

ハイドロフォンによる掃流砂計測に関する現地実験

国土交通省北陸地方整備局 松本砂防事務所 神野忠広, 吉田俊康, 春日裕次
いであ株式会社 ○樋田祥久, 小川義忠, 黒川信敏, 松田明浩

1 はじめに

流砂系における土砂動態観測において、浮遊砂については濁度計やバケツ採水等による観測手法がほぼ確立されているものの、掃流砂については、事後的に直接計測する手法を除いて確立された観測手法がないのが現状であり、様々な観測手法が提唱・実験されている状況にある。

姫川水系左支川平川源太郎砂防堰堤では、平川流域の流砂観測のため平成 19 年度末の設置から平成 22 年度末までの約 3 年間ハイドロフォンと圧力式水位計による観測が実施されている。ハイドロフォンは金属管に流下土砂の粒子が衝突する音を電圧に変換し、閾値を越えた回数や電圧そのものをデータとする流砂量観測機器である。従来の研究により掃流砂量を概ね評価できることが知られており¹⁾、粒径別掃流砂量を推算する手法も提案され²⁾³⁾、流域の土砂移動の量と質を把握する有効な手段であると考えられている。平川では、平成 20 年度にハイドロフォンの基本特性を把握するための一様粒径による現地実験⁴⁾、平成 21 年度には推算粒径別掃流砂量と観測ピットによる粒度検証が実施されている³⁾。

一方、平成 20 年度の現地実験は一様粒径を対象とした平常時流量規模の実験であった。そのため、掃流砂量や粒径別掃流砂量の推算において混合粒径での適用性と適用範囲について明らかとなっていない。そこで、本研究では、ハイドロフォン上を通過する粒子の粒径、流砂量および水深が把握できている状態で、平常時から洪水時流量規模における現地水路実験を行い、掃流砂量の推算、粒径別掃流砂量算出の適用範囲、粒径別掃流砂量推算法の混合粒径への適用性について検討した。

2 現地実験

平川は流域面積 22.85km²、堰堤から上流 350m の平均河床勾配は 1/31 である。堰堤水通し幅は 68m、堰堤水通し部に右岸・中央・左岸の 3 箇所ハイドロフォンが設置されており、実験には中央にあるハイドロフォンを用いた。ハイドロフォンの測定管は管径 48.6mm 管長 2.0m の円管で、モルタルで被覆した管の一部（700mm×2）を露出させ、検知部としており、管の中には吸音も兼ねた乾燥剤が詰め込まれている。ハイドロフォンが検知しているデータは、管の検知部に砂礫粒子が衝突した音をマイクロフォンで出力した電圧（以下、音圧(mV)と呼ぶ）と、アンプで増幅した電圧が閾値（2.5V）に達した回数（以下、パルス数(回)と呼ぶ）を計測している。なお、増幅率は 4 倍、16 倍、64 倍、128 倍、256 倍、1016 倍の 6ch を設定している。



写真-1 実験水路への給砂の様子

2.1 実験条件 実験では水路長が 10m 程度、水路幅の上幅が 1.64~1.67m、下幅が 1.25~1.28m であるハイドロフォンに直交する直線水路を用いた。実験材料は現地土砂をふるい分けた 6 粒径を用い、流量を 3 段階に変化させて、17 ケース（一様粒径 13 ケース、混合粒径 4 ケース）の実験を行った。水路に足場を設け、堰堤水通しのコンクリート部上流端（ハイドロフォン上流 0.75m 地点）から実験材料を流下させ、測定管の検知部（700mm）に衝突させた。実験水路への給砂の様子を写真-1 に示す。実験ケースごとにコンクリート部上流端箇所の水位を計測し、事前に計測した河床位との差分から水深を測定した。また、電磁流速計を用いて流速を測定している。さらに、ハイドロフォン上を通過した単位時間あたりの土砂量を掃流砂量としている。なお、粒子流速については、予備実験において画像解析により測定することで確認し、固定床上の粒子速度を推算している（詳細は発表会にて発表する）。実験条件を表-1 にまとめた。ここに、 h は水深、 u は流速、 Q は流量、 q は単位幅流量、 d_m は実験材料の中央粒径、 h/d は相対水深、 Q_b は掃流砂量、 u_* は摩擦速度（ $=\sqrt{ghi_b}$ ）、 u_g は粒子速度、 F_r はフルード数である。

表-1 実験条件（平成 22 年度）

case No.	B m	h m	u m/s	Q m ³ /s	q m ³ /m/s	d _m mm	h/d	Q _b 10 ⁻³ ・m ³ /s	u _* m/s	u _g m/s	F _r	備考
2-3	1.46	0.308	0.489	0.220	0.150	7.13	43.2	0.140	0.312	0.608	1.57	一様粒径
2-4	1.46	0.308	0.514	0.231	0.158	14.3	21.6	-	0.312	0.531	1.65	一様粒径
2-5	1.46	0.308	0.519	0.233	0.160	22.8	13.5	-	0.312	0.460	1.67	一様粒径
2-6	1.46	0.308	0.504	0.226	0.155	32.0	9.6	-	0.312	0.398	1.62	一様粒径
2-7	1.46	0.308	0.514	0.231	0.158	45.3	6.8	-	0.312	0.325	1.65	一様粒径
2-9	1.46	0.303	0.567	0.250	0.171	7.13, 14.3, 22.8	-	-	0.309	-	1.83	混合粒径(粒径割合1:2:1)
2-10	1.46	0.305	0.536	0.239	0.163	7.13, 14.3, 22.8	-	-	0.311	-	1.72	混合粒径(粒径割合1:1:2)
3-4	1.46	0.375	0.577	0.316	0.216	14.3	26.3	0.216	0.344	0.642	1.67	一様粒径
3-5	1.46	0.375	0.472	0.258	0.177	22.8	16.5	0.272	0.344	0.572	1.37	一様粒径
3-6	1.46	0.375	0.632	0.346	0.237	32.0	11.7	0.0684	0.344	0.510	1.83	一様粒径
3-7	1.46	0.375	0.662	0.362	0.248	45.3	8.29	0.292	0.344	0.437	1.92	一様粒径
3-9	1.46	0.375	0.627	0.343	0.235	7.13, 14.3, 22.8	-	0.150	0.344	-	1.82	混合粒径(粒径割合1:2:1)
3-10	1.46	0.378	0.630	0.347	0.238	7.13, 14.3, 22.8	-	0.209	0.345	-	1.82	混合粒径(粒径割合1:1:2)
4-4	1.46	0.403	0.599	0.352	0.241	14.3	28.2	0.168	0.357	0.685	1.68	一様粒径
4-5	1.46	0.403	0.644	0.379	0.259	22.8	17.7	0.244	0.357	0.614	1.81	一様粒径
4-6	1.46	0.403	0.709	0.417	0.285	32.0	12.6	0.236	0.357	0.552	1.99	一様粒径
4-7	1.46	0.403	0.704	0.414	0.283	45.3	8.90	0.251	0.357	0.479	1.97	一様粒径

3 実験結果及び考察

従前の研究より音圧と掃流砂量には高い相関関係があることが確認されている³⁾。そのため、①前年度の実験結果に今年度の実験成果を追加して、洪水時流況時における音圧と掃流砂量の関係を確認した。また、②粒径別掃流砂量推算の適用範囲の検討については、運動エネルギーとパルス率の関係を示すことでパルスの頭打ちについて検討し、粒径別の掃流砂量が推算可能範囲について検討した。さらに、③混合粒径を用いた実験結果と、粒径別掃流砂量の推算結果を比較して、混合砂の適用性を確認した。

3.1 掃流砂量推算に関する検討 音圧と掃流砂量の関係を図-1に示す。図-1に示すとおり、掃流砂量が大きい条件においても音圧と掃流砂量には相関関係があり、近似曲線は累乗近似で高い相関関係をもつ。また、混合粒径についても相関が確認できた。以上のことから、上記関係式が適用可能と判断できる。なお、Case2-4～2-10については給砂した実験材料が河床に到達せずハイドロフォン上を通過した可能性がある($h/w_0 \leq L/u_g$)ため、掃流砂量の評価には用いていない。ここに、 w_0 は沈降速度(Rubeyの式を使用)、 L はハイドロフォンまでの流下距離である。

3.2 粒径別掃流砂量の適用範囲に関する検討 運動エネルギーとパルス率の関係を図-2に示す。パルス率とは各増幅率のパルス数を増幅率1016倍のパルス数で除したものである。従前の研究⁴⁾より、3粒径以上の粒径別掃流砂量を検知するためには、ある運動エネルギーに対して1より小さなパルス率が3つ得られなければならない。少なくとも増幅率128倍のパルス率が頭打ちしていない必要がある。このことから、検知限界は運動エネルギー e が概ね0.01以下となるとときであるといえる。

上記より、粒径別掃流砂量の検知限界を $e=0.01$ とすると、平川・源太郎堰堤における粒径別掃流砂量の算出可能範囲は図-3に示すとおりであり、洪水時(水深40cm規模)で礫集団の70%程度、平水時(水深10cm規模)で礫集団の全てを検知できる。

3.3 混合砂の適用性の確認 混合砂の実験値と従前の手法による粒径別掃流砂量の計算結果を比較した(図-4)。混合砂による実験値と粒径別掃流砂量の計算値を比較すると、中央粒径7.12(mm)の存在割合は実験値と比較して小さいものの、中央粒径14.25(mm)、22.75(mm)の存在割合は実験値に近い値を示している。計算値は、粒径別存在割合の傾向を表現できていると考えられる。

4 おわりに

本研究の成果として、①混合砂についても音圧と掃流砂量の関係式が適用できること、②粒径別掃流砂量算出適用範囲が把握できたこと、③本手法による計算結果が粒径別存在割合の傾向を表現できること、が明らかとなった。今後は、データの収集蓄積と他支川への適用に向けた検討を進めていきたいと考えている。

5 謝辞

ハイドロフォンによる調査・解析にあたり、京都大学大学院農学研究科 水山高久教授にご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

6 参考文献

1)水山ら：音響法(ハイドロフォン)による流砂量の連続計測，砂防学会誌 vol.49,No.4,pp.34-37,1996 2)鈴木ら：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究，砂防学会誌,Vol.62,No.5,2010 3)神野ら：ハイドロフォンによる粒径別流砂量算出法に関する一考察，砂防学会研究発表会概要集 No.57,pp.242-243,2010 4)神野ら：平川・源太郎堰堤に設置したハイドロフォンの基本特性に関する現地実験，砂防学会研究発表会概要集 No.52,pp.70-71,2009

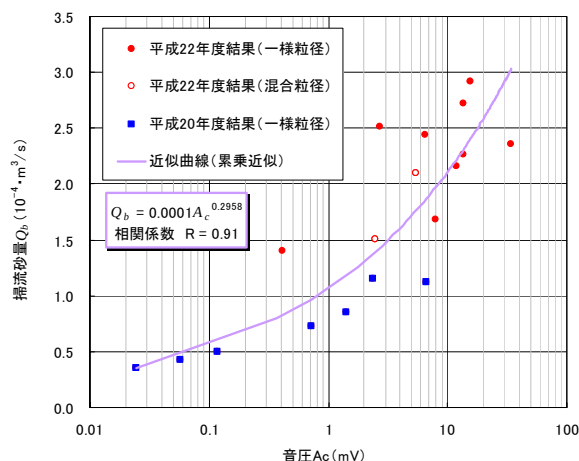


図-1 音圧と掃流砂量の関係

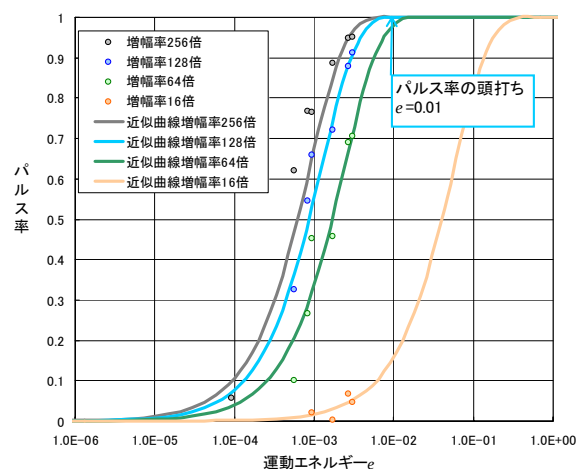


図-2 運動エネルギーとパルス率の関係

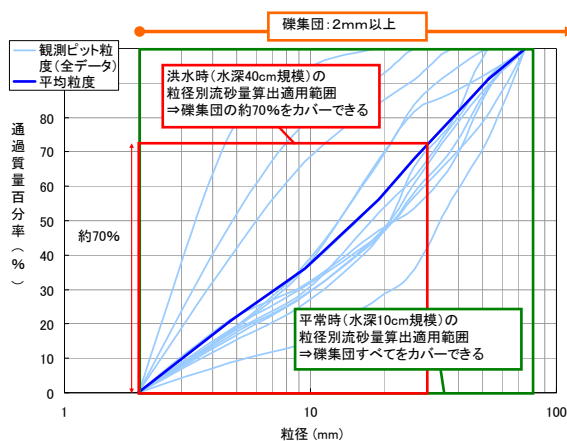


図-3 粒径別掃流砂量算出可能範囲
(平川・源太郎砂防堰堤)

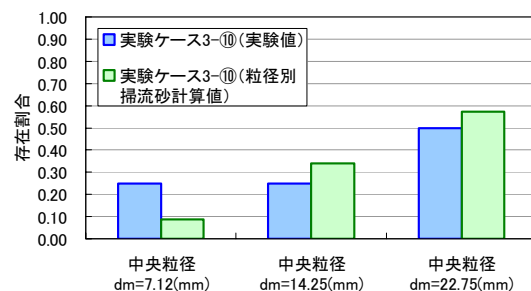


図-4 混合砂の実験結果と計算結果