

# 高速流中の礫流下量を定量的に把握する試み

(国研) 土木研究所 櫻井 寿之、中西 哲、石神 孝之

## 1. はじめに

ダム貯水池の堆砂の軽減およびダム下流の流砂環境の保全・改善のための手法の一つである土砂バイパストンネルを通過する土砂量を把握することは、施設の使用・施設の摩耗・損傷に関する維持管理と対策、下流河川の河床環境変化の検討・評価などにおいて重要である。

流水中にほぼ一様に浮遊した状態で流下する比較的細粒の土砂については、採水分析によってその輸送量をある程度把握可能であるが、掃流砂の把握が難しい。砂防分野等にて、ハイドロフォン(パイプ型、プレート型)による流砂量の計測の研究が進められているが、バイパストンネルによっては、高速流が生じる場合があり(例えば小渋ダムバイパストンネルでは、設計流量での流速が15m/s程度) その場合の計測方法は十分確立されていない。

そこで、筆者らは、高速流を再現した水路実験を行って、耐衝撃性の高いプレート型センサを用いた高速流中の礫流下量の計測手法について検討を行っており、現時点での検討状況を報告する。

## 2. 実験方法と実験結果の概要

実験では、ポンプから給水管を通じて1.0m<sup>3</sup>/sの流量を給水し、高さ0.2m×幅0.5mの長方形の出口を持つノズルで整流して、高さ0.5m、幅0.5m、長さ10m、勾配1/50の鋼製水路に通水した(水路の上流端の出口での断面平均流速は10m/s)。水路の下流端にプレート型センサを水路底面と同一平面として設置した。プレート型センサは、長辺0.5m×短辺0.36m×厚さ15mmの鋼製プレートと裏面に設置された3つのセンサから構成される。センサは、音響センサ(ハイドロフォン)と振動センサおよびジオフォン(スイスの土砂バイパストンネルで採用事例があるセンサ)の3つである。本研究では、音響センサと振動センサの2つのセンサを用いた。

実験では、センサから出力される電圧を20μs毎(50kHz)に10秒間記録し、記録期間中に、水路に通水を行った状態で上流端付近から実験条件に従って質量を測定した礫材料を水面付近から落下させる方法で投入した。実験方法の詳細は、既報<sup>1)</sup>を参照いただきたい。実験に用いた礫材料と実験条件を表-1、2に示す。

礫を流下させた際の計測結果(出力電圧)の例として、Case7の計測結果の例を図-1に示す。計測波を確認し

表-1 実験に用いた礫材料の諸元

呼び粒径 (mm)	ふるい目サイズの上限と下限 (mm)	平均質量 (g)	平均体積 (cm <sup>3</sup> )	平均密度 (g/cm <sup>3</sup> )
2	2.00~2.80	0.019	0.0070	2.72
5	4.75~5.60	0.261	0.0976	2.67
10	9.52~13.20	2.765	1.0308	2.68
20	19.1~22.4	15.591	5.8690	2.66
50	45~63	251.453	94.6839	2.66
100	90~100	1670.423	625.2399	2.67

表-2 実験条件

ケース	試行回数 (回)	呼び粒径 (mm)	土砂量 (1試行当り)	土砂量 (g) (試行合計)	土砂量(空隙無し) (試行合計)(cm <sup>3</sup> )
Case1	10	2	約26,000個 (500g)	5,000	1,842
Case2	10	5	約1,900個 (500g)	5,000	1,874
Case3	10	10	約360個 (1000g)	10,003	3,728
Case4	10	20	50個	6,955	2,618
Case5	20	50	25個	133,404	50,233
Case6	40	100	10個	670,391	250,928
Case7	10	2	約26,000個 (500g)	5,000	1,842
		5	約1,900個 (500g)	5,000	1,874
		10	約360個 (1000g)	10,002	3,728
		20	50個	6,894	2,595
		50	10個	25,976	9,781
		100	5個	82,123	30,739

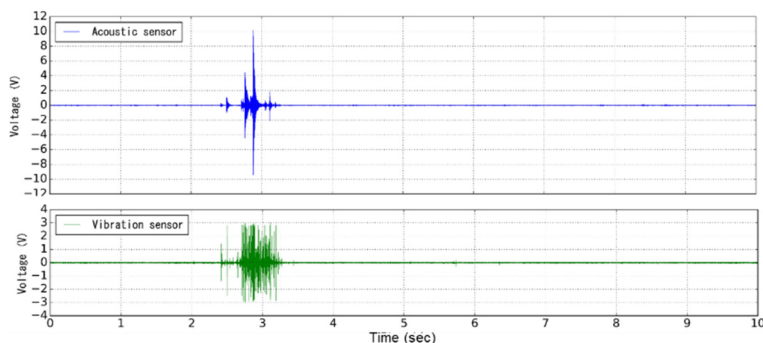


図-1 Case7の計測結果の出力電圧時系列の例

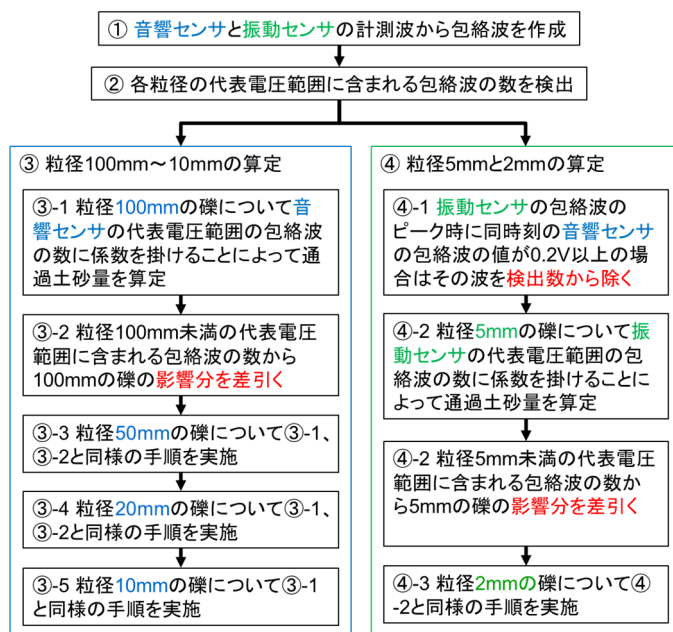


図-2 礫流下量の算定方法の試案

た結果、波の振幅は、概ね粒径との相関がみとめられ、音響センサの結果にその傾向が顕著にみられた。振動センサは、小さい粒径にも反応し感度がよいが、小さい衝撃でも振幅が計測上限値に達した。

### 3. 礫流下量の算定方法の試案と算定結果

実験の計測結果の特性を考慮して、図-2 に示す礫流下量の算定方法を考案した。

図-2 の の手順では、まず出力電圧値を絶対値に変換し、そのデータからある時刻の値がその前後 5000  $\mu$  sec の範囲で最大値となるかどうかで波のピークになるかどうかを判定することにより包絡線のデータを作成した。図-2 の の手順では、包絡線データのピーク電圧が 0.2V 以上の波について、一様粒径の実験結果から設定した表-3 に示す代表電圧範囲毎に波数を計測した。なお、5mm と 2mm の小さい粒径については、感度の良い振動センサの波数を用いることとし、10mm 以上の粒径については、音響センサの波数を用いている。

図-2 の の手順において用いる係数とある粒径によって生じるより小さな粒径の代表電圧範囲に検出される波数を差し引くための補正係数については、一様粒径の実験データから設定した表-4、5 の値を用いた。

また、振動センサの波数については、粒径 10mm 以上の礫の衝突による包絡線がカウントされていると考えられ、これを補正するために、振動センサの包絡線のピーク時に同時刻の音響センサの包絡線データの値が 0.2V 以上の場合はカウントしないこととして図-2 中の -1 の手順を加えた。

図-2 に示した 、 および -1 の手順を用いて代表電圧範囲の波数を求めた結果を表-6 に示す。また、これより、図-2 の方法により、プレート型センサによって記録した出力電圧結果から算定した各実験ケースの土砂量を表-8 に示す。表-7 に実験で投入した土砂量を示し、表-9 に実験値と算定値の誤差を実験値の合計土砂量を基準とした割合で示す。

表-9 より、合計の流下礫量とその粒径区分について 30% 程度の誤差で計測することができた。一様粒径の場合は、礫の総量の誤差は 10% 以下であり、全て過大評価となっている。粒径別の誤差としては、5mm、20mm、100mm が 3.5% 以下で小さく、2mm、10mm、50mm が 10% ~ 30% 程度でやや大きい。混合粒径の Case7 では、礫の総量の誤差が 30.8% と一様粒径の場合より大きく、過小評価となっている。粒径別にみると、小さい粒径においてその粒径のみの割合で比較するとかなり過小評価されており、振幅と波長の大きな波と小さな波が重複することによる影響が表れていると考えられる。

表-3 各粒径のピーク出力電圧の代表電圧範囲

粒径	2mm	5mm	10mm	20mm	50mm	100mm
礫流下量を代表するピーク出力電圧の範囲	振動センサの 0.2~0.8V	振動センサの 0.8V以上	音響センサの 0.2~0.6V	音響センサの 0.6~2V	音響センサの 2~10V	音響センサの 10V以上

表-4 波数から土砂量(空隙無し体積)を求めるための係数

センサ	波形のピーク電圧値の範囲 (V)	粒径2mm	粒径5mm	粒径10mm	粒径20mm	粒径50mm	粒径100mm
音響センサ	0.2~0.6	-	-	21.8	-	-	-
	0.6~2.0	-	-	-	58.2	-	-
	2.0~10.0	-	-	-	-	95.4	-
振動センサ	10.0~	-	-	-	-	-	1,695.5
	0.2~0.8	3.9	-	-	-	-	-
	0.8~	-	14.7	-	-	-	-

表-5 より小さな粒径の代表電圧範囲の波数を差し引く際の補正係数

センサ	検出波のピーク電圧値の範囲 (V)	粒径2mm	粒径5mm	粒径10mm	粒径20mm	粒径50mm	粒径100mm
音響センサ	0.2~0.6	-	-	1.00	4.07	0.81	1.59
	0.6~2.0	-	-	-	1.00	0.94	2.76
	2.0~10.0	-	-	-	-	1.00	4.49
振動センサ	10.0~	-	-	-	-	-	1.00
	0.2~0.8	1.00	7.89	-	-	-	-
	0.8~	-	1.00	-	-	-	-

表-6 代表電圧範囲の波数

センサ	検出波のピーク電圧値の範囲 (V)	Case1 (2mm)	Case2 (5mm)	Case3 (10mm)	Case4 (20mm)	Case5 (50mm)	Case6 (100mm)	Case7 (混合粒径)
音響センサ	0.2~0.6	0	3	192	183	329	236	415
	0.6~2.0	0	0	15	45	384	408	185
	2.0~10.0	0	0	0	0	407	666	120
振動センサ	10.0~	0	0	0	0	9	148	14
	0.2~0.8	536	970	93	12	11	84	162
	0.8~	15	123	22	1	1	0	13

表-7 実験で投入した土砂量(空隙無し)( $\text{cm}^3$ )

粒径 (mm)	Case1 (2mm)	Case2 (5mm)	Case3 (10mm)	Case4 (20mm)	Case5 (50mm)	Case6 (100mm)	Case7 (混合粒径)
2	1,842						1,842
5		1,874					1,874
10			3,728				3,728
20				2,618			2,595
50					50,233		9,781
100						250,928	30,739
合計	1,842	1,874	3,728	2,618	50,233	250,928	50,558

表-8 プレート型センサの出力電圧から算定した土砂量

(空隙無し)( $\text{cm}^3$ )

粒径 (mm)	Case1 (2mm)	Case2 (5mm)	Case3 (10mm)	Case4 (20mm)	Case5 (50mm)	Case6 (100mm)	Case7 (混合粒径)
2	1,621	0	0	16	12	326	231
5	221	1,809	323	15	15	0	191
10	0	65	2,855	0	0	0	0
20	0	0	873	2,618	773	0	5,378
50	0	0	0	0	34,976	0	5,456
100	0	0	0	0	15,259	250,928	23,736
合計	1,842	1,874	4,051	2,649	51,035	251,254	34,993

表-9 実験値と算定値の誤差(実験値の合計土砂量を基準とする)

粒径 (mm)	Case1 (2mm)	Case2 (5mm)	Case3 (10mm)	Case4 (20mm)	Case5 (50mm)	Case6 (100mm)	Case7 (混合粒径)
2	-12.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.0%	0.1%	-3.2%
5	12.0%	-3.5%	8.7%	0.6%	0.0%	0.0%	-3.3%
10	0.0%	3.5%	-23.4%	0.0%	0.0%	0.0%	-7.4%
20	0.0%	0.0%	23.4%	0.0%	1.5%	0.0%	5.5%
50	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-30.4%	0.0%	-8.6%
100	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	30.4%	0.0%	-13.8%
合計	0.0%	0.0%	8.7%	1.2%	1.6%	0.1%	-30.8%

4. おわりに: 10m/s 程度の高速流を再現した水路実験により、プレート型センサを用いて礫流下量とその粒度分布を計測する手法を考案した。この計測手法によって実験条件の範囲内で礫流下量を 30% 程度以下の誤差で計測可能であることを確認した。今後、流速、混合粒径の粒度分布、礫流下量の濃度等による影響について検討し、現地への適用を推進したい。

#### 参考文献

- 1) 櫻井寿之・小柴孝太・角哲也・宮脇千晴・石神孝之: プレート型振動センサを用いた高速流中を流下する礫の計測手法に関する研究、土木学会第71回年次学術概要集第 部門、pp.69-70、2016