

治水専用ダムの洪水調節用放流設備の設計手法に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 16～平 18

担当チーム：河川・ダム水理チーム

研究担当者：箱石憲昭、宮脇千晴、櫻井寿之

【要旨】

近年、流水の貯留を洪水時のみ行なう治水専用ダムに脚光が集まってきている。このダムでは洪水調節用放流設備を河床付近に設け、排砂設備及び魚道としても機能させることが期待されている。しかし一方では、土砂及び流木による放流設備の閉塞が懸念され、閉塞条件の解明と閉塞防止のための技術開発が求められている。そこで本調査では、部分管路型の洪水調節放流設備を対象に、土砂及び流木による放流設備の閉塞に関する水理模型実験による検討を実施し、これらの現象を解明して、閉塞の条件を明らかにするとともに、土砂及び流木による閉塞の生じない洪水調節用放流設備の設計手法を提案した。

キーワード：治水専用ダム、洪水調節放流設備、堆砂対策、流木、閉塞防止策、スクリーン

1. はじめに

流水の貯留を洪水時のみ行なう治水専用ダムでは、洪水調節用放流設備を河床付近に設け、排砂設備及び魚道としても機能させることが期待されている。しかし、土砂及び流木による放流設備の閉塞が懸念され、閉塞条件の解明と閉塞防止のための技術開発が求められている。

上記に鑑み、本調査では、土砂及び流木に関して、それぞれ単独に作用した場合の閉塞条件の把握と閉塞防止策について検討し、土砂及び流木による閉塞の生じない洪水調節用放流設備の設計手法の提案を目的としている。

調査は主として水理模型実験を通じて行っており、土砂による閉塞状況については、放流設備を1条抽出した水理模型により、土砂の流入状況や下流水位条件によって、放流管内に土砂が堆積することにより放流特性の変化や放流管の閉塞が生じる可能性について調査した。また、流木による閉塞状況についても、放流設備を1条抽出した水理模型で貯水位の変化と流下する流木の条件による放流管入口部での閉塞状況を調査した。

その結果、流木流下による閉塞が懸念され、その対応策を検討して固定式スクリーンによる対策とその設計手法を提案した。

は、放流管を出口幅 $B=0.1\text{m}$ 、出口高さ $D=0.1\text{m}$ の矩形形状で再現し、呑口部は標準的な長軸半径 $2D$ 、短軸半径 $D/3$ の楕円形の1面ベルマウスとした。なお、ベルマウス終端に延長 $D/2$ の直管部を設けている。放流管の上流は幅 0.1m の2次元水路とし、下流は末端に水位調節装置を有する幅 1m の3次元水路としている。模型の上流には給水用の水槽を、下流には沈砂池を兼ねた水槽を設置した。

下流の水槽に水中ポンプを設置し、ポンプから上流の水槽へ配管を行い、実験時に水を循環させた。

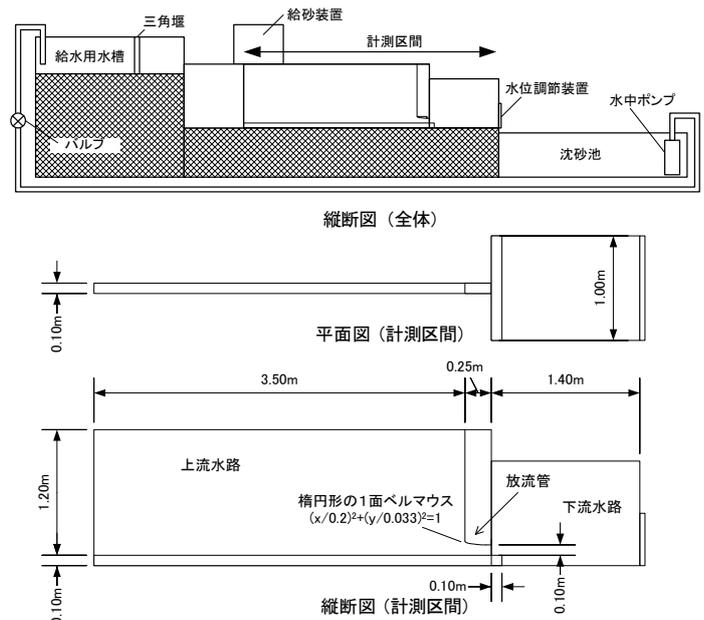


図-2.1 実験模型概要

2. 土砂による閉塞の検討

2.1 実験概要

実験に用いた模型の概要を図-2.1に示す。実験で

今回用いた土砂は平均粒径 1.2mm の一様粒径珪砂であり、模型上流に設けた給砂装置から乾燥状態で供給した。高さと幅が 5m の原型の放流管を想定した場合、今回の模型は縮尺 1/50 に相当する。なお、表中の上流水位の測定位置は放流管呑口から 0.1m 上流、下流水位の測定位置は 0.6m 下流であり、給砂量は乾燥状態の給砂量から空隙率を 0.4 として求めた土粒子実質体積の給砂量である。

実験方法としては、放流管の排砂時において管内の土砂堆積の目安となる排砂状況を再現し、そのときの流況と水理量を把握した。状況としては、次の二つを設定した。**状況①**：下流からの堆砂の進行によって堆砂が放流管出口に達する。**状況②**：下流からの堆砂の進行によって、上下流の堆砂がつながる。

実験条件として、流量、下流の堰上げ高さ及び給砂量の 3 つがあるが、実験の効率を考慮して、下流の堰上げ高さと給砂量の二つの条件を固定し、流量を変化させることによって、上記の状況①および②を再現した。設定した状況となっているかどうかの判定は、現象が変動を有するものであったので、30 秒程度の時間間隔において状況①については、下流からの堆砂の先端位置が最も流下した位置が放流管出口部に達した状態、状況②については、放流管内の堆砂の最低堆砂厚が 1cm となった状態を基準に判断した。測定項目は流量、給砂量、河床形状、水面形状及び流況である。

実験条件は堰上げ高さを 0.2~0.6m の間で 4 ケース、給砂量を $10\sim 40 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ($600\sim 2400 \text{ cm}^3/\text{min}$) 程度の間で 4 ケース変化させた合計 16 ケースを設定した。

2.2 実験結果

実験結果を表-2.1 に、ケース 4 とケース 16 の河床形状と水面形状の測定結果を図-2.2 に示す。なお、表中の上流水位の位置は放流管呑口から 0.1m 上流、下流水位の位置は 0.6m 下流であり、給砂量は

表-2.1 実験結果

ケース名	下流水路堰上げ高 (m)	状況①			状況②				
		流量 Q ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	上流水位 h_1 (m)	下流水位 h_2 (m)	給砂量 Q_B ($\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)	流量 Q ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	上流水位 h_1 (m)	下流水位 h_2 (m)	給砂量 Q_B ($\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)
ケース1	0.20	3.7	0.303	0.231	10.0	2.1	0.309	0.222	9.0
ケース2	0.20	4.1	0.310	0.241	18.0	2.6	0.339	0.228	19.2
ケース3	0.20	4.5	0.332	0.250	30.3	3.0	0.384	0.244	32.4
ケース4	0.20	5.1	0.338	0.252	41.2	3.2	0.398	0.240	38.0
ケース5	0.30	5.1	0.436	0.325	8.4	3.1	0.468	0.322	8.2
ケース6	0.30	5.7	0.451	0.327	18.4	4.2	0.493	0.330	17.0
ケース7	0.30	6.5	0.477	0.348	29.9	4.7	0.513	0.338	29.9
ケース8	0.30	7.5	0.493	0.352	43.2	5.0	0.514	0.348	42.0
ケース9	0.45	7.1	0.726	0.485	11.0	4.4	0.677	0.474	7.6
ケース10	0.45	8.5	0.756	0.500	20.8	5.7	0.733	0.483	20.2
ケース11	0.45	9.0	0.756	0.502	29.1	6.0	0.757	0.494	29.1
ケース12	0.45	9.5	0.793	0.513	40.8	6.7	0.786	0.501	40.4
ケース13	0.60	7.7	0.962	0.636	10.6	5.7	0.942	0.630	10.2
ケース14	0.60	9.1	0.984	0.633	21.0	6.1	0.968	0.636	21.2
ケース15	0.60	9.9	1.007	0.645	29.1	6.8	0.989	0.647	28.2
ケース16	0.60	10.5	1.033	0.662	38.4	7.6	1.027	0.650	43.2

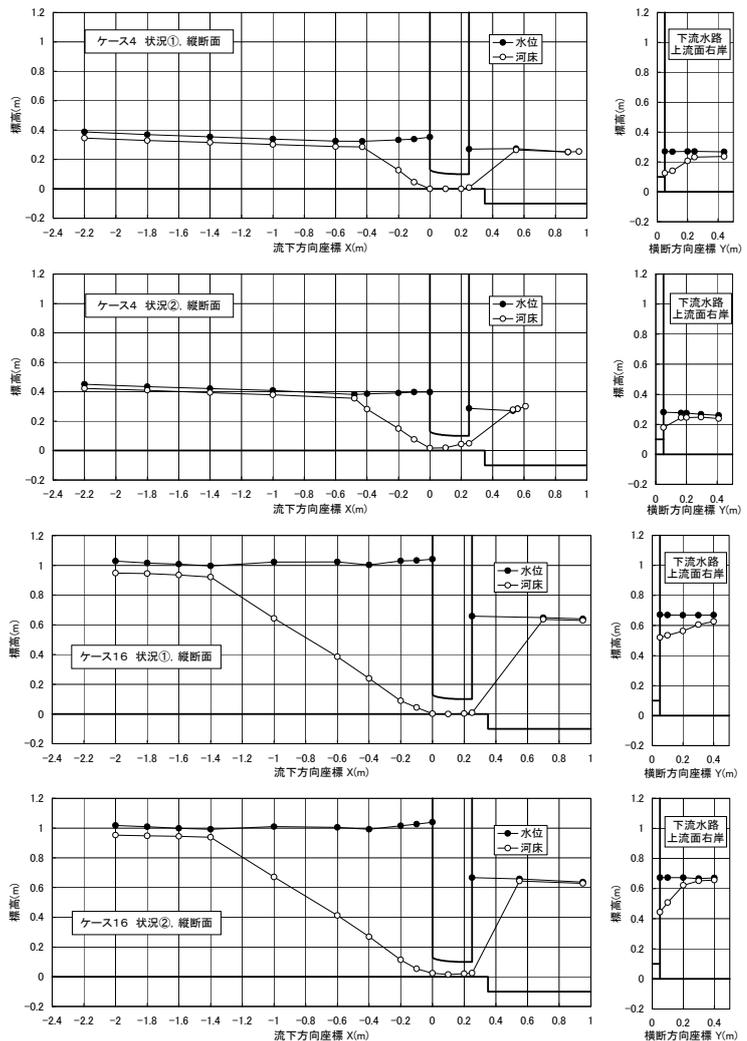


図-2.2 実験結果の河床高と水面形

表乾燥状態の給砂量から空隙率を 0.4 として求めた土粒子実質体積の給砂量である。

実験を実施した結果、全てのケースで、呑口上流の流況は比較的穏やかであり、上流の河床勾配は、砂の水中安息角度に近い $32\sim 35^\circ$ 程度となった。一

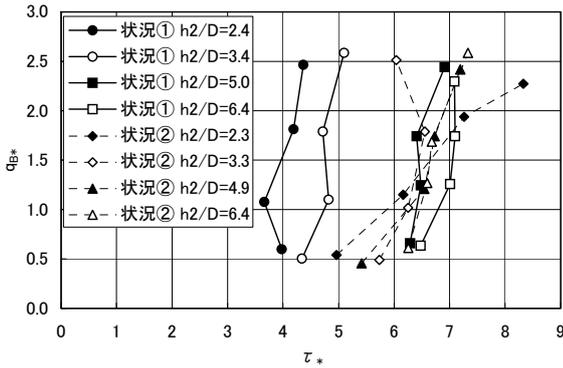


図-2.3 τ_* と q_{B*} の関係

方、堰上げによって下流水位を上昇させた放流管下流の流況は、土砂が吹き上げられるような状況であり、すり鉢状の堆砂の肩が常に崩壊しては流れに押し戻されるような流況となった。下流は3次元水路としたため、放流管出口直下流付近の河床の詳しい形状は不明であるが、堆砂の肩が安定している位置の河床高の計測結果から下流側の傾斜の勾配を計算すると、安息角よりも急であり、下流水路の堰上げが高いほど、また状況①よりは状況②の場合の方が、急勾配になる傾向が認められた。

堰上げ高が0.6mで状況②のケースでは下流の傾斜が 60° 以上となる場合もあり、下流河床が急傾斜の状態では流量が急に減少する場合には放流管が下流土砂の崩壊で閉塞する危険性があると考えられる。

状況①について、下流水位を放流管出口高で無次元化したパラメータ： h_2/D 毎に、掃流砂についてよく用いられる無次元掃流力の $3/2$ 乗と無次元流砂量との関係を図-2.3に示す。ここで、無次元掃流力と無次元流砂量は下記の式で求めた。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} \quad , \quad q_{B*} = \frac{Q_B}{B\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}} \quad (2.1)$$

$$u_* = \sqrt{gRI_e} \quad , \quad I_e = \frac{\Delta H}{L} \quad (2.2)$$

ここで、 τ_* ：無次元掃流力、 u_* ：摩擦速度、 σ ：土粒子密度、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 d ：土粒子粒径、 q_{B*} ：無次元流砂量、 R ：径深、 I_e ：エネルギー勾配、 ΔH ：放流管上下流の全水頭の差、 L ：放流管長である。下流水位の増加とともにデータが右へ移動しているが、これは、崩れ落ちる土砂を吹き上げるために必要なエネルギーが、下流水位増加にともない大きくなることによると考えられる。状態①は放流管出口の全断面積による放流が可能な限界状態であるので、この図に示される条件よりも τ_* が大

きいか、 q_{B*} が小さければ今回の実験条件の範囲では放流管が閉塞することはない。

3. 流木による閉塞の検討

3.1 対象とする放流設備と流木

本検討で対象としたのは、一面ベルマウスを有する部分管路型の放流設備であり、形状を図-3.1に示す。一面ベルマウス形式は、四面ベルマウス形式と比較して呑口幅が小さく、開水路流と管路流の遷移が比較的安定していることから多く採用されている形式である。出口断面の大きさは必要な放流能力

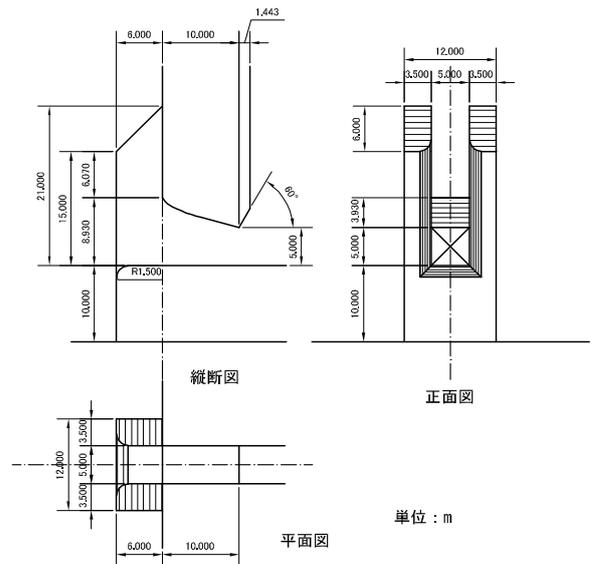


図-3.1 対象とする放流設備形状

表-3.1 流木模型の諸元

流木長 (B基準)	流木長		流木直径	
	原型値(m)	模型値(m)	原型値(m)	模型値(m)
0.3B	1.5	0.024	0.11	0.0018
0.5B	2.5	0.040	0.31	0.0050
1B	5.0	0.080		
1.5B	7.5	0.120		
2B	10.0	0.160		
3B	15.0	0.240		

B：放流設備幅 (5.0m)

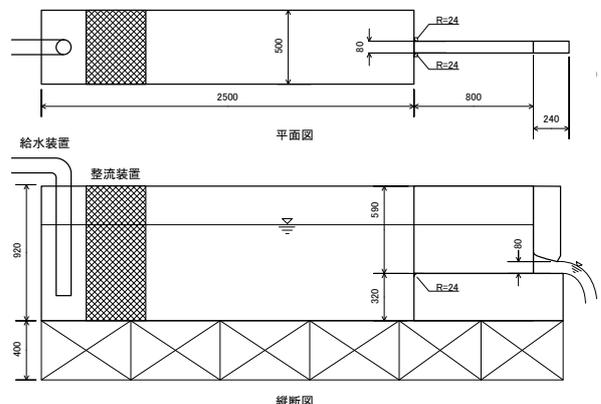


図-3.2 実験模型概要

によって決められるが、幅としては、コンクリートダムの構造面の制約から、コンクリート継ぎ目間隔（通常 15m 程度）の 1/3 以下とする必要があり、対象とした放流設備の幅 5m は大規模なものである。なお、上流ピアの上面に勾配があるのは流木がピア上に堆積しないことを目的としたものである。用いる模型の縮尺は 1/62.5 とした。

対象とする流木としては、ある程度の強度を有することを想定して直径 30cm 程度とし、長さについては変化させて、表-3.1 に示すような円柱形の模型を製作した。なお流木長 0.3B (B: 放流設備幅) の模型は爪楊枝を切断して作成した。それ以外の流木模型はラミン材で作成し、密度変化防止のためにニス塗装した。塗装後の流木模型の平均的な密度は 0.73g/cm^3 であった。

3.2 放流設備上流を 2 次元水路とした場合の検討

最初の検討として、上流ピアを上流側へ伸ばすことにより流木の進入量を制御すること及びピア内を 2 次元水路として流木の基礎的な流下挙動を把握することを目的として実験を行った。用いた水理模型の概要図を図-3.2 に示す。ピアの長さは 2 次元的な流れになるのに十分な長さとして出口断面幅の 10 倍とした。なお、戸溝は予備検討により流木閉塞の原因となることが確認されており、無くしている。

3.2.1 一定流量の実験

始めに、一定流量の条件で流木が流下してくる場合の実験を行った。実験条件を表-3.2 に示す。流木の投入方法は、流入流量量に関する情報が得られなかったため、本数による設定ではなく、常に放流設備上流 1.5m 程度（原型値で 94m 程度、水面の状況は穏やか）の水面に流木が存在する状態を保つように随時水槽の上流端付近から流木が水面で重なり合わない状態で投入した。ピア内への進入は流木の重なり具合などの偶然性が関与するため、最も進入する場合を想定して人為的に流入部の流木の重なりを崩す操作を行い、ピア内の流木の滞留が安定するまでこの操作を続けた後に状況の記録を行った。

実験結果の流木の挙動の概略を表-3.2 に、流況の例を図-3.3 に示す。これより、開水路流ではピア内及び放流管内に流木が留まることはない。水位が上昇するとピア内に流入した流木が呑口上流の水面で滞留するようになり、ピア内の流れによって流木が引き込まれ絡み合っ、流木の層が厚くなり、流木長が長い場合には水路底面まで達する。

表-3.2 一定流量の実験ケース及び結果の一覧

ケース名	流量 (原型値) (m^3/s)	H/D	流木長	実験結果 (流木の挙動)
1	180	開水路流	1B	全て流出
2			1.5B	全て流出
3			2B	全て流出
4			3B	全て流出
5			1B	全て流出
6			1.5B	全て流出
7	256	1.88	2B	呑口上流のピア内全域に滞留、流木が底面に接触
8	310	2.50	1B	呑口上流のピア内の下流一部領域に滞留
9			1.5B	呑口上流のピア内全域に滞留
10			2B	呑口上流のピア内全域に滞留、流木が底面に接触
11			3B	呑口上流のピア内全域に滞留、流木が底面に接触
12	400	3.75	1B	呑口上流のピア内全域に滞留
13			1.5B	呑口上流のピア内全域に滞留
14			2B	呑口上流のピア内全域に滞留
15			3B	呑口上流のピア内全域に滞留

H: 貯水位 (放流設備敷き高基準)
D: 放流設備出口高さ (5.0m)

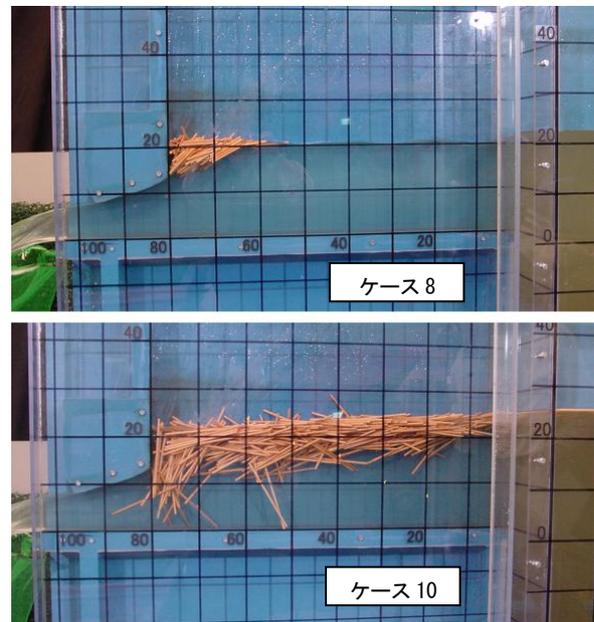


図-3.3 一定流量の実験結果 (ピア内を横方向から撮影)

3.2.2 水位変動の実験

実際の出水では貯水位が大きく変動するため、水位変動を考慮する必要がある。ハイドログラフがピークを複数持つ波形になったり、短期間に出水が連続したりする場合も考えられるため、水位の上昇、下降、再上昇という水位変動を設定して実験を行った。与えた水位変動の概要を図-3.4 に示す。

流木の投入方法は、初期条件として過去の出水により流木が堆積した状況を想定してピア上流の領域に高さ 1B、延長 5B でランダムに流木を設置する。最初の水位上昇後に、ピア上流水面に滞留している流木を人為的に崩しピア内へ流木を流下させる。ピア内の流木の滞留状況が安定したところで、ピア上

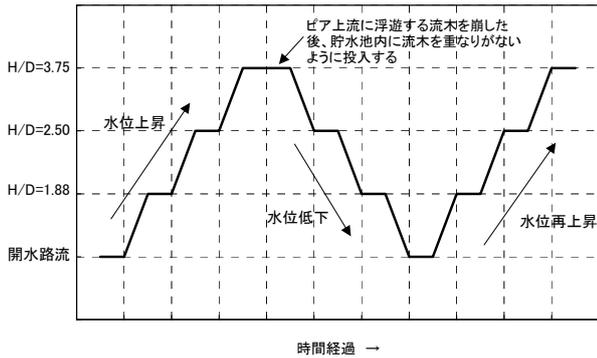


図-3.4 水位変動の概要図

表-3.3 水位変動の実験結果

流木長	1B	1.5B	2B	3B
実験の過程				
H/D=3.75においてピア上流の流木の集積を崩した後の状況	呑口上流水面に流木が滞留	ピア水路水面全域に流木が滞留	ピア水路水面全域に流木が滞留	ピア水路水面全域に流木が滞留
水位低下後	流木は全て流下	流木は固まりとなって呑口を閉塞	流木が呑口上面と底面を支点に引っかかる	流木が呑口上面と底面を支点に引っかかる
水位再上昇後	流木は全て流下	流木は固まりとなって呑口を閉塞	流木が呑口上面と底面を支点に引っかかる	流木が呑口上面と底面を支点に引っかかる

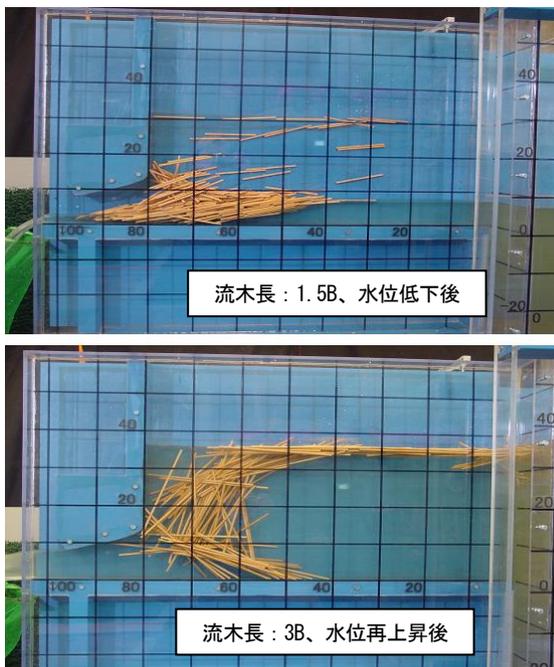


図-3.5 水位変動の実験結果

流の流木を重ねない浮遊状態とした。これは予備実験において流木を重ねない状態で流木が最もピア内へ進入しやすいことを確認しており、危険側の条件を想定したものである。その後の実験過程でピア上流の流木が減る場合は流木を供給し常にピ

ア上流に流木が浮遊している状態を保った。

実験では流木長を変化させて、1B、1.5B、2B、3Bの4ケースについて実験を行った。

実験結果の流況を表-3.3に、流況の例を図-3.5に示す。これより、流木長が1.5B以上の場合には、水位が高い状態でピア内へ進入し滞留している流木が水位低下時に放流設備呑口を閉塞し、再度水位上昇しても閉塞された状態が継続することが確認された。この状況は、放流設備の放流能力に影響を与える可能性がある。ここで詳細は記さないが、2次元水路内部の呑口形状等を変化させて検討しても、これらの閉塞を防ぐことはできなかった。

4. 流木による閉塞対策の検討

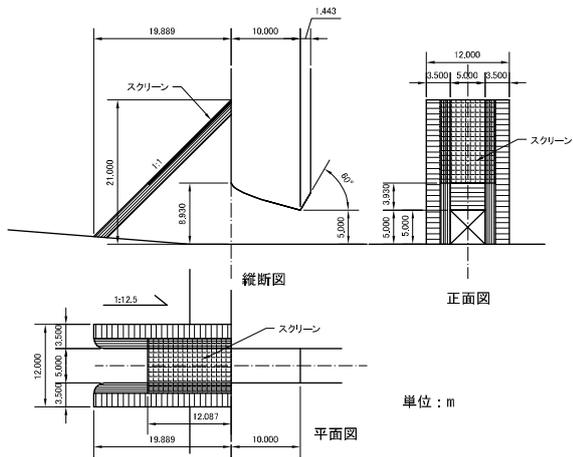
2章及び3章の検討結果より、土砂による閉塞の可能性は小さく、流木については、呑口上流に流木が滞留した状態で水位変動が生じる場合に閉塞の危険性があることが確認された。そこで、流木を呑口上流に滞留させないための対策を検討することとした。

ただし、吐口部断面積が2m×2m以下の小規模な場合には、現行の設計¹⁾において、呑口全体を覆うスクリーンが設置されてきており、以下の検討はある程度大規模な吐口断面を有する場合を想定している。

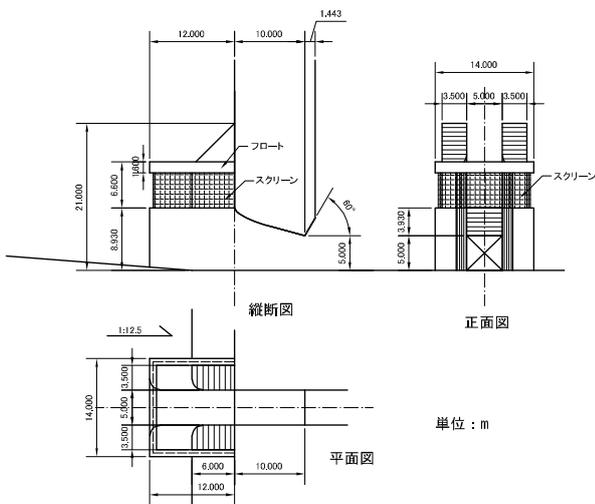
4.1 基本形状の検討

対策検討における方針は次の三つである。①開水路流となる水位以下では進入した流木は放流設備内で引っ掛かることはないため、維持管理の労力軽減を考慮し、これ以下の水位では、流木のピア内への進入を許容する。②放流設備の呑口より下流で流木が閉塞して放流能力に影響を与えないように管路流となる水位以上では、ピア内に流木が進入しないようにする。③その他の要因で放流能力に影響を与えないこと。これらの方針から図-4.1に示す3形状を考案した。

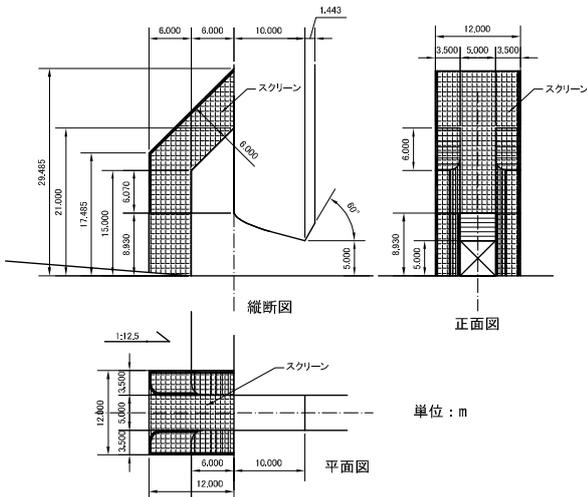
流木対策の効果を検討するために3章の検討結果をふまえて流木閉塞の可能性のある水位変動実験を行った。水位変化は、水位上昇・低下・再上昇とし、流木の投入方法は、最も流木がピア内へ進入しやすい条件とするために、貯水池内に常に流木が重なることなく浮遊している状態を保つように水槽上流端付近より供給を行った。流木長は1.5B、2B、3Bの3ケースとした。実験に用いた水路は幅0.8mで図-3.2に示したものよりやや幅の広い水路を用いた。



a) 形状 1 (傾斜形状ピア)



b) 形状 2 (フロート式スクリーン)



c) 形状 3 (固定式スクリーン)

図-4.1 流木対策案形状

また、治水専用ダムでは完成後の早い段階で放流設備まで堆砂の肩が達すると考えられ、実験においては堆砂がダム地点まで達した状況を想定して放流設備底面標高から勾配 1:12.5 の傾斜を設けた。

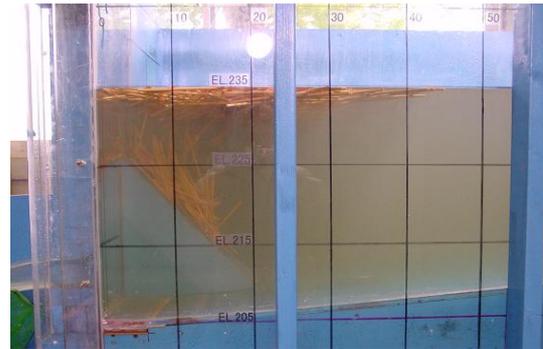


図-4.2 形状 1 の実験結果 (水位上昇後)

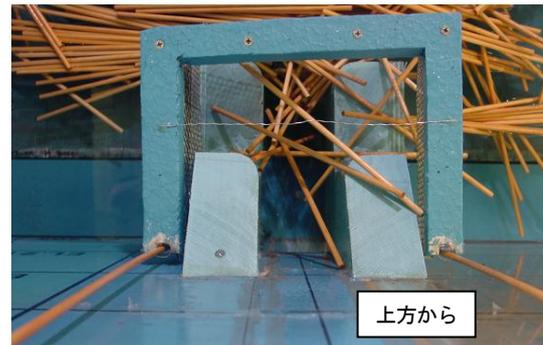


図-4.3 形状 2 の実験結果

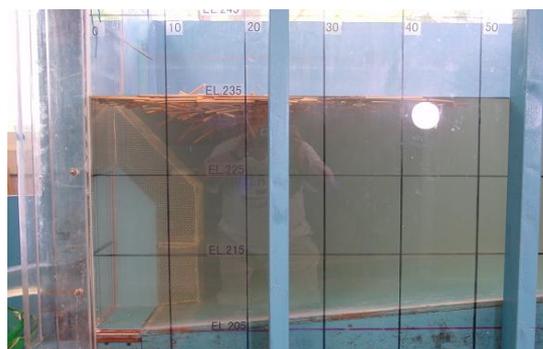


図-4.4 形状 3 の実験結果 (水位上昇後)

形状 1 はピアの上流側を底面まで傾斜させ、流木がピアに沿って上昇・下降しやすくすることをねらった形状である。管路流となる水位以上ではピア内に流木が進入しないようにスクリーンを設置した。水位変動実験を行ったところ、水位上昇するにつれ

て、流木が次々とピア前面に貼り付いていき、その後さらに水位が上昇しても剥がれなかった（図-4.2）。この要因は低標高から順に流木が貼り付いていくことにより、水面付近では常に流速が早くなり流木が押し付けられる力が大きくなったためと考えられる。水位再上昇時にも同様な状況となり、流木長が変化してもほぼ同様な結果となった。

形状2はフロートの付いたスクリーンを、ピアを囲むように設置し、管路流となる水位以上では、水位変化に追従しながら流木がピア内へ進入するを防ぐことを目的とした形状である。開水路流となる水位以下でスクリーンをのせる土台の役割を兼ねるために、ピアを上流へ張り出した形状としている。水位変動実験を実施したところ、水位の上昇に追従してフロート付きスクリーンと流木が上昇した。ただし、フロート下方のピアの前面に流木が貼り付き、水位上昇後も数本の流木が固定された。実験を繰り返すと、貼り付いた流木がピア内へ張り出して固定される場合があり、スクリーン内へ流木が進入したり、スクリーンと張り出したピアの間に挟み込まれたりした（図-4.3）。放流設備は出水時に確実に機能することが重要であり、動作が不安定となる要因を有するこの形状は不適当と判断した。

形状3は固定式スクリーンによって、管路流となる水位以上において流木をスクリーン内へ進入させないことを目的とした形状である。形状1の結果をふまえて、流木が貼り付きにくくするため、スクリーンの表面積を大きくして、スクリーンにおける流速を遅くすることをねらった。水位変動実験を行ったところ、流木はスクリーンの上流で水位の変化に追従し、水位上昇後はスクリーンに貼り付いている流木はほとんど無かった（図-4.4）。また、スクリーン内に流木が進入する状況も見られなかった。よって、形状3は当初目的としていた条件を満たしている。

形状3のスクリーンはかなり大規模な構造となるため、経済性の観点から、規模の縮小が可能か検討を行った。試行錯誤的に水理模型によって形状検討を行った結果、図-4.5 に示すような形状が得られた。この形状では、土砂の流下を考慮して放流設備底面標高から 3m の高さまではコンクリート製のピアとした。また、高さ方向と幅方向にスクリーン規模の縮小を行った。水位変動実験では水位上昇後に数本の流木がスクリーンに貼り付く場合があったが、放流能力への影響は小さいと考えてこの形状を基本

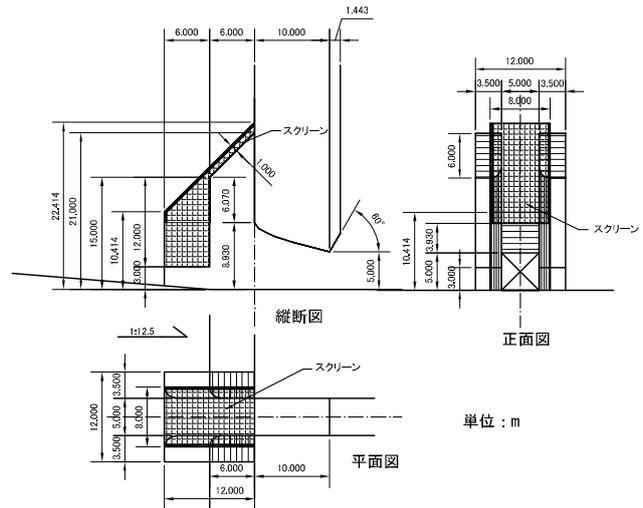


図-4.5 流木対策形状（固定式スクリーン改良後）

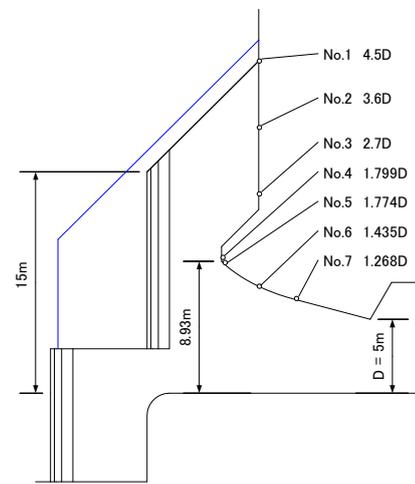


図-4.6 圧力測定位置

に次節の詳細な検討を行った。

4.2 固定式スクリーンの検討

前節より固定式スクリーン形式が有効であることがわかった。そこで、内外水位差 3m 程度を想定してスクリーンの桁構造等を再現した模型を製作し流況の確認実験とスクリーンの設計に必要な内外水圧差の把握のために放流管内とダム上流面の圧力測定を行った。圧力の測定位置を図-4.6 に示す。なお測点は放流設備の中心位置としており、マンメータによって測定を行った。流木の投入方法及び水位変動については、前節と同様の条件とした。投入する流木については、より実際と近い条件を想定して長さが 0.5B~3B までの流木を同一本数混合し、小規模な流木による目詰まり等の影響を確認するために、長さ 0.3B の流木模型も数百本程度投入した。

さらに、流木の密度が大きい場合の条件を設定した。流木模型を水につけて水分を吸収させることに

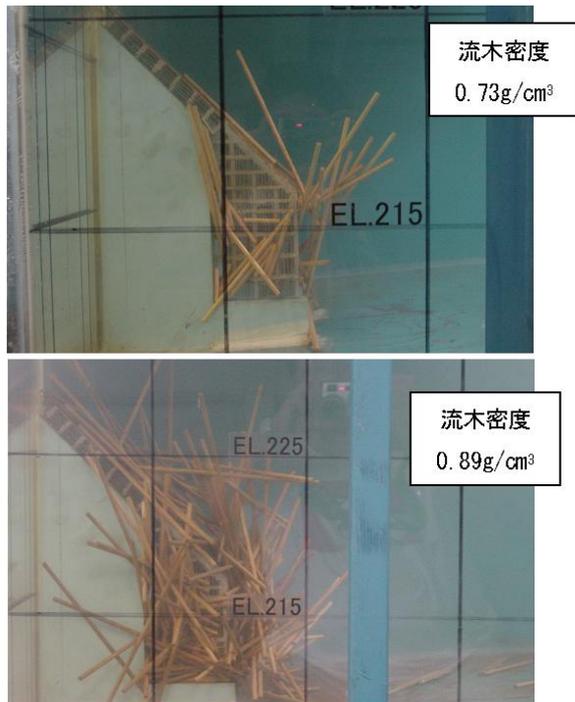


図-4.7 固定式スクリーン形状の水位変動実験結果
(水位再上昇後)

より、平均的な密度を 0.89g/cm^3 とした模型を用いた。密度については大きいほど浮力が小さくなりスクリーンへの貼り付きが顕著になると考えられる。ただし、密度が 1g/cm^3 以上となった場合は、流木は底面付近を流下すると考えられ、その場合は、ダム建設時の仮締め切り堤等を利用してスリット式砂防ダムの様な流木堰き止め構造物を設置することにより大量の流木がダムまで到達することを防ぐことができると考えられる。

水位変動実験を行った結果、流木密度が 0.73g/cm^3 の場合は、水位上昇後に数十本程度の流木がスクリーンに貼り付いた。貼り付いた流木は比較的長いものが多い。水位再上昇後も同様な状況であった(図-4.7参照)。流木密度が 0.89g/cm^3 の場合は、 0.73g/cm^3 の場合より多く数百本程度の流木が貼り付く結果となった。ただし、スクリーン全体を完全に覆う状況には至らなかった(図-4.7)。どちらの実験においても、スクリーン内の呑口上流まで進入して滞留する流木はなく、呑口下流の放流管内で流木が固定されることはなかった。

図-4.8にH/Dが4.5と9.0の場合について、流木がない場合とある場合の貯水位と圧力水頭の測定結果の差を原型値で示す。これより、ベルマウス付近より下流のNo.1~4の測点については、圧力水頭がかなり下がっている。全測点の傾向として流木が

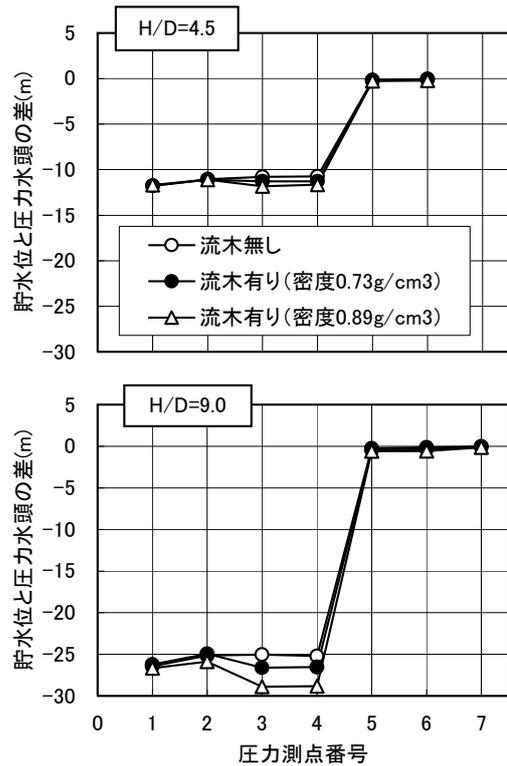


図-4.8 貯水位と圧力水頭の差

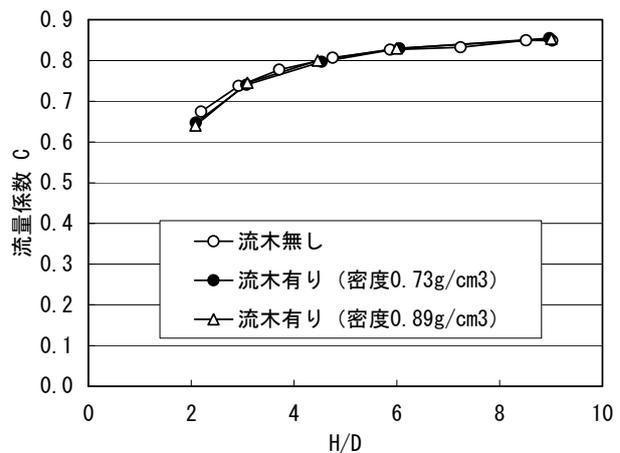


図-4.9 H/Dと流量係数Cの関係(水位再上昇時)

無い場合と流木密度 0.89g/cm^3 の場合の差が大きい。ベルマウス付近のNo.3とNo.4の測点の差が大きくH/D=9.0の場合で、4m程度の差が生じている。流木の貼り付きによってベルマウス付近の流線が影響を受けているものと考えられる。一方、ピア内のダム堤体上流面のNo.5~7については貯水位との差は小さく最大でも0.6m程度で、スクリーンの内外水位差は小さい。

図-4.9に水位変動実験の水位再上昇時のH/Dと流量係数の関係を示す。流量係数は次式より求めた。

$$Q = CBD\sqrt{2gH} \quad (4.1)$$

ここで、 Q ：流量(m^3/s)、 C ：流量係数、 g ：重力加速度(m/s^2)を表す。流量係数の値は流木の有り無しにかかわらずほぼ同様な値を示しており、流木のスクリーンへの貼り付きによる放流能力への影響は小さい。

以上より、図-4.5 に示した固定式スクリーンにより、放流能力に影響を与えないで放流管を閉塞する可能性のあるピア内への流木の進入を防ぐことができることが確認された。

4.3 スクリーンの内外水位差の検討

流木対策として、固定式スクリーンを採用した場合には、スクリーンの構造設計のために内外水位差を設定する必要がある。実際に発生する流木については、大規模出水時の発生量の推定が困難であること、形状等についても枝や根があったり、密度の大小があったりと様々な要素が考えられるため、流木流下実験で全ての条件を考慮した検討は困難である。そこで、実際の流木を用いて、その流水抵抗を把握し、スクリーンに大量の流木が貼り付いた条件を想定し損失水頭（水位差）を算定することで、スクリーンの安全性を確保するために必要な内外水位差の条件を設定することとした。

4.3.1 原型流木抵抗実験方法

実験方法としては、図-4.10 に示す鋼製水路の途中に、長さ2m、幅1.5m、高さ1.2mの領域に流木を

ランダムに設置し、一定流量の通水を行った。流木は、熊本県に位置し熊本県が管理する市房ダムにおいて出水時に発生したものを運搬して用いた。水理条件としては、流量を約500 L/secとし、上流水深を3ケース(1.00m、0.85m、0.70m)変化させた。流木の設置条件としては、空隙率をパラメータに5ケース(空隙率：0.680、0.719、0.757、0.832、1.000)設定した。設置した流木は1本毎に長さ、直径を測定しており、設置状況の空隙率を計算した。測定項目は上下流の水面形である。

4.3.2 原型流木抵抗実験結果

実験結果の水面形を図-4.11に、水頭差等の水理量を表-4.1に示す。なお、このとき、上流側の水理量は、断面-0.2~2.0mまでの平均値から算出し、下流側の水理量は断面3.5mの値から算出した。

実験結果より、単位流木層厚当たりの損失が流木中の速度水頭に比例すると考えて、以下の式で流木の抵抗を評価する。

$$\Delta H_L = f_{dwl} \cdot L \cdot \frac{V_{mid}^2}{2g} \quad (4.2)$$

ここで、 ΔH_L ：流木上下流の全水頭の差（損失水頭）(m)、 f_{dwl} ：損失係数(1/m)、 L ：流木層厚（実験では流木設置長2m）(m)、 V_{mid} ：断面平均流速(m/s)（断面積は、上流水深と下流水深の平均値より算出する）を表す。

上式により実験結果から損失係数を算定した結果

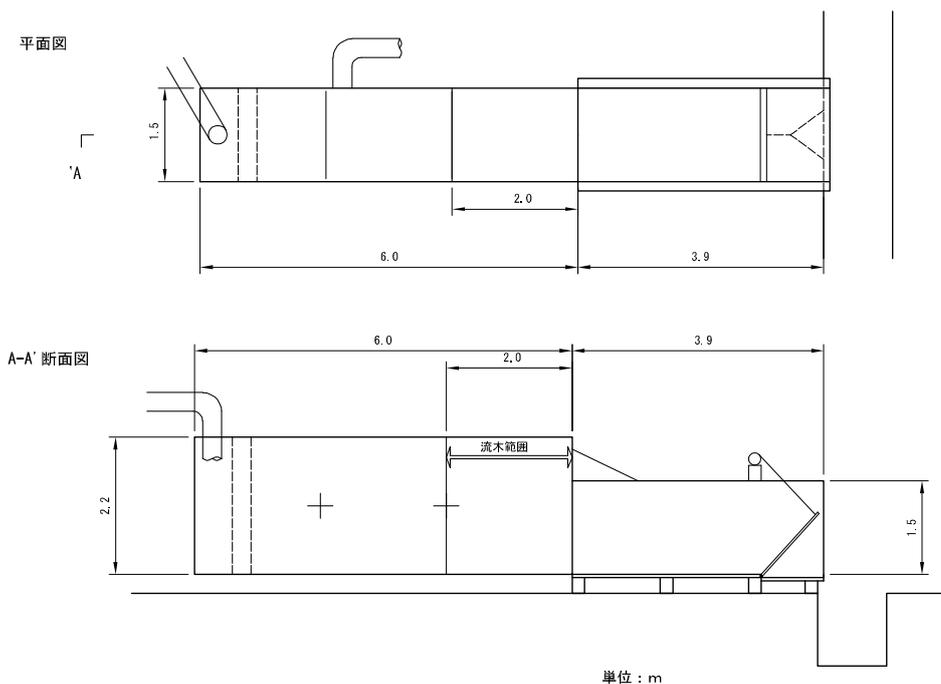


図-4.10 実験水路概要

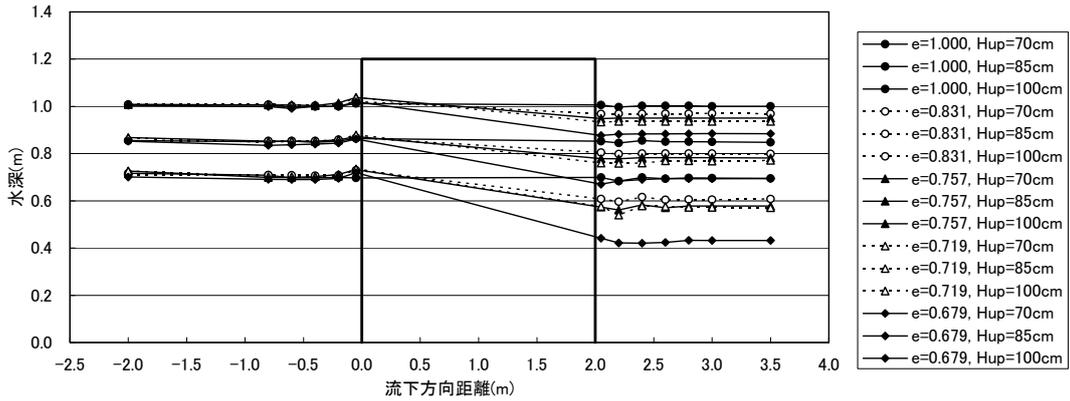


図-4.11 実験結果の水面形

表-4.1 実験結果の水理量

実験ケース	e: 流木設置空隙率 (-)	Q: 流量 (m ³ /s)	hup: 水深 (上流) (m)	Vup: 平均流速 (上流) (m/s)	Frup: フールド数 (上流) (-)	Hup: 全水頭 (上流) (m)	hdown: 水深 (下流) (m)	Vdown: 平均流速 (下流) (m/s)	Frdown: フールド数 (下流) (-)	Hdown: 全水頭 (下流) (m)	ΔHL: 損失水頭 (m)
case1-1	1.000	0.4989	0.704	0.473	0.180	0.715	0.695	0.479	0.183	0.707	0.008
case1-2	1.000	0.5007	0.852	0.392	0.136	0.860	0.848	0.394	0.137	0.856	0.004
case1-3	1.000	0.4999	1.002	0.333	0.106	1.008	1.001	0.333	0.106	1.007	0.001
case2-1	0.832	0.5010	0.708	0.471	0.179	0.720	0.608	0.549	0.225	0.623	0.096
case2-2	0.832	0.5008	0.855	0.390	0.135	0.863	0.799	0.418	0.149	0.808	0.055
case2-3	0.832	0.4997	1.005	0.332	0.106	1.010	0.969	0.344	0.112	0.975	0.035
case3-1	0.757	0.4990	0.708	0.470	0.179	0.719	0.578	0.576	0.242	0.595	0.124
case3-2	0.757	0.5000	0.856	0.389	0.134	0.864	0.782	0.426	0.154	0.791	0.073
case3-3	0.757	0.5007	1.008	0.331	0.105	1.013	0.950	0.351	0.115	0.956	0.057
case4-1	0.719	0.4999	0.708	0.471	0.179	0.719	0.571	0.584	0.247	0.588	0.131
case4-2	0.719	0.4997	0.855	0.390	0.135	0.863	0.771	0.432	0.157	0.781	0.082
case4-3	0.719	0.4993	1.007	0.331	0.105	1.013	0.936	0.356	0.117	0.942	0.070
case5-1	0.680	0.4997	0.693	0.480	0.184	0.705	0.432	0.771	0.375	0.462	0.243
case5-2	0.680	0.4997	0.842	0.396	0.138	0.850	0.694	0.480	0.184	0.706	0.144
case5-3	0.680	0.4997	0.999	0.333	0.107	1.005	0.884	0.377	0.128	0.891	0.113

注1: 上流の値は断面-2m~-0.2mまで値の平均から求めた。
注2: 下流の値は断面3.5mの値から求めた。

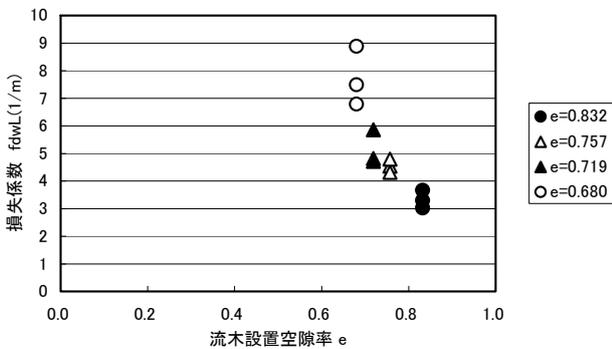


図-4.12 流木設置空隙率と損失係数の関係

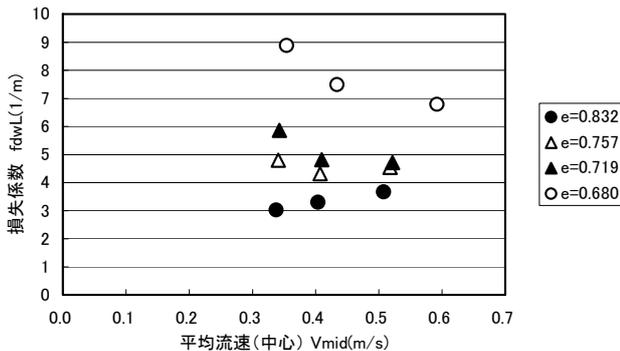


図-4.13 平均流速と損失係数の関係

を、図-4.12、図-4.13に示す。これより、流木設置空隙率が小さいほど、損失係数は大きくなっている。また、同じ空隙率では、空隙率の値が大きいと、流速が大きいかほど損失係数が大きくなり、逆に空隙率の値が小さいと流速が大きいかほど損失係数が小さくなっている。

4.3.3 流木集積による内外水位差の設定方法

(4.2)式により、流木が集積した場合の単位層厚当たりの損失を求められるので、スクリーンに大量の流木が集積している状況を想定し、流木塊をスクリーンからの距離で層状に分割し、それぞれの層の損失を足し合わせることで全体の損失を算定することとする。

このとき、用いる損失係数としては、安全側を考慮して、図-4.13中の空隙率が最も小さく、流速が最も大きいケースを参考に、

$$f_{dwL} = 7 \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (4.3)$$

とする。また、流木塊の分割層厚は実験条件の2mとする。図-4.14に単純な直方体形状スクリーンの場合について流木塊分割のイメージを示す。図中で

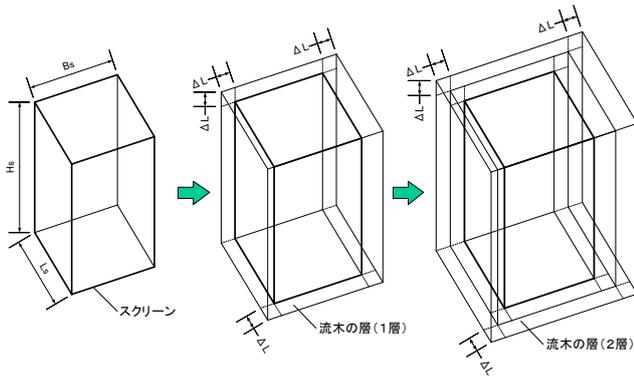


図-4.14 流木塊分割のイメージ

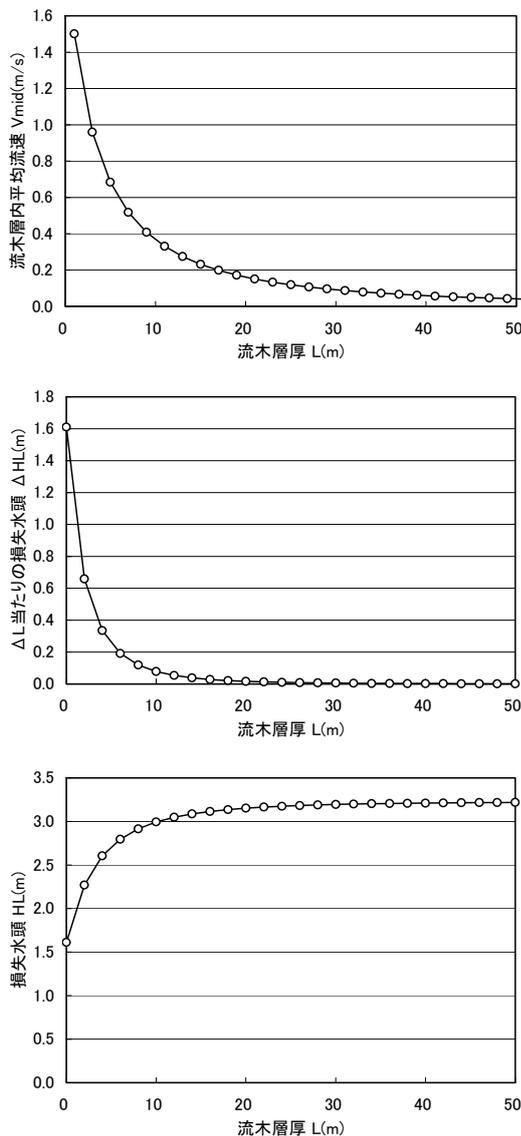


図-4.15 算定例における流木層厚と流速及び損失水頭の関係

は2層までを示しているが、設計においては、この後、同様に層を増やして損失を算定する。

損失算定の一例を示す。条件としては、最大放流

量を $850\text{m}^3/\text{s}$ とし、スクリーン形状は図-4.5 とする。この場合、スクリーンの表面積（開口部の面積を含む）を算定すると、 413.465m^2 となる。このスクリーンへの流木の集積が層厚 2m ずつ増加した場合の損失水頭を計算した結果を図-4.15 に示す。ここで、各流木層内の流速は内側の表面積と外側の表面積の平均値から算出している。これより、流木層厚が 20m を超えると損失水頭の増加量は小さくなり、層厚 50m での損失水頭を算定すると約 3.24m となる。

5. まとめ

治水専用ダムのゲートのない洪水調節用放流設備の土砂及び流木による閉塞について、条件は限定されたものであるが、閉塞の条件とその対策について以下の知見が得られた。

- 1) ゲートのない放流設備において、下流水位及び掃流力と閉塞することなく流下可能な流砂量の関係が得られた。
- 2) 戸溝のない大断面の1面ベルマウスの放流設備では、開水路流の状態において流木によって閉塞することはない。
- 3) 流木閉塞対策を行わない場合、流木が呑口上流に集積した状態で水位の変動が生じると放流設備の閉塞が生じる可能性がある。
- 4) 流木閉塞対策として、前面下方をオープンにした固定式のスクリーンが、確実性、放流能力の維持及び維持管理の面から有利である。
- 5) 今回提案したスクリーン形状により、出水時に大量の流木が流下する状況を想定した実験において、放流能力を維持できることが確認できた。
- 6) スクリーンの構造設計に必要な内外水位差の設定方法を提案した。

参考文献

- 1) 社団法人 ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準（案）、p. 554、1999
- 2) 櫻井寿之・柏井条介：河床付近に設置されたダム放流管内の土砂の堆積、第31回土木学会関東支部技術研究発表会、II-064、2004. 3
- 3) 櫻井寿之・柏井条介：治水専用ダム放流設備入口部の流木対策、水工学論文集、第50巻、pp. 1261-1266、2006. 2

【英文要旨】

STUDY ON DESIGN METHOD OF SPILLWAY FOR SINGLE PURPOSE FLOOD CONTROL DAM

Recently, single purpose dams for flood control come to be spotlighted. On this type of dams, outlet facilities installed near the level of river bed is expected to work both as a sediment outlet and a fish way. However, blocking inlets by floating logs and sediment discharge are considerable, clarifying blocking conditions and developing measures against blocking are required. In this study, we focused the partial pipe-flow type outlet facilities for flood control. We investigated blocking conditions of inlets and preventing methods against floating logs or sediment discharge to clarify these phenomena. Moreover, we presented design methods of outlet facilities for flood control free from blocking by floating logs and sediment discharge.

Key words: single purpose flood control dam, outlet facilities for flood control, measures against sedimentation, floating logs, prevention method for blocking, screen