

◆ 報 文 ◆

シートとパイプを用いた排砂装置

櫻井寿之* 柏井条介** 久保康夫***

1. はじめに

ダム貯水池を持続的に利用するため、また貯水池下流の土砂環境改善のために貯水池内の堆砂を排出して下流河川に供給する技術の開発が求められている。対象とする土砂量が数十万 m^3 /年以上となるような多い場合には、土砂フラッシングや土砂バイパスといった設備が採用されているが、土砂フラッシングは貯水位を低下させることが必要であり、土砂バイパスは大規模な施設が必要となる。このため、これら手法の適用条件は、かなり制約を受けるものと思われる¹⁾。より広い貯水池条件に適用可能な方法としてダムを通過する流れのエネルギーを利用した吸引システムが考えられている。本報告はその一方法として考案したシートとパイプを用いた排砂装置について、水理模型実験により得られた基礎的な知見を報告する。この装置は水底部の堆砂面上に設置することが特徴であり、①貯水池運用の変更が不要、②放流量に対する供給土砂量の制御精度が高い、③設備規模が小さく経済的、となることを目標として検討を実施した。

2. 排砂装置の概要

排砂装置はパイプ、シート及び流量調節施設から構成される(図-1参照)。パイプの貯水池内の部分は、排砂中の堆砂形状の変化に追従できるような柔軟性を有するものとする。また、パイプの上流側は、土砂を吸引するため底面を切り欠いた形状とする。設置、維持管理及び回収を行いやすくするために、パイプは堆砂の上に設置する。ここで、パイプを堆砂上に置いただけでは、切り欠きの最下流部に窪みができた時点で周囲の土砂への掃流力は小さくなり、水のみが吸引され、土砂の排出ができなくなる。そこで、パイプに水密シートを設置し、放流時のパイプの内外水圧差を利用してパイプを堆砂面に張り付かせるとともに、パイプの周囲からの水の進入を防止する構造とした。

運用方法については、今後、詳細の検討が必要であるが、非洪水時に堆砂を堤体付近まで輸送しておき、洪水時に、放流量に見合った土砂量を本排砂装置で排出することを想定している。

3. 実験方法

排砂装置の水理特性を水理模型実験により検討した。実験設備の概要を図-2、にパイプの形状を

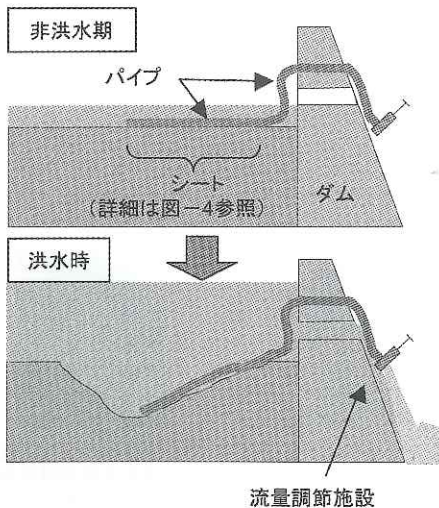


図-1 排砂装置概要

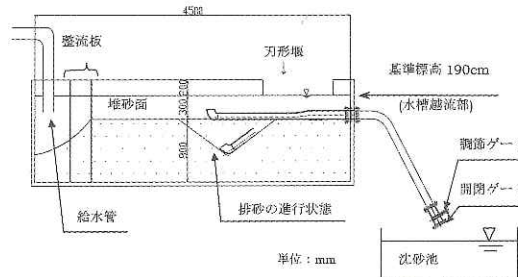


図-2 水理模型概要 (全体)

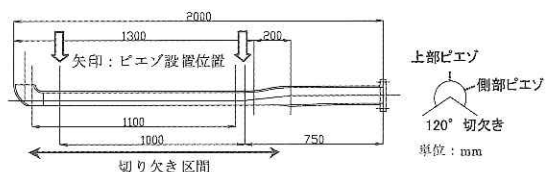


図-3 水理模型概要 (パイプ)

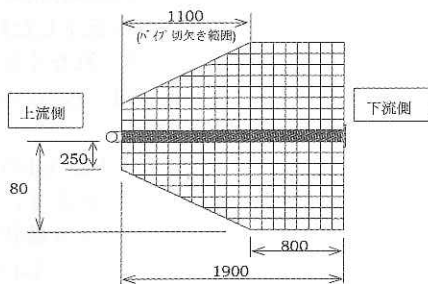
表-1 実験ケース及び実験結果

ケース	シートとパイプの形状	堆砂材料	平均流量 (L/s)	断面平均流速 (m/s) (排砂路内)	平均流砂量 (空隙無し) (L/s)	排砂時間 (min)	総排砂量 (空隙無し) (m ³)
ケース A-1	形状1	細砂	4.21	0.65	0.0266	170	0.42
ケース A-2			5.29	0.81	0.0865	45	0.31
ケース A-3			6.08	0.93	0.2628	30	0.44
ケース A-4			8.37	1.28	0.8107	7	0.34
ケース B-1	形状2	粗砂	4.30	0.66	0.0035	150	0.03
ケース B-2			5.11	0.78	0.0158	145	0.09
ケース B-3			6.67	1.02	0.0986	30	0.23
ケース C	形状1	粘性土	7.80	1.20	—	90	—

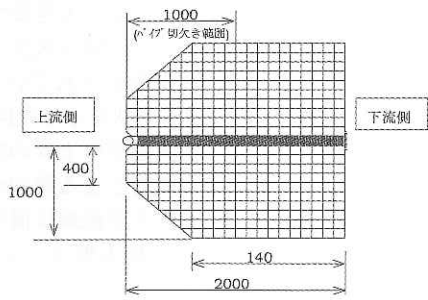
注：堆砂材料の砂については一様粒径の珪砂を用いており、平均粒径は細砂：0.3mm、粗砂：1.3mmである。

注：平均流量は、初期の流量増加時期を除いた計測値の平均値。

注：平均流砂量は、計測値の平均値、総排砂量は沈砂池の土砂を計測した値。



a) 形状1



b) 形状2

単位：mm

図-4 シート形状 (平面図)

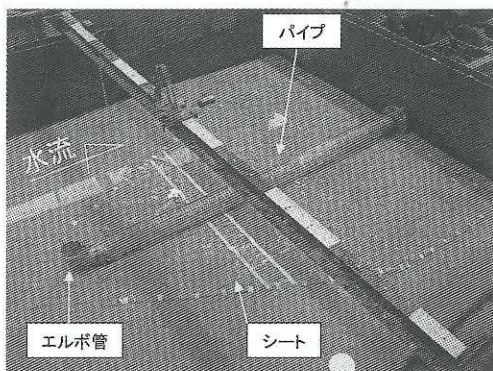


写真-1 排砂装置設置状況

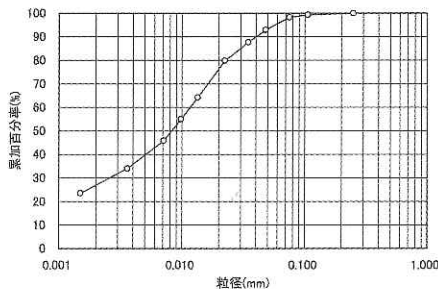


図-5 粘性土 (美和ダム底泥) の粒度分布例

図-3に、シートの形状を図-4に示す。長さ4.5m、幅2.5m、高さ1.3mの水槽に土砂を0.8mの高さで設置し、その上にパイプとシートを設置した。パイプ模型は上流部の底面に120°の切欠きを設けた塩化ビニル管(内径101.6mm)を使用し、排砂進行時の流入口の埋没を防ぐため、貯水池側に突き出るエルボ管を先端に設置した。シートは当初長方形の単純形状にて実験を実施したが、排砂進行時に堆砂面への追従がスムーズとなるように、図-4のような台形を採用した。なお、実験ケースにより土砂材料の透水性を考慮し形状を変化させている。また水槽内でのシートの安定を図るた

め周囲にチェーンを設置している。実験開始前の装置の設置状況を写真-1に示す。

排砂実験はポンプを用いて給水管から水槽へ一定流量を給水し、水槽に設けた四角堰から越流させることにより水位をある程度一定に保ちながら行った。調節ゲートにより排砂装置の流量を調節可能とし、実験開始時は開閉ゲートを瞬時に全開することにより所定の開度を得ている。

実験ケースを表-1に示す。堆砂材料と流量をパラメータとして8ケースの実験を行った。堆砂材料としては、砂材料について、平均粒径0.3mm

(以下細砂と称する)と平均粒径1.3mm(以下粗砂と称する)の2種類の一様粒径珪砂を用いた。なお、砂材料を設置する際には、気泡を含まないように水中で沈降させ整地した。粘性土としては、美和ダム貯水池から採取した底泥を用いた。用いた底泥の粒度分布の一例を図-5に示す。これより、0.1mm程度以下のシルト、粘土成分が大半を占めていることがわかる。粘性土の設置においては、材料がある程度自立する状態の含水比45%に調整して設置した。

測定項目は、流量、流砂量、圧力水頭(パイプ内)、堆砂形状である。排砂装置の流量は、水槽内水位を連続的に計測することにより、水位変化から算定した。流砂量は定期的の下流にて網で直接捕捉することにより計測し、総排砂量は沈砂池堆積量で概略を把握した。パイプ内圧力については、パイプの上流と下流の2つの断面において上部と側部にピエゾ管を設置して計測した(図-3参照)。

4. 堆砂が砂の場合の実験結果

4.1 排砂後の状況

砂材料を用いた場合の実験結果について水理量の平均値を表-1に示す。実験は堆砂形状の最深部標高が初期堆砂高から概ね50cm低下した時点、または堆砂形状の変化があまりみられなくなった時点で終了としている。ケースB-1、B-2については、後者の状態になり終了した。

排砂状況の例として、ケースA-1とA-4の排砂後の堆砂形状を写真-2に示す。これより、ケースA-1では、パイプ上流端を中心にすり鉢状の堆砂形状が形成されている。一方、ケースA-4では、パイプ上流端にもすり鉢形状がみられるが、パイプの切り欠き下流端位置においてより大きなすり鉢形状が形成されており、パイプの切り欠き下流端位置周辺のシート下の土砂が吸引されている。

各ケースの排砂終了後の堆砂形状を示した図-6をみると、上述の切り欠き下流端での土砂の吸い込みは流量が大きくなるほど顕著となる傾向が認められる。この現象は、切り欠き下流端位置周辺のシート下の土砂がパイプ内の圧力低下により、

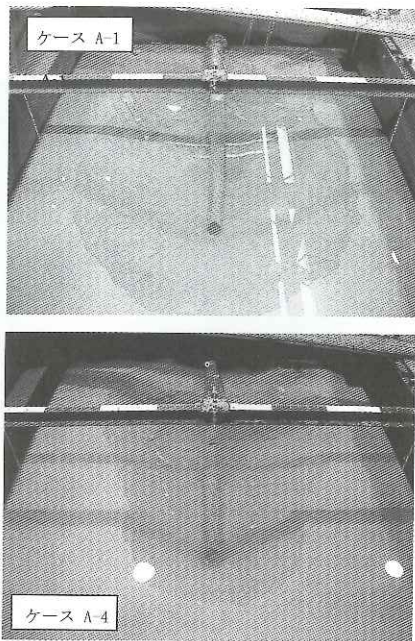
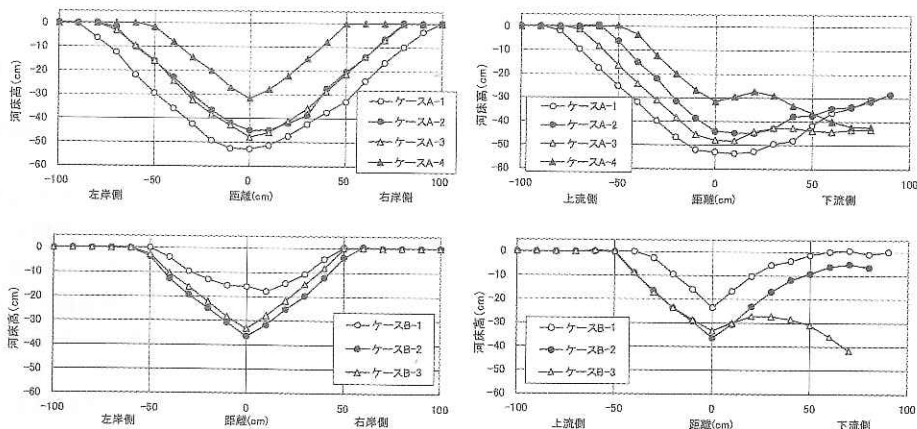


写真-2 排砂後の堆砂形状



注：原点は、左右岸及び上下流方向は、排砂終了後の流入口位置を横切る断面を、鉛直方向は初期堆砂面を基準としている。

図-6 排砂終了後の堆砂形状

パイピング現象を生じて吸引されていると考えられる。排砂後のすり鉢形状の勾配は、概ね30～37°程度であり、通常の砂の水中安息角がそれよりやや大きめの値となった。

4.2 水理量の時系列変化

排砂中のケースA-1～A-4の流量、圧力水頭、排砂量の時系列を図-7に示す。

流量は、水槽内水位を2秒間隔で測定した値を1分間移動平均した値を用いて算出している。流量については、ケースA-4で若干不安定になっているものの、他のケースでは、ほぼ安定した値を示している。

圧力水頭についてみると、切り欠き部の上流と下流の圧力差は流量が大きくなるほど大きくなり、若干変動している。時間の経過につれて圧力差が大きくなる傾向が見られる。

排砂量については、全体としてみると流量が増加すると流量の増加率と比較して、大きな増加量を示している。実験中に排砂量の変動がみられるが、圧力水頭の結果と合わせてみると、排砂量が大きくなると、圧力差が大きくなり、排砂量が小さくなると、圧力差が小さくなる傾向が認められ、排砂量の増加に伴って損失水頭が大きくなってい

ることが確認できる。

ケースB-1～B-3については、紙面の関係から結果を示していないが、B-1及びB-2では、初期に大きな排砂量がみられ、その後は排砂量が小さくなり、終盤にはさらに排砂量が小さくなり実験を終了している。B-3では、B-1、B-2と同様に初期に大きな排砂量を示し、その後は、ケースAと同様な経過を示した。

ケースBでは粒径が大きく土砂が動きにくいいため、掃流力が小さい場合 (B-1、B-2) には、パイプ切り欠き部の堆砂面に傾斜がついてくると土砂の輸送量が減少すると考えられる。一方、掃流力が十分大きい場合には、終盤にすり鉢形状が発達し、すり鉢の中心に供給される土砂量が多くなることによって、排砂量が増加すると考えられる。

4.3 排砂能力

排砂装置の排砂量は、パイプ内のせん断抵抗力 (または掃流力) によって決まっていると考えられる。また、パイプ内のエネルギー損失は、土砂が移動することにより増加しているものと考えられる。そこで、ここでは、パイプの切り欠き部分に着目し、パイプ内に流砂が存在する場合の壁面せん断抵抗力が流水のせん断抵抗力と砂礫の摩擦抵抗力の和で表されるものとして、以降の解析を進める。

流水のせん断抵抗力については、堆砂面を固定床とした場合の実験におけるパイプの切り欠き上下流端の圧力水頭の測定結果から、以下に示す摩擦損失係数の推定式を求めた。

$$f = 0.02675 - 0.001331nR_e \quad (1)$$

$$R_e = \frac{\nu D}{\nu} \quad (2)$$

ここで、 f : 摩擦損失係数、 R_e : レイノルズ数、 ν : 断面平均流速、 D : パイプ内径、 ν : 水の動粘性係数を表す。この摩擦損失係数から、流水の無次元せん断抵抗力を次式で求める。

$$\tau_w = \rho g R I_w = \rho f \frac{v^2}{2} \quad (3)$$

$$\tau_{*w} = \frac{\tau_w}{(\sigma/\rho - 1)\rho g d} \quad (4)$$

ここで、 τ_w : 流水のせん断抵抗力、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 R : 径深、 τ_{*w} : 流水の無次元せん断抵抗力、 σ : 砂の密度、 d : 砂の粒径を示す。

砂礫の無次元摩擦抵抗力については、排砂実験時の圧力水頭の結果を用いて以下の式から求めた。

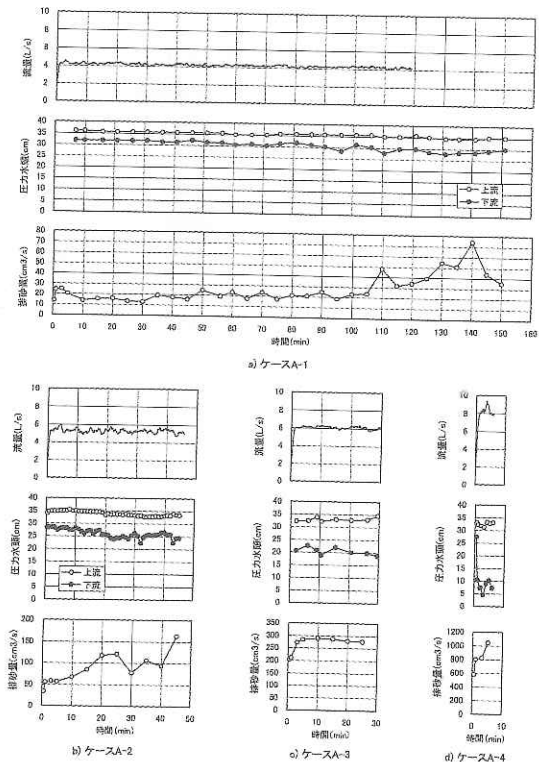


図-7 流量、圧力水頭、排砂量の時系列

$$\tau = \rho g R I = \rho g R \frac{\Delta h}{L} \quad (5)$$

$$\tau_e = \tau - \tau_w \quad (6)$$

$$\tau_{*e} = \frac{\tau_e}{(\sigma/\rho - 1)\rho g d} \quad (7)$$

ここで、 τ : 流砂が存在する場合の壁面せん断抵抗力、 L : 上下流のピエゾ間隔、 Δh : 排砂時の上下流のピエゾ水頭差、 τ_e : 砂礫の摩擦抵抗力、 τ_{*e} : 砂礫の無次元摩擦抵抗力を示す。無次元流砂量については、次式で求めた。

$$q_{B*} = \frac{Q_B}{B\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}} \quad (8)$$

ここに、 q_{B*} : 無次元流砂量、 Q_B : 流砂量、 B : 水路幅 (切欠き幅) を示す。

図-8に、実験結果の流水の無次元せん断抵抗力 τ_{*w} と無次元流砂量 q_{B*} の関係を示す。これより、 τ_{*w} の値が小さいケースB-1、B-2については、ばらつきが大きい、その他のケースについては、概ね τ_{*w} と q_{B*} の相関は高く、その関係は次式 (図-8にも表示) で表される。

$$q_{B*} = 84.8\tau_{*w}^{2.59} \quad (0.2 < \tau_{*w} < 2) \quad (9)$$

図-9に、実験結果の砂礫の無次元摩擦抵抗力 τ_{*e} と無次元流砂量 q_{B*} の関係を示す。ここでも、 τ_{*e} の値が小さいケースB-1、B-2については、ばらつきが大きい、その他のケースでは高い相関を示している。関係式は、次式 (図-9にも表示) で表される。

$$q_{B*} = 6.29\tau_{*e}^{2.08} \quad (0.7 < \tau_{*e} < 10) \quad (10)$$

上述の関係式は、限られた実験条件から求められたものであるが、式 (9) からは、装置の排砂量を求めることができ、式 (10) からは、排砂時の切り欠き部分におけるエネルギー損失を見積もることができる。ただし、切り欠き部より下流については別途エネルギー損失を検討する必要がある。

ここで、表-1の平均流量とパイプの諸元から式 (1) ~ (4) 及び (9) を用いて流砂量を推定した結果を表-2に示す (相関の小さいケースB-1、B-2は除いた)。これより、ばらつきは認められるが、概ね30%程度以下の誤差で流砂量が推定できる。

以下に実際の規模を念頭に置いて、簡単な想定計算を試みてみる。条件としては、堆砂の平均粒径を3mm、パイプの直径を0.5m、パイプの摩擦損失係数を0.01、排出の対象とする土砂量を1万

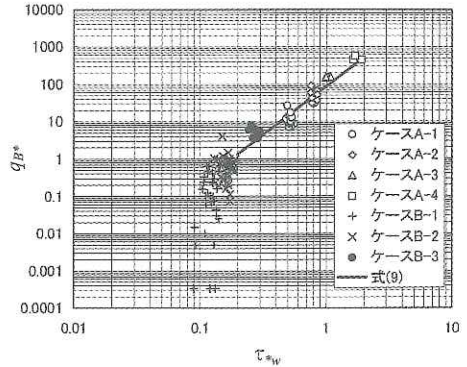


図-8 τ_{*w} と無次元流砂量 q_{B*} の関係

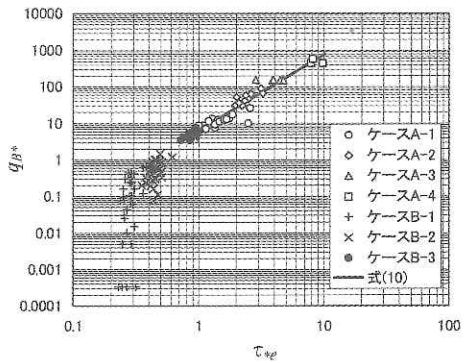


図-9 τ_{*e} と無次元流砂量 q_{B*} の関係

表-2 流砂量の推定結果

ケース	平均流砂量 (空隙無し) (L/s)	流砂量推定値 (空隙無し) (L/s)	誤差 (%)
ケース A-1	0.0266	0.0300	13.0
ケース A-2	0.0865	0.0921	6.4
ケース A-3	0.2628	0.1821	- 30.7
ケース A-4	0.8107	0.8693	7.2
ケース B-3	0.0986	0.0561	- 43.2

m³ (空隙率を40%として実質体積は6千m³とする)を設定する。この場合、水中安息角を30°とすると、底面の半径が約25.5m、高さが14.7mの円錐形の体積を排出する必要があり、パイプの切り欠き部の長さを26mとする。式 (3) ~ (10) までを用いて算定を行うと、放流量が0.5m³/sの時、排砂量は0.026m³/sとなり、1万m³を排出するためには63時間強必要となる。またこのとき、パイプの切り欠き部の損失水頭は、1m当たり0.22mとなり、全体では、5.6mの損失となる。流量を0.6m³/sに増やすと、排砂には25時間弱必要となり (排砂量0.068m³/s)、8.7mの損失水頭とな

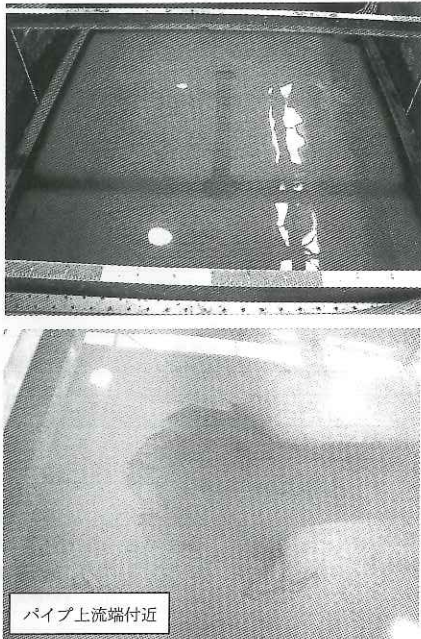


写真-3 ケースCの実験終了後の堆砂形状

る。今後このような試算を詳細に行い、施設のレイアウトや運用方法について検討していきたい。

5. 堆砂が粘性土の場合の実験結果

堆砂材料に粘性土を用いたケースCの実験終了後の堆砂状況を写真-3に示す。ケースCでは、排砂開始直後、瞬間的に濃度の高い濁水が排出されるが、1分後にはかなり濃度が薄くなり、3分後には、やや透明度のある濁水となり、その後は大きな変化がみられなくなった。写真-3をみると、上流端でやや広い範囲の土砂が流失しているが、それ以外では、ほぼパイプ切り欠きの直下のみが流失した状況となっている。今回の実験では材料の

設置の問題もあり、通常の貯水池内の条件よりは小さい含水比としている。このことも一因かもしれないが、粘性土は粘性的作用によって垂直に切り立っても自立している。このため、パイプ底面がある程度掘れて、流水断面積が大きくなるにつれて掃流力が小さくなり、粘性土の侵食限界を下回るとそれ以上排出されないものと考えられる。今回の実験では、粘性土に対しては排砂効果が小さい結果となり、今後の課題と認識している。現在のところシート下の水流を何らかの方法で乱すこと等が有望ではないかと考えている。

6. おわりに

シートとパイプを用いた排砂装置について、水理模型実験によりその水理特性の検討を行った。その結果、砂材料については、基本的に排砂が可能であり、排砂能力についても掃流力と排砂量に相関が認められ、排砂量を制御することが可能と考えられる。粘性土については、有効な排砂効果が得られず、今後の研究開発における課題としたい。

最後に、本検討の実験においては、土木研究所水工研究グループ河川・ダム水理チームの葉梨達也氏の助力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 柏井条介：堆砂対策によるダム貯水池の持続的利用、土木技術資料47-1, pp.46-51, 2005
- 2) 柏井条介、井上清敬：長方形開水路の掃流砂輸送特性、ダム工学, Vol.12, No.4, pp.256-267, 2002
- 3) 久保康夫・西村敬一・櫻井寿之・柏井条介：シート排砂方式に関する排砂現象の把握、土木学会第60回年次学術講演会, 2-095, pp.189-190, 2005

櫻井寿之*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループ河川・ダム水理チーム主任研究員
Toshiyuki SAKURAI

柏井条介**



独立行政法人土木研究所企画部研究企画監(前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループ河川・ダム水理チーム上席研究員)
Josuke KASHIWAI

久保康夫***



石川島播磨重工業(株)鉄構事業部鉄構設計部(前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループ河川・ダム水理チーム交流研究員)
Yasuo KUBO