

流水型ダムの土砂移動に関する実験的研究

Experimental Study on Sediment Transport Characteristics of Dry Dam

渡邊康玄¹・木村祐輔²・吉川泰弘³・早川博⁴

Yasuharu WATANABE, Yusuke KIMURA, Yasuhiro YOSHIKAWA and Hiroshi HAYAKAWA

¹ 正会員 博(工) 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

² 工修 八戸市役所 都市整備部都市政策課 (〒031-8686 八戸市内丸一丁目 1-1)

³ 正会員 博(工) 北見工業大学助教 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

⁴ 正会員 博(工) 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

Since there is little influence on natural environment and flood regulation function is high, many dry dams have been planned in recent years. However, the characteristic of sediment transport in a dry dam is not sufficiently understood. The purpose of this research is to obtain the basic data for conducting hydraulic model experiments and grasping the sediment transport characteristics of a dry dam. As a result of the experiments, a sediment is flushed from the dam at the early rising stage and falling stage, and it was shown that the particle size distribution changes in time. Moreover, it was suggested that the flushing mechanisms of sediment from the dam differ in an early rising stage and falling stage. It becomes clear that a meandering talweg is formed at the just upstream of the dam. It is considered that this talweg has an important function for the sediment transport.

Key Words: *dry dam, sediment transport, flood control, hydraulic experiment*

1. はじめに

流域の治水安全度向上および発電や各種用水確保のために、ダムが建設されてきた。これらのダムの建設目的は十分に発揮され、流域の発展に貢献してきた。一方で、貯水池内への堆砂に伴う下流河道の河床低下等河道管理の問題、下流河道の流況の変化に伴う生物の生息環境の変化や生物の移動阻害といった自然環境への影響が指摘され、新規のダム建設が困難な状況になっている。近年、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り、流域の治水安全度の早急な向上が求められている。以上の背景を踏まえ、洪水被害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^{1),2),3)}。

流水型ダムは、河床とほぼ同じ高さに開口部を持ち、普段の流量はそのまま下流へ流下させ平時では水を貯めない。また、出水時に開口部から流出させることのできる流量よりも多い流入があった場合、ダム上流部に貯留して洪水調節を行う。このように一般のダムとは違い常時貯水していないことから、貯水池内での水質変化や景観変化がないことや平常時の土砂や生物の移動を阻害しないため、水環境への影響が少ないとも言われている。また、出水初期および出水減水期には、河川水とともに土砂も下流へ流下させることから、近年社会問題となっているダムの土砂堆砂による物質輸送の不連続性を緩和する効果も期待されている。こ

のような利点から、現在完成している島根県の益田川ダムをはじめとして、施工・計画中の流水型ダムが増加している。なお、1950年代には農地防災ダムとして、このタイプのダムは多数建設されてきている。

しかしながら流水型ダムにおける土砂移動は、流入流量と放流流量が時間的に一致しないととも掃流力がダム地点で不連続になるなど、極めて複雑な機構を有しており十分解明されているとは言えない状況にある。このような中、目ら⁴⁾は、農地防災ダムにおいてSS等の観測を行っている。また、角ら⁵⁾は、益田川ダムにおける粗粒土砂に着目し、彼らが開発したICタグシステムを利用しその動態を観測している。一方、村田・木村ら⁶⁾は、流水型ダムの水理特性と流砂の挙動を解明するために、1次元非定常計算モデルおよび3次元計算モデルの開発を行い、検討を行っている。しかしながら、上流から貯水池に流入しダムから流出されるまでの、様々な形態によって輸送される土砂移動特性は貯水池内での堆積や洗掘機構を含め明確になっておらず、これらの解明が必要不可欠な状況となっている。本研究は、流水型ダムの土砂移動特性を把握する第一歩として、限られた条件ではあるが土砂移動特性を定量的に明らかにすることを目的として水理模型実験を実施し、その結果を報告するものである。

2. 1次元水理模型実験

後述する平面2次元水理模型実験を実施するに当たり、流水型ダムにおける基礎的な土砂の縦断方向の挙

動を把握するため、1次元水理模型実験を行った。

(1) 実験概要

1次元実験に用いた水路は、図-1に示す長さ14m、幅0.07mの直線水路である。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12m地点に設置した。東北珪砂3号、4号、5号、6号および8号を均等に配合した混合珪砂(平均粒径 $d_m=0.93\text{mm}$)を、水路床から高さ10cmで勾配が1/100になるよう均一に水路に敷き詰め、河床を形成した。なお、流水型ダムの開口部底面の高さは、この時の河床高に一致させている。河床材料の粒径加積曲線を図-2に示す。

水理条件は、実際に計画中の流水型ダムの諸元⁷⁾を基に、フルード相似則および掃流力相似則を用いて実験水路にあわせた条件とし、4ケース設定している。具体的には、Case1:出水時を想定した流量($Q=337.7\text{cm}^3/\text{s}$)を定流状態で通水したもの、Case2:平常時を想定した流量($Q=142.5\text{cm}^3/\text{s}$)を定流状態で通水したもの、Case3:出水時を想定した流量($Q=337.7\text{cm}^3/\text{s}$)を最大流量とし平常時流量($Q=142.5\text{cm}^3/\text{s}$)を最小流量とした流量波形で通水したもの、Case4:出水時を想定した流量を1.5倍した値($Q=506.5\text{cm}^3/\text{s}$)を最大流量とし平常時流量($Q=142.5\text{cm}^3/\text{s}$)を最小流量とした流量波形で通水したものである。一定流量を通水したCase1および2の初期河床は勾配1/100に設定した河床としているが、流量を時間的に変化させたCase3および4は、出水時における平常時からの河床の変化を把握する目的で実施するため、平常時流量($Q=142.5\text{cm}^3/\text{s}$)で平衡河床となるまで通水したものを初期河床としている。なお、Case3および4のハイドロ継続時間は、実現象として継続時間が24時間に相当する出水を縮尺に合わせて、2時間としている。また、上流端で土砂移動に関して動的平衡状態を保つため、全てのケースで給砂区間を縦断方向に0.5m設け、給砂区間の下流端における河床高が左右両側壁に描いた初期河床高位置から変化しないように、通水中継続して目視により手動で給砂を行っている。

各ケースに用いた流量ハイドログラフを図-3に示す。一定流量を通水したCase1および2では、初期設定の河床から河床高が平衡に達し、給砂量と排砂量が一致するまで通水している。また、通水初期の急激な土砂移動を避けできる限り定常状態での実験を行うため、通水に際してはダム開口部を塞いであらかじめ測定した定常状態での湛水位まで堰上げさせた後、開口部を解放して通水を開始している。なお、あらかじめ測定した定常状態でのダム地点の湛水深は、Case1および2でそれぞれ5cmおよび2cmである。

各実験では、通水中の土砂動態を把握するため、水路の上流端での給砂量と下流端での排砂量ならびに堆砂肩の位置を時系列で測定するとともに、一定流量条件での実験では所定の流量が流下しているかを把握するため、下流端で流量の測定も行っている。また通水終

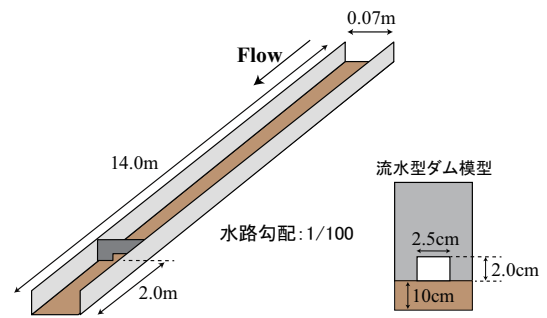


図-1 1次元実験に用いられた水路の概要

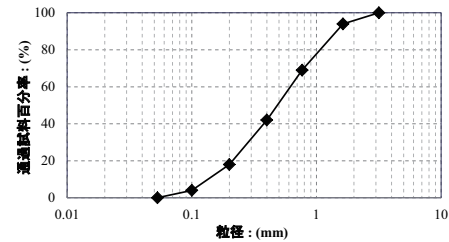


図-2 水理実験に用いられた河床材料の粒径分布

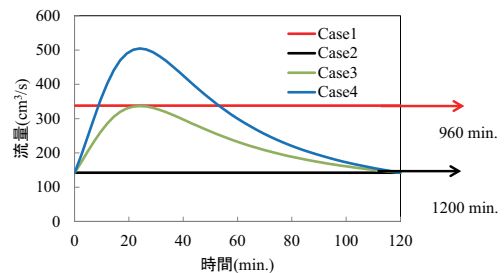


図-3 1次元水理実験に用いられた流量の時間変化

了後には、縦断方向に0.5m間隔で水路中央の河床高の測定を行うとともに、河床材料のふるい分析を実施している。河床材料の採取は、縦断方向に1m間隔で初期河床から堆積した部分のみを採取している。

(2) 実験結果

Case1および2の通水時間は、それぞれ給砂量と排砂量がほぼ一致し、河床の変動がほぼなくなった960分および1200分である。各ケースの堆砂状況を、図-4に示すとともに以下に列挙する。

a) Case1: $Q=337.7\text{cm}^3/\text{s}$

通水開始30分に流水型ダム模型より上流3.0m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分には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。堆砂肩下流への土砂の堆積は、通水初期には粒径の粗いものが堆積し、その後河床勾配の減少に伴って粒径の細かいものへ移行した。

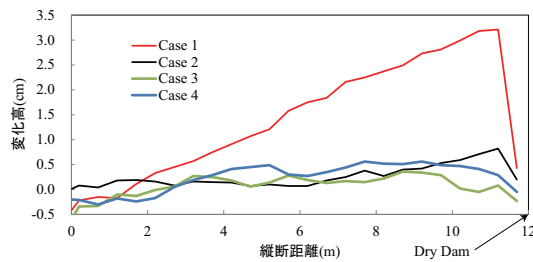


図-4 1次元実験結果（通水前後の河床高の変化縦断面図）

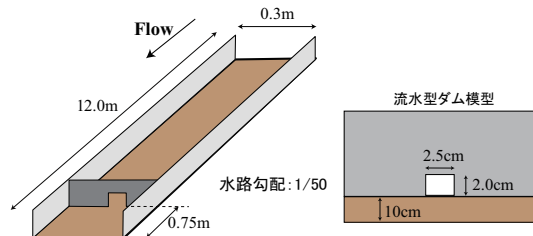


図-5 2次元実験に用いられた水路の概要

b) Case2 : $Q=142.5\text{cm}^3/\text{s}$

ダム開口部が開水路状態になる流量を通水しているが、水路幅7cmに対してダム開口幅が2.5cmであるため、若干ではあるがダム上流部で水面が堰上げられている。このことから、ダム上流部に堆砂が生じた。堆砂の経過は、Case1とほぼ同様であるが、流量が少ない分堆砂量も少ない。

c) Case3 : $Q=142.5\text{cm}^3/\text{s} \Rightarrow Q=337.7\text{cm}^3/\text{s}$

通水開始時には平水時を想定した流量の通水によりダム近傍に堆砂肩が形成されているが、流量が増加するとともに水位が増加し、ダム上流2.5m地点に新たな堆砂肩が形成され始める。増水期の間は徐々に下流方向へ堆砂肩が進行する。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も堆砂肩は下流方向へ移動する。やがてダム直上流へ到達すると、少量ずつ土砂がダム下流部へ排出された。通水前後での河床高に大きな変化はなく、通水中に供給された土砂量とダムからの排出土砂量がほぼ等しい結果を得た。

d) Case4 : $Q=142.5\text{cm}^3/\text{s} \Rightarrow Q=506.5\text{cm}^3/\text{s}$

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ける堆砂量が多い。このため、通水中にダムから排出された土砂量よりも供給された土砂の方が多く、通水前の河床高より通水後の河床高の方が高い結果となった。

以上より、1次元的な現象として考えると、河床が平常時における平衡状態に達した後は、流水型ダムはある程度の規模の出水までは上流からの土砂をほぼ全量排出することが可能であるが、ある閾値を超えた出水ではダム上流に土砂を堆積させる。なお、河床材料の粒径については、Case1および3において、上流から下流に向かって粗粒化の傾向がみられたものの、その

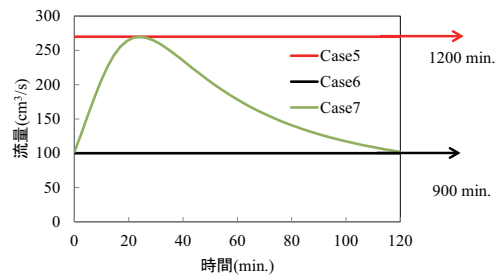


図-6 2次元水理実験に用いられた流量の時間変化

他の特徴的な粒径の変化は確認できなかった。

3. 2次元水理模型実験

一般のダムのように堆砂肩が貯水池内に形成され時間とともにその堆砂肩がダム直上流まで進行していく現象や、洪水を模した実験での増水期と減水期で土砂移動機構が大きく異なる等、1次元水理実験で縦断的な土砂移動の概要が把握できたことからその結果を利用し、ダム上流への流水の貯留効果が高いとともに横断方向の変化も明確に存在し、より実際の土砂の挙動に近いと考えられる、平面2次元の水理実験を行うこととした。2次元実験では、縦断方向の土砂移動に加えて横断方向の変化に着目することとする。

(1) 実験概要

平面2次元実験に用いた水路は、図-5に示す長さ12m、幅0.30mの直線水路である。流水型ダム模型は、1次元水理実験と同様に開口部（高さ2cm×幅2.5cm）とし、実験水路の上流端より11.25m地点に設置した。水路幅は、ダム開口幅2.5cmに対し、1次元実験では7cmであったものを30cmとし、土砂移動に関して横断方向の変化が把握できるようにしている。河床材料は1次元水理実験と同様のものを使用し、水路床から10cmの厚さで1/50の勾配に敷均し河床とした。なお、流水型ダムの開口部底面の高さは、この時の河床高に一致させている。

水理条件は、1次元水理模型実験の結果を参考に、次の3ケースを設定した。Case5：出水時を想定した流量（ $Q=270.0\text{cm}^3/\text{s}$ ）を定流状態で通水したもの、Case6：平常時を想定した流量（ $Q=102.0\text{cm}^3/\text{s}$ ）を定流状態で通水したもの、Case7：出水時を想定した流量（ $Q=270.0\text{cm}^3/\text{s}$ ）を最大流量とし平常時流量（ $Q=142.5\text{cm}^3/\text{s}$ ）を最小流量とした流量波形で土砂がダム下流へ排出されるまで7回繰り返し通水したものである。なおCase5および6の通水開始にあたっては、1次元実験のCase1および2と同様にダム開口部を塞いで湛水させた後通水を開始している。またCase7では、1次元実験のCase3および4と同様に、初期設定河床から平常時を想定した流量で河床高が平衡に達するまで通水した時点を通水開始としている。各ケースに用いた流量ハイドログラフを図-6に示す。上流端では1

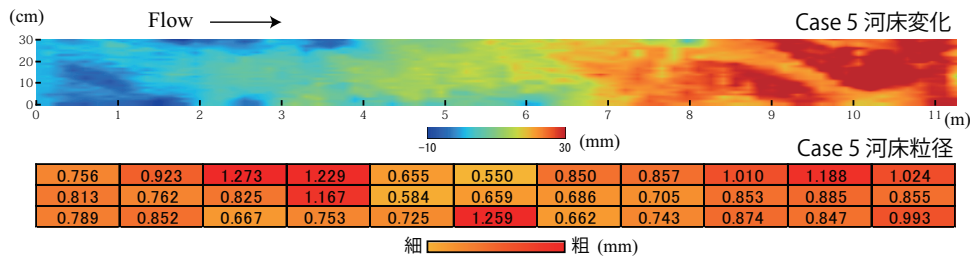


図-7 Case5 における通水後河床変化コンターと堆積河床材料の平均粒径分布

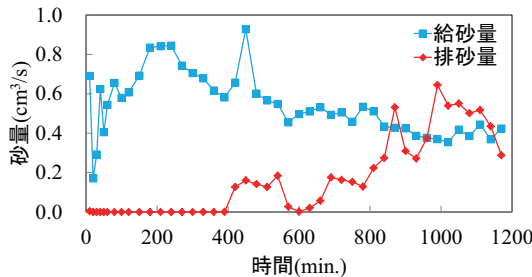


図-8 Case5 における給砂量と排砂量の時系列変化

次元実験と同様の手法で給砂を行っている。

通水中の測定項目は、1次元実験と同様、給砂量、排砂量、堆砂肩の位置ならびに下流端における流量である。また通水終了後には、縦断方向に0.15m、横断方向に0.01m間隔で河床高の測定を行うとともに、河床材料のふるい分析を実施している。河床材料の採取は、縦断方向に1m間隔、横断方向に左右岸及び水路中央の3か所で初期河床から堆積した部分のみを採取している。

(2) 実験結果

Case5 および6の通水時間は、それぞれ給砂量と排砂量がほぼ一致し河床の変動がほぼなくなった1200分および900分である。各ケースの堆砂状況を、以下に列挙する。

a) Case5 : $Q=270\text{cm}^3/\text{s}$

図-7に、Case5の通水後の河床変化量コンターと河床材料の平均粒径の分布図を示す。また、図-8に、給砂量とダムからの排砂量の時系列変化を示す。水路全体において通水開始とともに流れが蛇行し、下流方向へ交互砂州を形成しながら土砂が堆積した。通水開始10分後にはダム上流3.5m地点右岸に堆砂肩を確認することができ、通水開始400分後にダム直上流に左岸側から堆砂肩が到達した。これ以降、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、図-8に示されているように、ダム開口部から土砂が排出されるようになった。この時間以降排砂量の増減が激しくなっているが、これは図-7のコンター図に明瞭に表れているダム直上流の水没した蛇行流路の移動に伴い堆砂が左岸から右岸に移動することが原因である。一方、河床材料については、大局的に見てダムに近いほど粒径が大きくなる傾向がう

かがえるが、蛇行流路では、周囲に比べて小さい傾向が読み取れる。

b) Case6 : $Q=102\text{cm}^3/\text{s}$

ダムによる堰上げの影響が若干存在し、高さ数ミリの堆砂肩がダム上流約1.5m付近に形成され平衡状態に達した。また、ダム上流2mから8mまで波長2m程の交互砂州が形成された。図-9に、Case6の通水後の河床変化量コンターと河床材料の平均粒径の分布図を示す。

c) Case7 : ($Q=142.5\text{cm}^3/\text{s} \Rightarrow Q=506.5\text{cm}^3/\text{s}$) $\times 7$

図-9に、Case7の通水後の河床変化量コンターと河床材料の平均粒径の分布図を示す。初期河床(Case6の河床)から1回目の通水後の変化をみると、流量増加期にダム上流4m地点において一旦堆積したものが、流量減水期に下流へ移動しダム上流4mから1mにかけて堆積するとともに、堆砂肩がダム上流0.7m付近に移動している。また、ダム上流0.7mから3m地点で減水期において水みち形成を目視で確認した。2回目の通水では、1回目の堆砂がより下流へ進み、堆砂量が増加している。減水期での水みちもより明確に確認された。これ以降通水を重ねるごとに、堆積肩の前進と堆砂量の増加および水みちの明確化が見られ、通水5回目の通水終了時点で堆砂肩がダム直上流へと到達した。このため、これ以降6回目と7回目の通水時にダムから土砂の流出が生じた。通水後における河床材料の平均粒径の分布をみると、一定流量で通水したCase5とほぼ同様の傾向を示しているが、水みち部の細粒化は明確ではない。図-10に、通水後の給砂量およびダムからの排砂量の時系列変化を流量時系列変化と合わせて示す。なお、第7回目においても1出水継続時間内の総給砂量と総排砂量とが完全に一致しておらず、完全な平衡状態には達していない。しかし、第6回目の通水後半における傾向と第7回目の通水後半における給排砂の時間変化が同じ傾向を示していることから、流水型ダムにおける土砂の収支の状況は把握可能と判断される。ほぼ平衡状態になったと判断される通水7回目における給排砂量の変化とその時に排砂された砂の粒径分布を示したものが、図-11である。増水期と減水期後半においてダムからの排砂が生じ、減水期前半にはほとんど排砂されていない。また、この時点では、増水期の排砂量は同時刻の給砂量とほぼ同程度にとどまっているのに対し、減水期後半の排砂量は同時刻の給砂量を

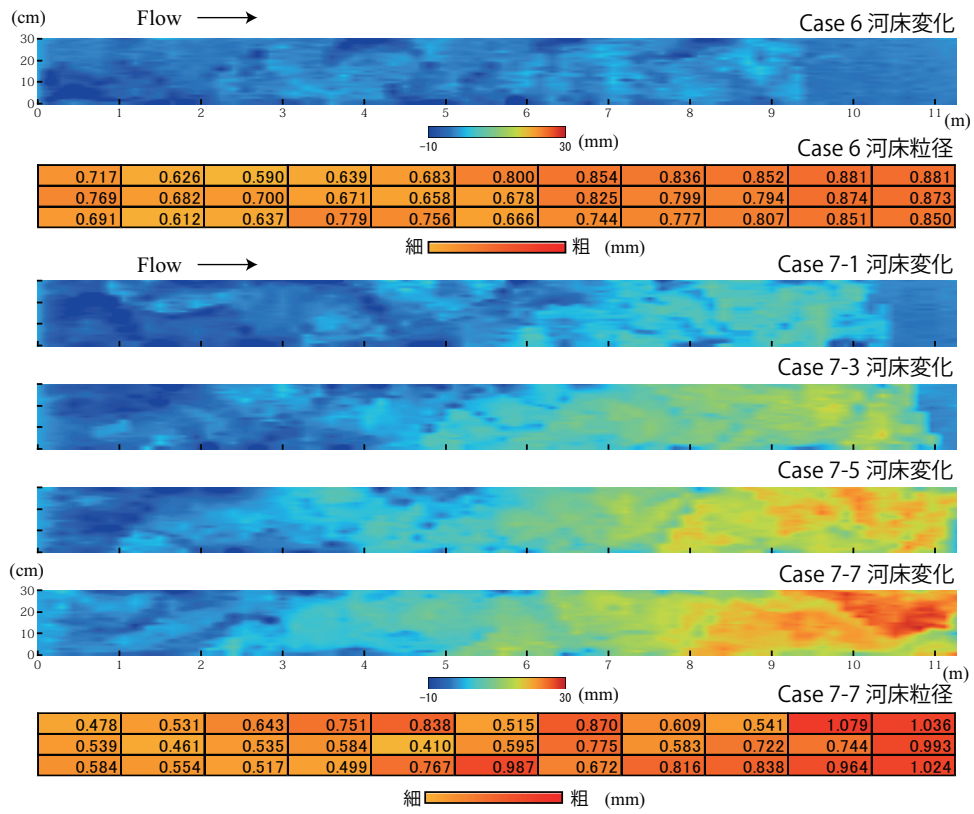


図-9 Case6 および 7 における通水後河床変化コンターと堆積河床材料の平均粒径分布

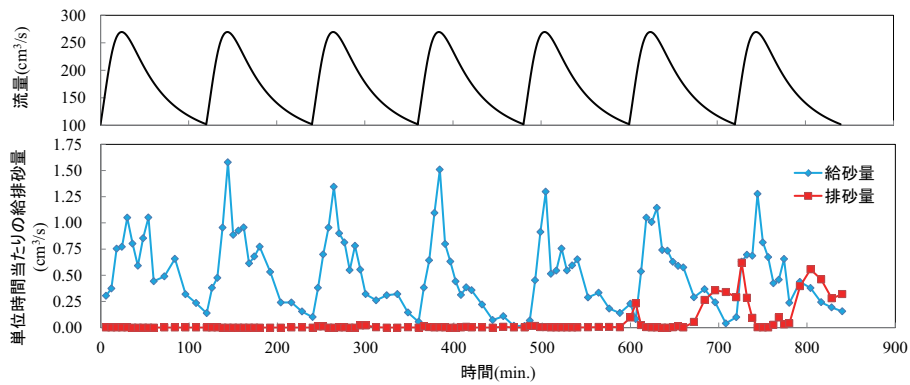


図-10 Case7 における通水後の給砂量およびダムからの排砂量の時系列変化

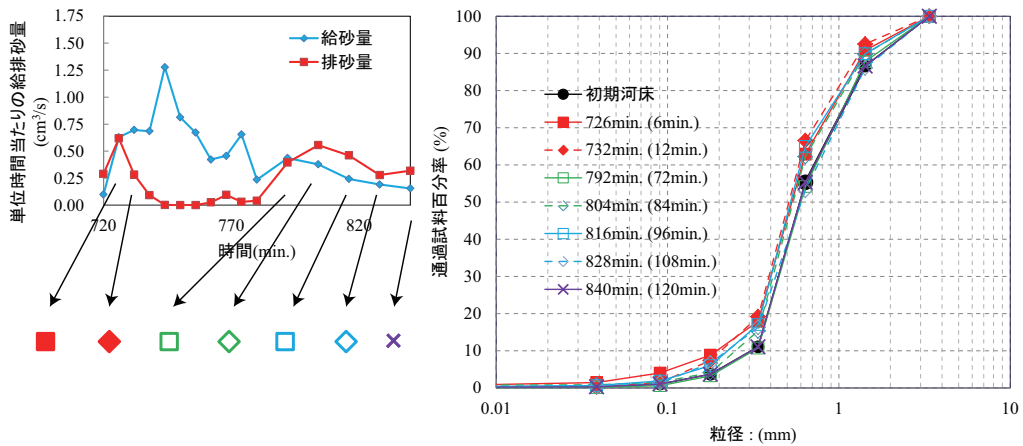


図-11 Case7 通水 7 回目における給砂量および排砂量の時系列変化と粒径分布の変化

上回る結果となっている。排出された砂の粒径分布を見ると、増水期は細粒分が多く、減水期は初期河床の粒径分布あるいは増水期の粒度分布と初期河床の粒度分布との中間的な分布を示している。

(3) 通水中の砂粒の移動特性

流水の貯留効果が高い2次元水理模型実験結果から、ダム上流域において河床が粗粒化すること、蛇行した水みちで周囲よりも細粒化すること、さらにはダムから排出される砂の粒径分布が出水中に変化することが明確に示された。このことから、出水中の土砂移動を規定する移動限界粒径の変化を把握することとする。ダム近傍での流れは3次元性が強く、また貯水池下流端における水みちの形成機構についても現状では十分理解されておらず今後さらに詳細な検討が必要であることから、ここでは縦断的な土砂の挙動のみに着目して、移動限界粒径の算出に当たっては、計算の容易さから1次元不定流計算を用いることとした。計算にあたっては、Case7の最終的な河床形状を与えている。計算結果を図-12に示す。ダムから0.75m地点および1.05m地点の値の変化より、ダムから1m上流付近までは、ダムによる堰上げの影響で砂粒子が移動できない時間帯が存在することがわかる。この時間帯は、ダムに近づくほど長い。また、全ての粒径の砂が移動しない時間帯の前後では、周囲と比較して粒径の大きい砂が移動できる時間帯が存在する。この時間帯の出現時間をみると、増水期にはダムに近い地点において早く、減水期にはダムより離れた地点において早い。一方それ以外では、堰上げの影響が及んでおらず出水に合わせて移動可能粒径が変化している。

この結果を踏まえて全体的な土砂の移動をみると、出水ピーク付近では、ダム近傍では土砂の移動はないが比較的粗な砂が上流からダム近傍へ運ばれる。増水期及び減水後期にはダムから土砂が排出される機構があり、ダム近傍では粗粒化が進む。また、ダムから排出される土砂について、増水期ではダム近傍に堆積していたものであり、減水期では上流から徐々に移動してきたものとなる。このように増水期と減水期の排砂機構の違いにより、粒度分布が変化したものと考えられる。なお、ダムの極近傍や水みちの影響等については、今後の課題である。

4. おわりに

実験および考察により把握された、流水型ダムの土砂移動特性について列挙すると以下ようになる。

- ・土砂は減水期に下流へ移動し、堆砂肩を前進させる。
- ・堆砂肩は、左右に振れる水みちにより前進する。
- ・堆砂肩がダム直上流に到達後、減水期に排砂される。
- ・ピーク時に湛水域中流部に堆積し、平均粒径がやや小さくなる。

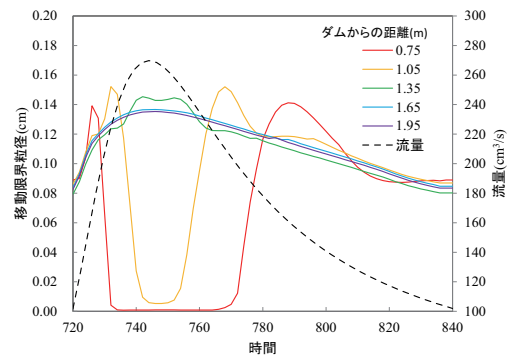


図-12 Case7 通水7回目における移動限界粒径

- ・ダム直上流及び湛水域上流部では、粒径の大きいものが取り残される。
- ・蛇行した水みちは、減水期における細かい粒径の排砂路となっている。
- ・増水期と減水期では、排砂機構が異なる。

なお、今回の実験では限られた水理量を扱っており、現象の複雑さから、さらに検討を進める必要があると考えられる。今後は、貯水池の堆砂現象において重要である浮遊砂が卓越する場合や、貯水効果がより大きく流入のハイドロと放流のハイドロの時間差が大きい条件での実験等が必要となる。また、ダム近傍の蛇行した水みちは土砂移動にとって極めて重要であり、その機能や形成機構については今後の課題である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、国土交通省実用化公募「山間遊水池としての洪水調節専用（流水型）ダムの高機能化に関する研究（代表：小松利光）の助成を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 天野邦彦：DRY DAM が持つ自然環境への影響特性，ダム技術 No.264, pp.3-14, 2008.
- 2) 角哲也：オーストリアにおける流水型ダム，ダム技術 No.277, pp.1-13, 2009.
- 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，土木学会論文集 B1 Vol.67, No.4, I - 667-I - 672, 2011.
- 4) 目晋一，竹内博輝，青嶋大悟，齊藤明郎：洪水調節専用ダム（流水型ダム）の土砂流出特性に関する調査，ダム工学 No.73, pp.29-40, 2009.
- 5) 角哲也，石田裕哉，佐竹宜憲：IC タグを用いた流水型ダム貯水池内における土砂移動特性の把握，土木学会論文集 B1 Vol.68, No.4, I - 1171-I - 1176, 2012.
- 6) 村田雄輝，木村一郎，清水康行，山口里実：穴あきダム周辺の水理特性と堆砂機構に関する数値解析的研究，土木学会論文集 B1 Vol.68, No.4, I - 877-I - 882, 2012.
- 7) 谷瀬敦：流水型ダム実験概要及び結果，寒地土木研究所報告書，2009.

(2012.9.30 受付)