

プレート型センサを使用した土砂バイパストンネルにおける通過礫量推定技術の検討

竹内大輝・櫻井寿之・中西 哲・石神孝之

1. はじめに

総合的な土砂管理は、山地から海岸までの流砂系における土砂移動を総合的に捉える試みである。洪水時の河道に供給される粒径別通過土砂量は流砂系の地形や特性に影響を及ぼすため、その量及び質を把握することは重要である。しかし、河床近傍を掃流形態で流送される砂礫成分(粒径0.075mm以上)の直接計測は困難とされてきた。

近年では、パイプ型式の音響センサ(ハイドロフォン)や耐久性の高いプレート型(以下「PL」という。)の計測器による掃流砂観測技術の検討が行われている(例えば、1,2)。小柴ら³⁾は振動センサを用いることによって音響センサでは捉えられない粒径2mm程度の小さな礫を4.5m/s以下の条件において、観測できる可能性を示唆した。

天竜川支川小渋川の小渋ダムでは、貯水池堆砂対策及び総合土砂管理の観点から土砂バイパストンネル(以下「SBT」という。)が建設された。SBT吐口には、通過土砂量のうち掃流砂を直接観測することを目的にPLセンサを設置している(写真-1)。しかし、①小渋ダムSBTは最大流速15m/s程度で設計されており、これまで研究されてきた流速条件を大きく上回ること、②大きな粒径の礫も流下する土砂の対象としており、施設の摩耗・損傷の進行が懸念されること、また③下流河川への影響検討のため、粒径別土砂量の時間変化の把握の必要性など、観測・解析技術の確立は喫緊の課題となっている。

そこで、本研究では、PLセンサによって高速流中を礫が通過する際の音響及び振動を計測し、

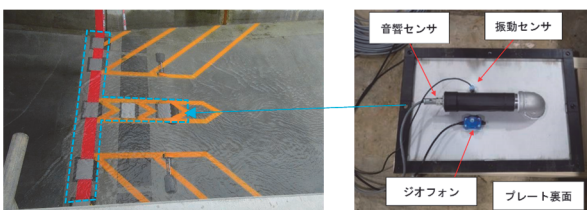


写真-1 小渋ダムSBT吐口のPLセンサ設置状況

A Method for Estimating Gravel Discharge in Sediment Bypass Tunnels by Plate Type Sensors

その波形から粒径区分別礫流量を推定する手法について検討を行った。

2. 実験方法

実験には高さ0.5m、幅0.5m、長さ10mの鋼製水路を使用した。勾配は小渋ダムSBTを参考に1/50に設定した。給水ポンプからの水流を水路と等幅の長方形出口を有するノズルによって整流し、通水した。水路の上流端付近から礫を投入し、水路の下流端に設置したPLセンサによって礫が鋼製プレートに衝突した際の音響及び振動センサの出力電圧を記録した。

PLセンサは計測電圧範囲±10V程度の音響センサ及び計測電圧±3V程度の振動センサ、地盤の振動計測に用いられるジオフォンが長辺0.5m×短辺0.36m×厚さ15mmの鋼製プレートで覆われたものである。ただし、本研究では音響センサと振動センサのみ掃流砂量の推定に用いた。それぞれのセンサから出力される電圧信号のデータを50Hzで10秒間記録した。

使用する礫は小渋ダムSBT流入部付近の河床から採取した土砂をふるい分けし、表-1に示す6つ

表-1 実験に用いた礫材料の諸元⁴⁾

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 ³)	平均密度(g/cm ³)
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(櫻井ら⁴⁾を一部修正)

ケース名	流量(L/s)	上流端出口断面平均流速(m/s)	PLセンサ位置断面平均流速(m/s)	PLセンサ位置断面平均Fr
Case1	500	5	4.7	3.25
Case2	1000	10	8.6	5.70
Case3	500	10	7.4	6.43
Case4	1000	20	16.3	14.86

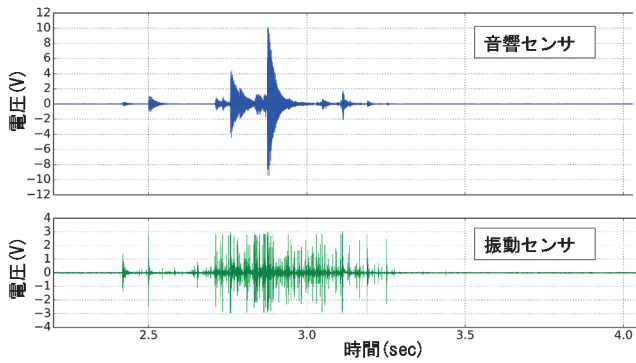


図-1 PLセンサ記録信号の例(Case2、混合粒径)⁴⁾

の一樣粒径とそれらを混合した計7種用意した。

実験はPLセンサ位置の平均流速及び流量を変化させた4パターン(表-2)、投入する礫7種の組合せ計28ケース行った。PLセンサ位置の平均流速は、Case1~3については水深と流量から推定した。Case4については流速が大きく多量の空気を連行しており、水面の判別が困難であったため、粒径100mmの礫の流下状況を高速撮影することによって求めた。試行回数は小粒径ほど1回当たりに投入できる粒子数が多いことを考慮し、粒径2~20mm及び混合粒径は10回、粒径50mmは20回、粒径100mmは40回とした。

3. 実験結果と掃流砂推定手法の提案

3.1 音響及び振動センサが検知した出力電圧波の頻度分布

PLセンサによって検知された出力電圧信号は図-1のように記録される。礫が衝突することによって出力されたこれらの波を①出力電圧値を絶対値に変換し、②包絡線データを作成後、③包絡線データの波(以下「検知波」という。)の数とピーク電圧のデータを作成した。これら検知波のピーク電圧と検知波数から流下礫量を推定する。なお、1検知波は1msec内に最大値となるか否かで判断し、信号のノイズを除去するために、ピーク電圧が0.2V以下の検知波は除去した。また、音響センサと振動センサが同一粒子を捉え、二重に波数をカウントしてしまうことを防ぐため、音響センサと振動センサの検知波が同一時刻にピークを示した際は振動センサの検知波を除去した。

このようにして求めた礫100粒子当りのピーク電圧0.2V以上の総検知波数とフルード数(Fr)の関係を図-2に示す。粒子数は礫の投入重量を平均重量で除すことによって求めた。なお、音響センサ

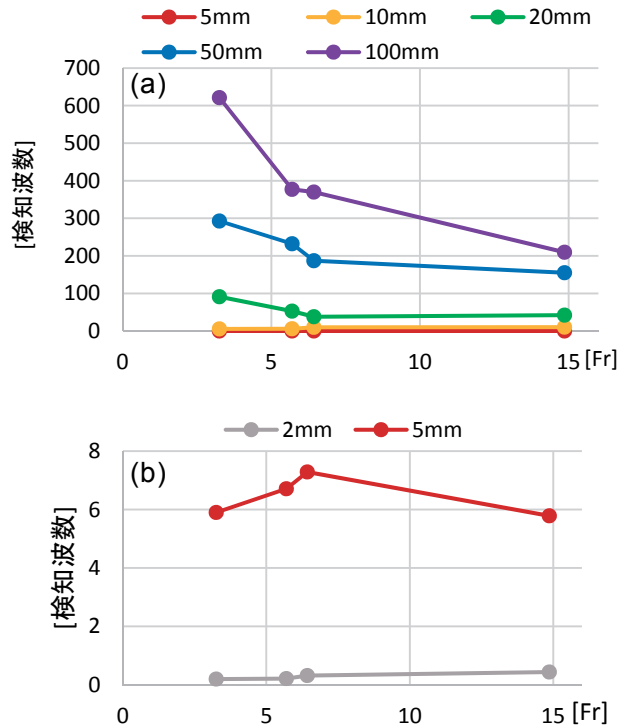


図-2 Frと100粒子当りの粒径区分別検知波数の関係:
(a)音響センサ、(b)振動センサ

では2mm粒径流下時に出力信号を捉えられなかったことから同粒径の結果を表示しておらず、振動センサは感度が高いが小さな衝撃で測定限界に達してしまうことから粒径10mm以上の礫の結果を表示していない。音響センサが示す結果によると、同じFrであれば大粒径ほど検知波数が多い。これは大粒径ほどプレートに衝突した際の衝撃が大きいことによる。20mm以上の粒径ではFrが増加するほど、音響センサの検知波数が減少した。これはFrの増加に伴い、礫跳躍距離が増大し、プレートにあたることなく流下する粒子が増加したことや同一粒子が複数回プレートに衝突することが減少した結果と考えられる。

振動センサについては同一Frであれば粒径2mmよりも粒径5mmの検知波数の方が多いものの、Fr数の大きさと検知波数の関係性は見られなかった。また、音響センサ及び振動センサの検知波数は50mm以上の粒径の場合において粒子数よりも多かった。

検知波のピーク電圧の特徴を考慮して、音響センサについては、0.6V、2V、10Vを境界として4区分し、振動センサについては、0.8Vを境界として2区分し、投入礫量10kg当りの検知波数の頻度分布を算出した(表-3)。音響センサの検知波は粒径10mm以上の礫の場合、粒径が大きいほど大

表-3 一様粒径実験の計測結果から検知した波の数をピーク電圧区分毎に整理した結果⁴⁾ (投入礫10kg当りの検知波の数)

ケース	センサ種類	検知波のピーク電圧の範囲(V)	2mmの礫投入	5mmの礫投入	10mmの礫投入	20mmの礫投入	50mmの礫投入	100mmの礫投入
Case1	音響	0.2~0.6	0.0	0.0	196.9	489.9	40.3	11.8
		0.6~2	0.0	0.0	7.0	92.0	44.4	11.5
		2~10	0.0	0.0	0.0	2.8	31.6	11.4
		10以上	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	2.5
Case2	音響	0.2~0.8	1,028.0	1,958.0	773.8	215.2	14.3	23.5
		0.8以上	22.0	308.0	281.9	69.4	0.8	1.3
		0.2~0.6	0.0	0.0	192.0	263.1	24.7	3.5
		0.6~2	0.0	0.0	15.0	64.7	28.8	6.1
Case3	音響	0.2~0.8	1,096.0	2,190.0	367.9	76.2	4.8	3.3
		0.8以上	30.0	382.0	389.9	61.8	1.3	0.1
		0.2~0.6	0.0	14.0	182.0	329.0	20.6	2.8
		0.6~2	0.0	0.0	13.0	75.7	36.4	6.8
Case4	音響	0.2~10	0.0	0.0	1.0	15.1	30.1	10.4
		10以上	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	3.4
		0.2~0.8	1,612.0	2,282.0	420.9	71.6	2.7	1.5
		0.8以上	72.0	512.0	388.9	61.9	0.5	0.1
Case4	振動	0.2~0.6	0.0	22.0	334.9	163.2	13.7	2.3
		0.6~2	0.0	0.0	28.0	96.5	17.0	2.5
		2~10	0.0	0.0	1.0	11.4	28.5	5.3
		10以上	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	2.5
Case4	振動	0.2~0.8	2,208.0	1,408.0	86.0	14.2	1.8	1.4
		0.8以上	114.0	802.0	143.0	7.1	0.4	0.1

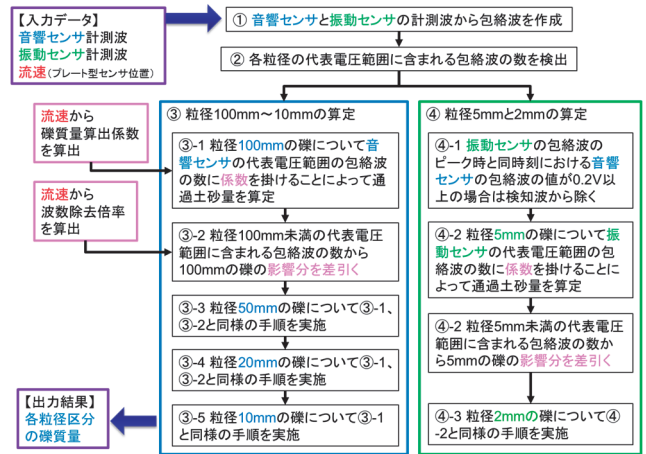


図-3 PLセンサの検知波から礫流下量を推定する実施手順

きなピーク電圧の波数が多い。振動センサについても、粒径5mm以下の礫の場合では音響センサ同様の傾向を示した。また、感度が高い振動センサを用いることで、粒径2mmの小さな礫が流下していることを捉えることができた。

3.2 礫量推定手法

図-3に礫流下量推定手順を示す。大粒径が流下している時ほど大きな電圧が検知されるため、大きな粒径から順に礫流下量を推定することとした。各粒径の礫流下量算出に用いる検知波のセンサ種類とピーク電圧の範囲を代表電圧範囲とし、それぞれ粒径2mm:振動センサ0.2~0.8V、粒径5mm:振動センサ0.8V以上、粒径10mm:音響センサ0.2~0.6V、粒径20mm:音響センサ0.6~2V、粒径50mm:音響センサ2~10V、粒径100mm:音響センサ10V以上である。既往の研究では音響センサの出力を解析して礫流下量を推定しているが、振動センサの出力も使用している点と粒径別の礫流下量を推定している点が本手法での新しい試みである。

粒径区分*i*の礫流下量 W_i (kg)は礫質量算出係数 C_i (kg/検知波数)と粒径区分別礫質量代表電圧範囲の検知波数 n_i の積であり、式(1)で表される。

$$W_i = C_i n_i \quad \text{式(1)}$$

C_i は単一粒径を投入した実験結果より流速との関係性を調べ、粒径区分毎に式(2)より求めることとした。

$$\begin{cases}
 C_{100\text{mm}} = 4.53(0.00500v + 0.801) \\
 C_{50\text{mm}} = 0.351(0.00810v + 0.868) \\
 C_{20\text{mm}} = \begin{cases} 0.155(0.0761v + 0.345) & (v \leq 8.6) \\ 0.155(-0.0428v + 1.37) & (v > 8.6) \end{cases} \\
 C_{10\text{mm}} = 0.0550(-0.0383v + 1.21) \\
 C_{5\text{mm}} = 0.0325(-0.0473v + 1.13) \\
 C_{2\text{mm}} = 0.00973(-0.0412v + 1.14)
 \end{cases} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 v : 計測位置の断面平均流速 (m/s) を表す。 n_i は流下礫量の過大評価を避けるため、各粒径の礫流下量を算出後、その次に小さな粒径の礫流下量を算出する前に流速に対応した割合で一定数差し引くこととした。この割合は単一粒径投入時の実験結果を基に算出した。礫流下量推定手法の詳細は櫻井ら⁴⁾を参照されたい。

3.3 本研究にて提案した掃流砂量推定手法の検証

式(1)を用いて、Case1~4の混合粒径投入時の礫量を推定した。各実験ケースの投入礫量と本研究の手法によって算出した推定値並びに、両者の差の合計投入礫量に対する割合をそれぞれ表-4、表-5に示す。Case1~3のようにFrが比較的小さい場合は推定値との誤差が3~4割程度と小さいが、Case4のようにFrが大きい場合は誤差が9割程度と大きい。Case1~2においては粒径別の推定精度も高い。ただし、Case1の粒径10mmなど、推定値が0になってしまう場合があることは課題である。Case3~4については、粒径100mmの礫を過大評価しており、合計の礫量も大きく推定してしまっている。これは、Frが大きくなると、粒径50mmの礫が流下する時にも音響センサで電圧10V以上の検知波が発生するために生じたと考えられる。

表-4 各実験ケースにおける礫投入量と推定値(kg)、結果は櫻井ら⁴⁾を一部修正したもの

		2mm	5mm	10mm	20mm	50mm	100mm	合計
Case1	投入量	5.0	5.0	10.0	7.1	25.6	83.6	136.3
	推定値	3.6	0.6	0.0	19.5	28.4	37.3	89.4
Case2	投入量	5.0	5.0	10.0	6.9	26.0	82.1	135.0
	推定値	0.0	4.5	0.0	12.6	23.4	53.5	94.1
Case3	投入量	5.0	5.0	10.0	7.1	26.5	84.0	137.6
	推定値	0.0	4.6	0.0	18.8	3.0	170.8	197.2
Case4	投入量	5.0	5.0	10.0	7.0	25.7	83.7	136.5
	推定値	1.0	1.5	2.0	13.9	10.3	223.9	252.6

表-5 各実験ケースにおける礫投入量と推定値の誤差(%), 結果は櫻井ら⁴⁾を一部修正したもの

		2mm	5mm	10mm	20mm	50mm	100mm	合計
Case1		-1.0	-3.2	-7.3	9.1	2.1	-34.0	-34.4
Case2		-3.7	-0.3	-7.4	4.3	-1.9	-21.2	-30.3
Case3		-3.6	-0.3	-7.3	8.5	-17.1	63.1	43.3
Case4		-2.9	-2.6	-5.8	5.1	-11.3	102.7	85.1

4. まとめ

SBTのように流速が大きい水路を流下する礫量を推定するため、最大15m/s程度の流速条件にて上流から礫を投入し、下流に設置したPLセンサで礫を検知する実験を行った。そして、検知した波形を用いて礫流下量を推定する手法を提案した。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- 音響センサのみでなく、振動センサを用いることで粒径2mmの小さな礫が流下する際の信号を検知することができた。
- Frが比較的小さな実験条件では礫流下量の推定誤差が3~4割程度と良好な結果を得られたが、Frが大きい条件では推定誤差が約9割となった。これはFrが大きいと、より大きな電圧の検知波数が増加することによる。
- Frが比較的小さな実験条件では粒径別の礫流下量の推定精度が高いことを示した。

Case4のように15m/s以上の流速が大きな条件における礫流下量推定精度の向上は課題として残る。しかし、小渋ダムSBTでは流速は大きいものの、Frはおよそ2~5であり、Case1-2程度の誤差で礫流下量を推定できる可能性があるため、今後、本研究の成果の適用性を現地のデータで確認する。さらに、実験及び現地のデータを蓄積し、推定式やパラメータを改善し、推定精度向上及び現地への適用を目指す。今回の実験では一つの河川の礫材料（比較的丸みのある形状）を用いたが、礫形状や地質の依存性については今後の課題と考えている。

謝 辞

本研究の実施に際して、国土交通省中部地方整備局天竜川ダム統合管理事務所の皆様に実験材料の採取にご協力をいただいた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 鈴木拓郎、内田太郎、岡本敦、高橋健太、山下伸太郎、小菅尉多、福本晃久：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂観測手法の現地適用性の検証、砂防学会誌、Vol.66、No.1、pp.4~14、2013
- 堤大三、野中理伸、水山高久、藤田正治、宮田秀介、市田児太郎：掃流砂観測におけるプレート型ジオフォンとパイプ型ハイドロフォンの比較、京都大学防災研究所年報、No. 57B、pp.385~390、2014
- 小柴孝太、角哲也、堤大三：プレート型振動センサを用いた掃流砂量計測手法に関する研究、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.72、No.4、I_925~I_930、2016
- 櫻井寿之、中西哲、石神孝之：高速流中の粒径区分別礫流下量の推定手法に関する研究、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.74、No.4、I_853~I_858、2018
- 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II部門、pp.69~70、2016

竹内大輝



研究当時 土木研究所水工研究グループ水理チーム研究員、現 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課流水管理室 水利係長
Daiki TAKEUCHI

櫻井寿之



研究当時 土木研究所水工研究グループ水理チーム主任研究員、現 (一財)ダム技術センター 首席研究員
Toshiyuki SAKURAI

中西 哲



土木研究所水工研究グループ水理チーム 主任研究員
Satoru NAKANISHI

石神孝之



土木研究所水工研究グループ水理チーム 上席研究員
Takayuki ISHIGAMI