## 流水型ダムの土砂移動に関する水理模型実験

Hydraulic model experiment of sediment transportation at a dry dam

北見工業大学大学院工学研究科土木開発工学専攻	学生	員木村	す 祐輔	(Yusuke Kimura)
北見工業大学教授工学部社会環境工学科	正会	員渡邊	▋ 康玄	(Yasuharu Watanabe)
北見工業大学大学院工学研究科土木開発工学専攻	学生	員福岡	🛯 将太	(Shota Hukuoka)

#### 1. はじめに

近年,日本全国で局所的集中豪雨や台風の強大化等によ る大規模洪水の発生が増加傾向にある.洪水被害を軽減す るために、ダムによる治水対策が考えられる.しかしなが ら、多目的ダムは、上流からの土砂の遮断によるダム下流 の河床低下や海岸浸食の進行、貯水池内での濁水による水 質環境の悪化<sup>1)</sup>等の問題や環境影響評価法の制定等の環 境問題の顕在化によって、環境への影響が大きいとされ、 建設計画・施工が困難な状況になってきている.

そこで,洪水を軽減するために環境への影響が少ないとされる治水専用流水型ダムの機能が見直され,注目されている.島根県益田市益田川ダム図-1<sup>2)</sup>をはじめとして全国でも現在施工・計画中の流水型ダムが増加している.

流水型ダムとは河床とほぼ同じ高さに開口部があり,平水時では水を貯めない.そのため,多目的ダムとは違い,貯水地内での水質変化や景観変化がないことから水環境への影響が少ないと言われている.洪水時において大規模流量が流れてきた場合,一定量を放流し,残りを貯水し,洪水減水期に徐々に下流へ放流する.そのため,下流域での被害を軽減できる.また自然調節方式のダムのためゲート管理や人為的な誤解を回避することができる<sup>3)</sup>.

さらに,高度経済成長期以後に建設された多目的ダムは運 用を開始してから十数年が経過しており, 土砂堆砂が問題 となっている.一方、流水型ダムでは常時貯水しないため、 多目的ダムでの問題点である土砂堆積が少ないと言われ ている.このように、目的を治水に絞った場合、流水型ダム は自然環境や維持管理の面で従来のダムに比べ優位とさ れている.しかしながら、流水型ダムにおける土砂移動は 十分解明されているとは言えない.過去の室内実験水路を 用いた均一粒径(平均粒径 d<sub>m</sub>=0.765mm, 東北硅砂 4 号) での流水型ダム模型実験<sup>4)</sup>から、ダム直上流まで堆積して きた土砂を、河床底面にある開口部での吸出しにより、ダ ム下流へ土砂が徐々に排出されることが確認された.この ことから、実河川において流水型ダム下流域でのアーマリ ングや河床低下を防ぐことができると考えられる.更に、 今後重要視されるダムの土砂管理の観点から、土砂排砂に 掛かるコストを低減できると考えられる.本研究では、-歩進め混合粒径を用いた1次元及び平面2次元での水理 実験を行い、土砂堆積の程度を定量的に明らかすることを 目的とした.

#### 2. 実験概要

### (1) 実験条件

1次元実験水路は、水路長14m、水路幅0.07mの直線水路に、混合硅砂(平均粒径: $d_m$ =0.9334mm、東北硅砂3号、4号、5号、6号、8号を均等に配合したもの)をそれぞれ高さ10cmで均一に水路に敷き詰め、初期河床とした.



図-1 島根県益田市益田川ダム(下流側)



図-2 河床材料粒径加積曲線

河床勾配は 1/100 とし, 全て移動床とした. 河床材料の粒 径加積曲線を図-2 に示す. 尚, 実験で使用する流水型ダム 模型は, 開口部 (高さ 2cm ×幅 2.5cm) とし, 実験水路上 流より 12 m地点に流水型ダム模型を設置した. 尚, 現地 模型実験データ<sup>4)</sup>よりフルード相似則及び流砂量相似則 による実際に存在しうる水理条件を再現している. また, 水路側面は土砂の挙動を把握できるように透明のエンビ 板で作成している. 平面 2 次元実験水路は, 水路長 12 m, 水路幅を 0.3m の直線水路に, 混合硅砂を高さ 10cm で均 ーに敷き詰めた. 尚, 河床勾配は 1/50 とした. 流水型ダム 模型は (開口部 2 × 2.5cm), 実験水路上流より 11m 地点 に設置し, ダム上流は移動床, ダム下流は固定床とした.

#### (2) 測定項目

上流端では動的平衡状態を保つために給砂区間を 0.5m とし給砂を行い, 給砂量を時系列で測定した. 下流端では 想定の流量が通水されているかを把握するために流量測 定, また, 流れてきた土砂を測定し, それを流砂量とした. 土砂の堆積の程度や位置, 時間的変化を特定するために水 路側面から写真撮影を行った. また, レーザー砂面計を使



図—3 ハイドログラフ

用し、通水前と通水後に河床高を測定するとともに、通水 中には水位の測定をそれぞれ行った。尚、計測間隔は、1 次元実験では縦断方向に0.5 m間隔、平面2次元実験では 縦断方向に0.15m、横断方向に0.01m間隔で計測した。ま た、通水終了後に堆積した土砂を1次元実験では各地点1 か所ごとに、平面2次元実験では各地点横断方向に右岸、 中央、左岸の3カ所ごとにふるい分析を行った<sup>6)</sup>.

#### (3) 通水条件

実験は、以下に示すような流量条件を変化させた 6 つのケースを設定した.Case1:流量は洪水時を再現 した流量(Q=337.7cm<sup>3</sup>/s)を定流状態で通水したも の、Case2:平水時を再現した流量 (Q=142.5cm<sup>3</sup>/s) を 定流状態で通水したもの、Case3:Case1 での洪水時を 再現した流量(Q=337.7cm<sup>3</sup>/s)を最大流量、平水時 流量 (Q=142.5cm<sup>3</sup>/s) を最小流量とした非定流状態 で通水したもの,Case4:Case1 での洪水時を再現した 流量を 1.5 倍した値 (Q=506.5cm<sup>3</sup>/s)を最大流量, 平水時流量 (Q=142.5cm<sup>3</sup>/s) を最小流量とした非定 流状態で通水したもの、Case5:洪水時を再現した流量 (Q=270.0cm<sup>3</sup>/s)を定流状態で通水したもの,Case6:平水 時流量 (Q=102.0cm<sup>3</sup>/s) を通水した後,Case5 での洪水時 流量 (Q=270.0cm<sup>3</sup>/s) を最大流量とした洪水波形を2度 通水したもの. 初期河床について,Case1 及び2は河床勾 配を1/100,Case5 は河床勾配を1/50 にし、砂を敷き詰め たもの、Case3 及び4は、平水時を再現した流量を一定流 で通水した後の河床形状とした. すなわち、Case3 及び 4 は、洪水流を波形で通水した場合の河床変化を確認するた め、Case2 実験の通水終了時河床を用いている.Case6 は、 初期河床を河床勾配1/50なるように砂を敷き詰め、その 後,平水時流量を通水した,この平水時流量通水後河床を 用い.Case6 ハイドロを1度通水し、その河床から2度目 のハイドロ通水を行った.実験は、ダム開口部を塞ぎ一定 の水位まで堰き上げさせ、その後開口部を開いた.この時 刻を通水開始0分としている. Case1, Case2は、給砂量と 流砂量が一定になり、河床の変動が見られなくなった時 を河床が平衡状態になったと判断し、通水を終了とした. Case3, Case4, Case6は、図-3のハイドログラフに従い2 時間通水させ、終了とした. Case3, Case4, Case6 で用いた





ハイドログラフは,以下の式<sup>7)</sup>より算出した.

$$Q = \sqrt{b^2 h^3 g i \left[6 + 2.5 ln\left(\frac{h}{2.5d}\right)\right]^2} \tag{1}$$

$$h = \left[\frac{\zeta(t+\alpha)^2}{t^2+\beta} - \gamma\right]^{\frac{3}{2}}$$
(2)

ここでは,b:川幅,i:河床勾配,h:無次元等流水深,t:無次元時 間とする.

条件:
$$\frac{\partial h}{\partial t} = 0(t = 0.2)$$
 (3)

条件:
$$h = \frac{h_{max}}{h_{min}}(t=0.2)$$
 (4)

条件:
$$h = 1(t = 0)$$
 (5)

条件:
$$h = 1(t = 1)$$
 (6)

以上の 4 つの条件を用いて,式  $(2)\alpha,\beta,\zeta,\gamma$  を算出した. 最 後に (1) 式にhを代入しハイドログラフを作成した.

Case1	ダム上流1m地点 Dm=0.8124		ダム上流3m地点 Dm=0.7712		ダム上流5m地点 Dm=0.5298		ダム上流7m地点 Dm=0.5515	
Case2	ダム上流1m地点 Dm=0.8645		ダム上流3m地点 Dm=1.023		ダム上流5m地点 Dm=1.146		ダム上流7m地点 Dm=0.5745	
Case3	ダム上流1m地点 Dm=0.8196		ダム上流3m地点 Dm=0.8240		ダム上流5m地点 Dm=0.6716		ダム上流7m地点 Dm=0.6605	
Case4	ダム上流1n Dm=0.88	ī地点 104	ダム上流3m地点 Dm=0.7369		ダム上流5m地点 Dm=0.9884		ダム上流7m地点 Dm=0.7297	
	ダム上流1m地点				ダム上流3m地点			
	左岸	中	央	右岸	左岸	- 中5		右岸
Case5	Dm=1.188	Dm=(	.8849	Dm=0.8467	Dm=0.8575	Dm=(	0.7045	Dm=0.7426
	ダム上流5m地点				ダム上流7m地点			
	左岸	中	央	右岸	左岸			右岸
	Dm=0.5501	Dm=0	.6592	Dm=1.259	Dm=1.229	Dm=	1.167	Dm=0.7528
								単位:mm

図-5 各ケースごとの平均粒径

#### 3. 実験結果と考察

各ケースごとのダム上流各地点における堆積土砂平均 粒径を図-5に示す。

1次元での実験結果

各ケースごとの均一粒径河床及び混合粒径河床のグラフを図-4に示す.図-5より、ダムに近い方が堆積した土砂が粗い傾向にある.

#### a) 洪水時を想定した場合(Case1)

通水方法は,まず,ダムに 0.05cm 堰き上げさせた後,ダ ム開口部を開くことより行った.土砂の挙動を把握する ために,堆砂が収束するまでに 960 分通水した.詳細な堆 砂課程を以下に述べる,通水開始 30 分に流水型ダム模型 より上流 3.0 m地点に堆砂が目視で確認できた.これより 流下方向に向かい徐々に土砂堆積が進行した.通水開始 後 450 分に堆砂肩が流水型ダム模型開口部直上流に到達 し,吸出されるように土砂がダム下流へ排出された.この ため,流砂量が急激に増加した.ダム下流へ吸い出された 土砂には時間的な粒径の違いはあるが,全体での粒径の変 化はないものと考える.土砂が堆積する課程は,均一粒径 での実験結果<sup>1)</sup>とほぼ同様であると考えられる.堆砂にお いて,通水初期は粒径の粗いものが堆積し,その後粒径の 細かいものが堆積した.

#### b) 平水時を想定した場合(Case2)

Case1 と同様にダムに 0.02cm 堰き上げさせた後,開口 部を開き通水開始とした.Case2 では,土砂移動が平衡状 態になるまで 1200 分の通水を要した. 堆砂過程は,Case1 と同様であるが,流量が少ない分堆砂量が少ないことが確 認された.Case2 では,流水型ダム模型開口部が開水路状 態になる流量を通水しているが,土砂が堆砂することが確 認された.





c) 洪水流を想定した場合(Case3)

洪水流を図-3 に従い2時間通水した.流量が増加する とともに水位が増加し,ダム上流2.5m 地点に土砂が堆積 する.増水期の間は徐々に下流方向へ堆砂が進行する.ピー ク流量を過ぎ,流量減少期とともに水位が低下し,堆積し た土砂が洗掘されながら下流方向へ流下する.やがてダ ム直上流へ到達すると,少量ずつ土砂が排出された.図-4 より,わずかな土砂堆積が確認できる.これは,増水期に 堆積した土砂が減水期にダム下流へ排出されずに残った ものだと考えられる.

#### d) 洪水流を想定した場合(Case4)

図-3 に従い2時間通水した. 堆砂過程は Case3 と同様 であるがピーク流量が大きいことから流量増水期におい ての堆砂量が多いことを確認した. また, 図-4 に示すよう に Case3 に比べ, 通水終了時により多くの土砂が残り堆 積している.

#### (2) 均一粒径との比較

ここでは、均一粒径と混合粒径との土砂堆積の違いにつ いて比較することとする.Case1及び2では、均一粒径の実 験と混合粒径の実験との間で河床高には大きな違いが見 られない.このことは、水理量が同一であり、平均粒径を概 ね一致させたことによるものであると考えられる.Case3 及び4では、均一粒径実験より混合粒径実験の方がわずか に堆積量が増加している.これは、混合硅砂により粒径の 粗細に差が出たため、粒径の粗いものが残され堆積したの だと考えられる.

#### (3) 平面 2 次元での実験結果

各ケースごとの河床高コンターを、図-6 に示す. 但 し、(1):初期河床、(2):洪水時流量(Q=270.0cm<sup>3</sup>/s)を定流 状態で通水した場合(Case5)の通水後河床、(3):平水時流 量(Q=102.0cm<sup>3</sup>/s)を定流状態で通水した場合の通水後 河床、(4):(3)河床を初期河床とし、Case6の洪水波形を通水 した場合の通水後河床、(5):(4)河床を初期河床とし、Case6 の洪水波形を通水した場合の通水後河床とする. Case5 実験における砂量の変化を図-7 に示す. 図-5 より、ダム 上流 1m 地点付近において左岸での平均粒径が粗くなっ ている、これは、中央から右岸にかけて流路が形成され、左 岸に粗い土砂が堆積し砂州を形成しているためである.



図-7 Case5 実験での砂量変化

a) 洪水時を想定した場合 (Case5)

通水開始10分にダム上流3.5m 地点右岸に堆砂を確認 することができた.通水開始とともに流れが蛇行し,交互 砂州を形成した.やがて下流方向へ砂州を形成しながら土 砂が堆積した.通水開始400分にダム直上流に左岸側か ら堆砂が到達した.これよりダム直上流において左岸から 右岸へ堆砂が進行し,やがてダム直上流全体に土砂が堆 積し,ダム開口部吸出しにより下流へと土砂が流下する. 図-7より,通水開始400分に堆砂が到達し,流砂量が増 加する.これより,流砂量の増減が激しくなっているが,こ れは堆砂が左岸から右岸に堆積しながら移動することが 原因であると考える.図-6より,上流部において交互砂州 の形成が,下流端付近においては,水没した蛇行流路が確 認できた,

b) 洪水流を想定した場合(Case6)

Case6 実験では、まず、平水時流量を 900 分通水した. ダ ム上流 2m から 8m まで交互砂州が形成された. その後、 平水時通水河床から洪水流を波形で通水した場合の変化 を検討するため、Case6 のハイドログラフを用いて 2 度通 水した. 1 回目の通水では、ダム上流 1m から 4m に土砂 が堆積した. 平水時通水河床と比較すると、堆砂が下流方 向へ進行していることが確認できる. これは、流量増加期 にダム上流 4m 地点において堆砂したものが、流量減水期 に下流へ流れ堆積したものであると考える. 2 回目の通水 では、1 回目での堆砂がより下流へ進んでいること、更に、 堆砂量が増加していることが確認できた. ダム上流 0.5m から 3m 地点で洪水減水期において水みち形成を目視で 確認できた.

#### 4. おわりに

本研究での1次元混合砂実験及び平面2次元混合砂実 験において以下の知見が得られた.

- 1次元混合砂実験において均一粒径と混合粒径とも に土砂堆積の課程はほぼ同様であることが確認できた.更に、定流状態で通水した場合、均一粒径、混合粒 径の違いによる河床高変化は見られないことを確認 することができた.
- 平面2次元実験において Case5 実験では、通水開始 とともに上流から中流域へ交互砂州が形成された、交

互砂州を形成しながら下流方向へ堆砂し,下流域(ダ ム直上流付近)において蛇行流路が形成された.

- 1次元混合砂実験において堆積した土砂のふるい分け分析を行った結果、ダムに近いほど粗い粒径が堆積していたことが確認できたが、実河川において既存するダムは、ダムに近いほど細かい粒径が堆積している<sup>1)</sup>.これは、水路上流で流掃された細粒分がそのままダム下流へ吸い出されたものと考えられる.
- 平面2次元混合砂実験において堆積した土砂の分析 結果,水路上流の細粒分が流掃され中流域に堆積した.中流域での水みちにより粗粒分と細粒分ともに 下流へ流下し堆積した.

# 参考文献

- 1) 芦田和男, 江頭進治, 中川一: 21 世紀の河川学, 京都大学学 術出版会,2008.
- 2) 島根県公式ウェブサイト:益田川ダム全景写 真,http://www.pref.shimane.lg.jp/.
- 3) 押川英夫,今村友彦,小松利光:治水専用穴あきダムの河道 内遊水池としての洪水制御効果に関する研究,水工学論文 集,2011.
- 木村祐輔,渡邊康玄:流水型ダムの土砂移動特性,土木学会 全国大会,2010.
- 5) 谷瀬敦, 独立行政法人, 寒地土木研究所:流水型ダム実験概 要及び結果,2009.
- 6) 社団法人 地盤学会 土質試験 基本と手引き,2001.
- 7) 益本孝彦,渡邊康玄:洪水減水期における水みちの形成,水 工学論文集,2011.