

高速流下における土砂動態モニタリング技術の開発 ～土砂バイパストンネルへの適用～

櫻井寿之・宮脇千晴・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・改善のための土砂マネジメントの手法の一つとして、土砂バイパストンネルが用いられている。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、施設の操作、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。

そこで、本稿では、平成28年度より試験運用が開始される予定の天竜川支川の小渋川に建設中の小渋ダム土砂バイパストンネル¹⁾(図-1参照)への適用を想定して、土砂バイパストンネルを流下する土砂の動態をモニタリングする手法についての現状と課題を整理する。また、掃流形態で通過する礫の量のモニタリング技術について、現状で知見が十分でない高速流下におけるモニタリング技術に関する検討状況を報告する。

2. 土砂バイパストンネル内における土砂動態モニタリング技術の現状と課題

土砂バイパストンネルを通過する土砂は、粒径や輸送形態などによって分類することができるが、ここでは、貯水池内の堆砂や土砂収支の整理においてよく用いられる下記の粒径区分による分類を使用して、土砂動態モニタリング技術の概要について記載する。

(1) シルト成分 (0.075mm以下)

ウォッシュロードとも称される粒径の小さい土砂であり、ダムの多くが設置される山地河川では、出水時に浮遊状態で輸送され、流水中で概ね一様に混合されると考えられる。現状では、出水時に1時間程度の間隔でバケツ採水等によって得られたサンプル水のSSと粒度分布を分析することで、流量を把握する。出水時に欠測が無いように採水するための労力は大きく、省力化には濁度の自動計測が有用であるが、土砂の粒度分布や土質な

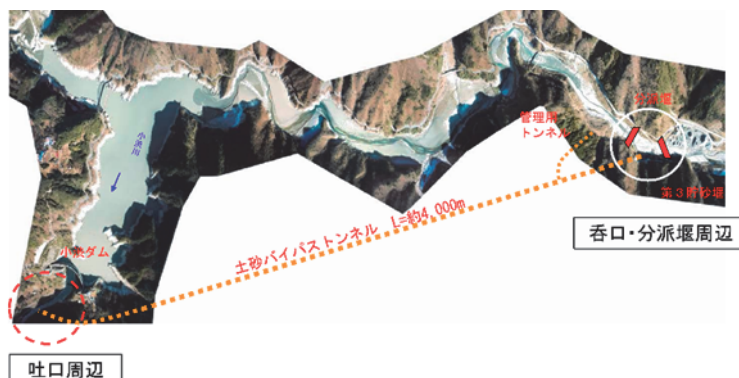


図-1 小渋ダム土砂バイパストンネルの概要¹⁾

どにより濁度とSSとの相関関係が異なるため、採水分析によるキャリブレーションが重要である。

(2) 砂成分 (0.075mm～2.0mm)

砂成分については、掃流力に応じて掃流形態から浮遊形態で輸送される。山地河川では出水時には掃流力が大きくなり、浮遊形態で輸送される量も多くなるため、出水前後の河床形状の違いから通過量を把握することは難しい。土砂バイパストンネルでは一般に比較的急勾配の開水路トンネルとして設計される場合が多く、小渋ダムの土砂バイパストンネルでも出水時には10m/s以上の流速となることが想定され、砂成分の多くは浮遊状態で輸送されると考えられる。ただし、水深方向の土砂濃度が異なることも想定されるため、小渋ダム土砂バイパストンネルでは、吐口に高さ別の採水管を設置して採水分析することが計画されている(図-2参照)。この採水分析の結果はシルト成分、礫成分についても利用される予定である。

(3) 礫成分 (2.0mm以上)

砂成分と同様に、掃流力に応じて掃流形態から浮遊形態で輸送されるが、砂成分よりは掃流形態の輸送量が多い。小渋ダム土砂バイパストンネルでは、出水期後に土砂バイパストンネルの上下流(上流約2km, 下流約4.6km)の河床形状を測量し、土砂バイパストンネル上流の河床材料調査を行い、その変化から流下土砂量を把握することが計画されている。

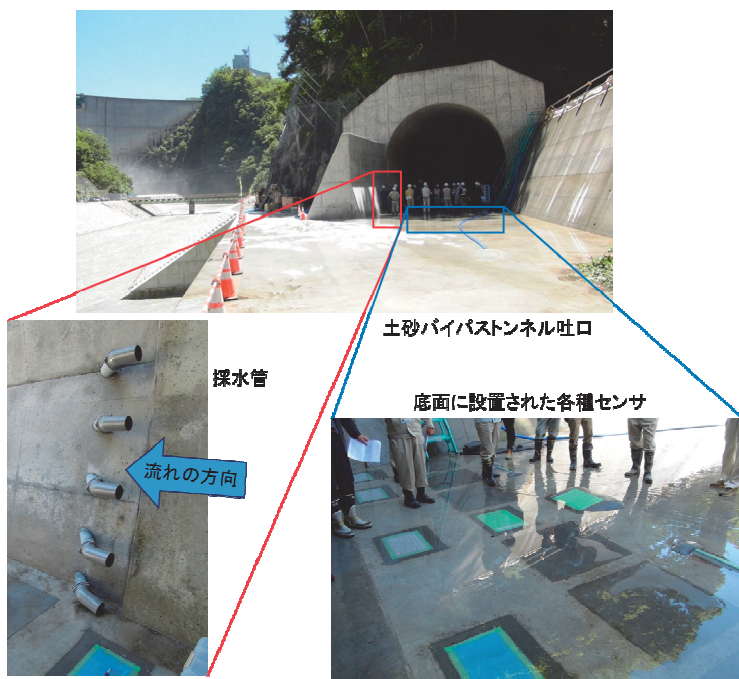


図-2 小渋ダム土砂バイパストンネルの吐口概要

を直接計測するための試みとして、土砂バイパストンネルの吐口にプレート型振動センサ等が設置されている(図-2参照)。

掃流砂の計測手法の既往研究としては、砂防分野で多くの検討が行われているハイドロフォン(音響センサ)^{2),3)}やスイスで施設に設置されているジオフォン(地盤用の振動センサ)⁴⁾などの研究事例があるが、小渋ダム土砂バイパストンネルで想定されているような高速流(最大15m/s程度)での計測特性については十分な知見がない。

3. 高速流中を流下する礫計測の試み

3.1 実験目的

前述の礫成分の直接的な計測に関する課題に関して、筆者らは、室内実験によって高速流中に礫を流下させた際の計測特性を明らかにすることを目的として実験による検討を実施した。実験では、小渋ダムでの流下が想定されている2mm~100mの礫について、6個の粒径範囲を設定しその代表粒径を選定してそれぞれの粒径に対する計測特性を把握することを目的とした。将来的には、各代

表粒径の計測特性を組み合わせることで粒径区分毎の土砂の通過量を把握することを目指している。

3.2 実験方法

実験装置の概要を図-3に示す。給水用のポンプからの水流を高さ0.2m×幅0.5mの長方形の出口を持つノズルで整流し、高さ0.5m、幅0.5m、長さ10m、勾配1/50の鋼製水路(底面はステンレス製)に通水を行った。

水路の下流端に図-4に示すプレート型振動センサを水路底面と同一平面とした場合(角度0°)と水流方向に対してプレート下端が10°の角度で立ち上がった状態とした場合(角度10°)の2条件で設置した。プレート型振動センサは、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。

実験では、通水を行った状態で上流端付近から単一の礫を水面付近から落下させる方法で投入し、センサから出力される電圧を20μs毎(50kHz)に記録した。

実験に用いた礫の材料は小渋ダム土砂バイパストンネルの流入部直上流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つの一様粒径とした。

実験では、1個の礫を水路の上流端の水面付近から落下させた。

実験ケースは、プレート型振動センサの設置角度と流量(流速)と粒径をパラメータに表-2に示す21ケースとし、各ケースの同条件で50回の計測を実施した。

3.3 実験結果

実験装置に通水をした状態で、水路中央の水面形(目視による時間平均)を計測した結果、水面形はおおむね安定しているが、流速10m/sの場合は、水脈の乱れや空気混入による水深の増加およびプレート設置角度が10°の場合に下流端の水面

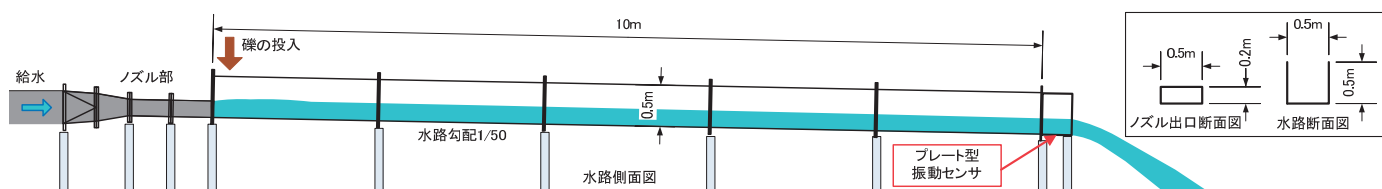


図-3 実験装置の概要

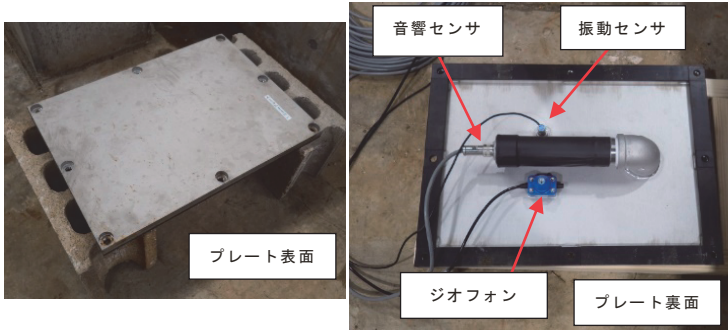


図-4 プレート型振動センサの概要

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)	質量の標準偏差 (g)	平均密度 (g/cm ³)	一個当りの平均体積 (cm ³)	平均体積を有する球体と仮定した場合の直径 (mm)
2	2.00~2.80	0.019	-	2.72	0.0070	1.96
5	4.75~5.60	0.261	-	2.67	0.0976	4.72
10	9.52~13.20	2.765	1.02	2.68	1.0308	10.35
20	19.1~22.4	15.591	3.92	2.66	5.8690	18.47
50	45~63	251.453	79.64	2.66	94.6839	46.68
100	90~100	1670.423	295.50	2.67	625.2399	87.58

表-2 実験条件

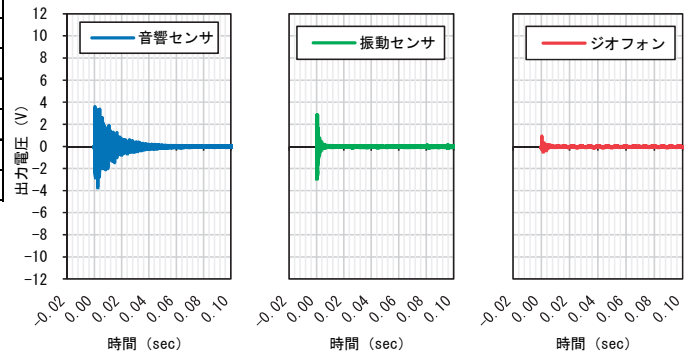
実験ケース	プレート設置角度	流量 (L/s)	水路の上流端流速 (m/s)	呼び粒径 (mm)	試行回数 (回)
A-1-1	0°	500	5	5	50
A-1-2				10	50
A-1-3				20	50
A-1-4				50	50
A-1-5				100	50
A-2-1	0°	1000	10	5	50
A-2-2				10	50
A-2-3				20	50
A-2-4				50	50
A-2-5				100	50
B-1-1	10°	500	5	5	50
B-1-2				10	50
B-1-3				20	50
B-1-4				50	50
B-1-5				100	50
B-2-1	10°	1000	10	2	50
B-2-2				5	50
B-2-3				10	50
B-2-4				20	50
B-2-5				50	50
B-2-6				100	50

の上昇がみとめられた。水路上流端からの距離 2m~8m の水深の計測値を平均して水流の平均流速を算定すると、上流端流速 5m/s の場合で 4.75m/s、10m/s の場合で 8.62m/s であった。

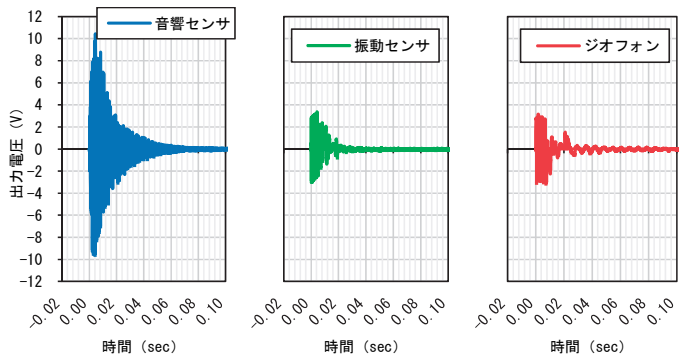
実験結果の流況の例を図-5 に、礫を流下させた際の計測結果の例として、ケース B-2-4 とケース B-2-6 の計測結果を図-6 に示す。時間軸は計測波形が立ち上がった時点 を 0sec とし、波形が立ち上がって概ね低減するまでの期間を切り取って表示した。ここに示した例以外の計測波形も確認した結果、波形の振幅と継続時間は、概ね粒径との相関がみられ、音響センサの結果にその傾向が



図-5 上流端流速 10m/s の流況(上)と高速撮影した礫の流下状況(下)



(a) ケース B-2-4 の計測結果



(b) ケース B-2-6 の計測結果

図-6 礫を流下させた際の出力電圧計測結果の例

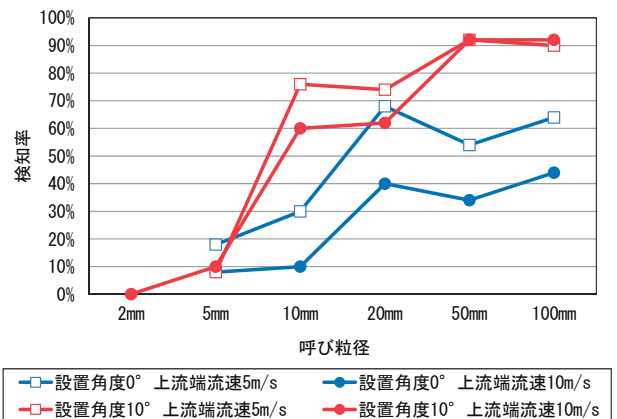


図-7 礫を流下させた際の出力電圧による検出率

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てしまい、振幅から粒径の大きさを判別することは難しいと考えられる。ジオフォンは、振動センサの波形と似ているが、小さい粒径の場合の振幅が小さめになり、振幅の低減時間が長めとなる傾向がみられた。

50回の計測の中で、上記のような波形の変化が認められた回数の割合を検知率と定義して、図-7に各ケースの結果をまとめて示した。プレートの設置角度を 10° とすると、全体的に検知率が増加している。また、同じプレート設置角度では、流速が大きいと検知率が小さくなる傾向がみられ、その傾向はプレート設置角度 0° の方が顕著である。なお呼び粒径 2mm については、初めにプレート角度 10° 、上流端流速 10m/s の条件で検討したところ、波形の変化が認められなかったため、他の条件では実施していない。しかしながら補足の実験で 2mm の土砂を1個ではなく多量(100g)に投入すると、波形の変化が確認されたため、今後詳細に検討したい。

4. まとめ

小渋ダム土砂バイパストンネルの運用については、堆砂の軽減などの本来の目的の効用が期待されるのはもとより、土砂バイパストンネル内における土砂動態モニタリング技術や施設の操作・維持管理手法の技術的な発展も期待される。

室内実験による検討によって、高速流中を流下する礫のプレート型振動センサによる計測の基礎的な知見を得ることができた。プレートの設置角

度や流速による検知率の変化に関する知見は、現地計測の結果を補正する際に参考になると考えられる。今後は、通過土砂量を定量的に把握することを目標に、複数粒径や混合粒径の条件についての検討や出力結果の解析方法についての検討を進めたい。

謝 辞

本研究を進める中で、京都大学防災研究所の角哲也教授と角教授の研究室の皆様、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助言と多大なご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省天竜川ダム統合管理事務所webサイト (<http://www.cbr.mlit.go.jp/tendamu/picup/monitoring/index.html>)
- 2) 堤大三、野中理伸、水山高久、藤田正治、宮田秀介、市田児太朗：掃流砂観測におけるプレート型ジオフォンとパイプ型ドロフォンとの比較、京都大学防災研究所年報、(57)、pp.385~390、2013
- 3) 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
- 4) Haggmann, M., Albayrak, I., Boes, R.M.: Field research: Invert material resistance and sediment transport measurements, Proc. Int. Workshop on Sediment Bypass Tunnels, VAW-Mitteilung 232, ETH Zurich, Switzerland, pp. 123-135, 2015

櫻井寿之



土木研究所水工研究
グループ水理チーム
主任研究員
Toshiyuki SAKURAI

宮脇千晴



土木研究所水工研究
グループ水理チーム
総括主任研究員
Chiharu MIYAWAKI

中西 哲



土木研究所水工研究
グループ水理チーム
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