸に位置する流木捕捉施設へ流木が流入しづらい。そこで、改良案2-4では、落差工斜路部を工夫して左岸側に流向を変え、流木を少しでも左岸側に寄せることで、流木の流入頻度を高めることとした。

流木投下位置を小河内川合流部上流に変更して実施した改良結果を図-13に示す。捕捉率は1時間時点では約50%の値を示したが、急流で重力項よりも慣性項が大きい流れ場のため、落差工斜路化による改善効果は小さかった。

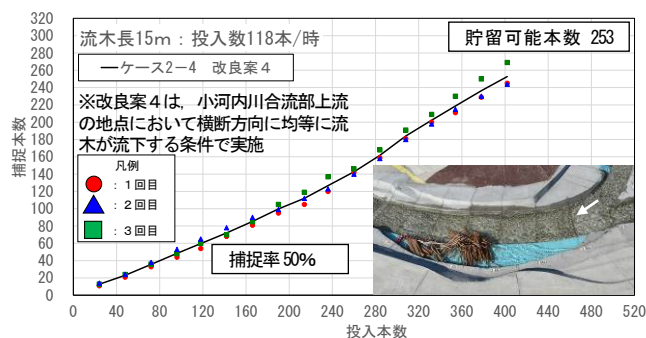


図-13 流木捕捉率・捕捉本数（ケース2-4）

e) 改良案2-5（落差工+上流河道の工夫）の実験結果

さらに改良するため、改良案2-5では、ケース2-4に加え、落差工上流右岸に洗掘抑制と減速機能を有する巨石を河床へ設置し、右岸よりの流れを抑制（河道中央～左岸へ少しでも寄せる）することとした。

改良結果は図-14に示すとおり、ケース2-4の捕捉率約50%から約57%へ向上した（同流木投下位置の原案実験では0%）。

以上より、改良案2-5において流木捕捉率57%と高い捕捉率を確保できたことより、改良案2-5を最終案に設定した。

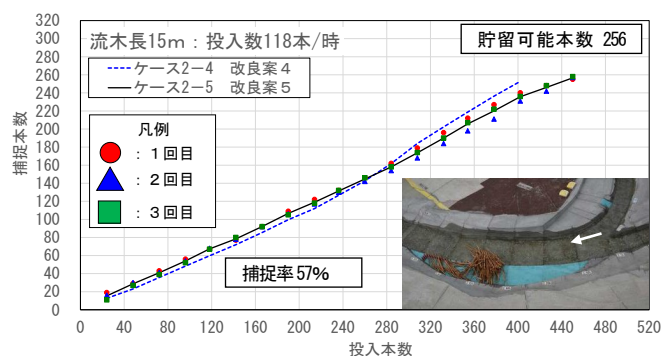


図-14 流木捕捉率・捕捉本数（ケース2-5）

(4) 検討③：最終形状の機能検証

最終流木捕捉施設を対象に、計画流量（260m³/s）と超過洪水流量（400m³/s）流下時の流木捕捉率、貯留可能本数及び水理量の計測を行った。計画流量流下時における流木パターン3ケースの流木捕捉率・捕捉本数を図-15に、超過洪水時の流木捕捉状況を図-16に示す。

計画流量時の流木捕捉率は、流木パターンを変えても約55～58%を確保している。施設周辺の水位・流速から概略の流量比を算出したところ、本川：施設＝8：2程度であり、通常、分流比と流木捕捉率が概ね同程度となることが多いことを踏まえると、効率的に流木を捕捉していると考ええる。また、超過洪水時は水位が高いため、一度流入した流木が流木捕捉工を乗り越えて河道へ流出する現象が見られたものの、流木捕捉率は約65%あり、被災流量が発生しても下流の流木被害軽減に寄与する。

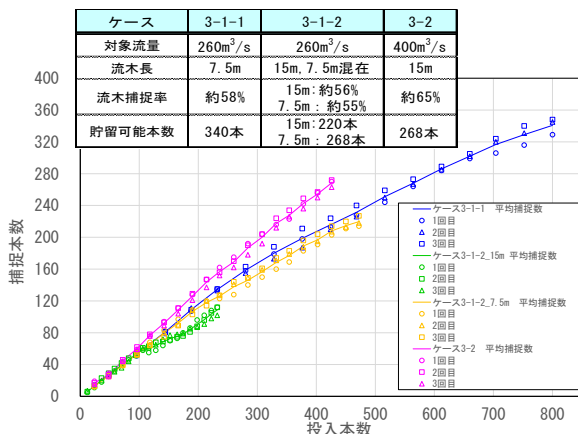


図-15 流木捕捉率・捕捉本数（最終形状）



図-16 最終形状における流木貯留状況（超過洪水 400m³/s）

(5) 設計要領との比較（詳細設計への反映）

模型実験による最終施設配置・諸元や水理諸量を基に、施設高さ・配置・形状を設定し、設計要領との比較を行った。設計要領と本実験から設定した流木止め工高さの比較を表-4 に、本実験結果から設定した施設高縦断面図を図-17 に示す。

流木捕捉施設高は、実験の最大水位（計画流量流下時の河道左岸及び施設内水位の最大水位）を包絡する高さとし、流木止め工及び流木捕捉による最大水位上昇量1.4mを採用した。さらに、流木捕捉時は流木が折り重なって堆積することから、流木堆積を施設内に留めるため、余裕高として最大流木径(0.4m)の2倍である0.8m（＝河道計画の余裕高0.8mと同値）を確保し、被災流量時の水位も包絡することとした。この結果、設計要領と同値となった。また、流木集積エリアは図-18に示す3.58k～3.63kであるため、流木のせり上がり範囲を同区間とした。流木止め工の形状は、施設周辺の流入・流出の流向が様々であるため、剥離が少ない円形型とし、流木が通過しないよう下流端は2列の千鳥配置とした。

表-4 設計要領と本実験結果による設定値比較

施設諸元	土木工事設計要領より設定	実験結果より設定
①計画水深（HWL-計画河床高）	2.3m	
②流木止め工による水位上昇量	0.6m	1.4m (HWLからの水位上昇量)
③流木の堰上げ（最大流木径0.4mの2倍）	0.8m	最大値 (3.63k)
④余裕高（流木の堆積を施設内に止めるための余裕高）	0.8m（最大流木径0.4mの2倍）	
⑤施設高＝①+②+③+④（計画河床高からの高さ）	4.5m	

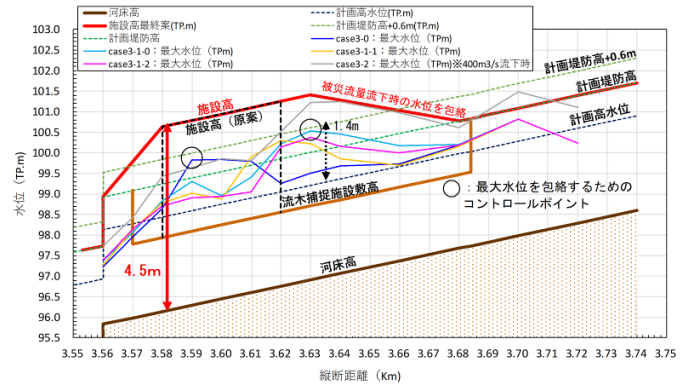


図-17 流木捕捉施設高野設定



図-18 流木のせり上がり範囲（実験ケース 3-1-2）

7. まとめ

本研究で得られた結論を示す。

(1) 乙石川合流点上流より均等流下した流木条件（湾曲・小河内川考慮なし）では、施設改良 2-1～2-3 により流木捕捉率が原案約 60%から最終案約 83%に向上した。施設改良 2-4～2-5 では、右岸側に主流域が形成された条件（湾曲・小河内川を考慮）の流木捕捉率は、原案 0%から約 60%に向上した。また、河道と流木捕捉施設の分流比が 8：2 程度であったことから、2 割程度の分流比で流木捕捉率約 60%は、効率的に捕捉していると考ええる。

(2) ①流木捕捉工の円形型鋼管採用による流水の抵抗減勢と流入流量量の増加、②背割堤スリット化による排水機能増強で施設内水位上昇抑制、③冠水頻度を抑制し、維持管理に配慮した、概ね $W=1/10$ 程度の越流高の確保等は、今後の流木捕捉施設設計に有効な知見が得られたと考える。

今後の課題は、河床変動後においても所定の流木捕捉効果を発揮するかを確認することが必要と考えている。

参考文献

- 福岡泰斗他：数値解析と大規模水理模型実験を組合せた九州北部豪雨の河道計画立案と合意形成，土木学会河川技術論文集，第26巻，pp. 247-252，2020. 6. 10
- 土木工事設計要領 第Ⅱ編河川編 平成29年10月版 九州地方整備局
- 筑後川右岸流域 河川・砂防復旧技術検討委員会報告書，筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会，2017. 11. 22
- 長田信寿：一般座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析，水工学における計算機利用の講習会講義集，土木学会水理委員会基礎水理部会，pp. 61-76，1999. 8. 3