

京都大学大学院工学研究科	学生員	○小柴 孝太
京都大学防災研究所	正会員	角 哲也
京都大学防災研究所	正会員	竹門 康弘
京都大学防災研究所	正会員	堤 大三

1. 研究の背景

ダム貯水池の堆砂問題が顕在化しており、適切な土砂管理手法の開発が急務である。その中では、排砂バイパストンネルは世界の中で日本とスイスがリードする最先端技術であるものの、トンネル内部の土砂動態の把握手法は未確立である。特に、長期的な維持管理に直結するトンネルインバートの摩耗対策を進めるには、トンネル内部の水理特性と土砂輸送機構の解明が必須であり、特に掃流砂の現地観測手法の開発が大きな鍵となっている。

これまで、例えばハイドロフォンを用いた観測が京大穂高砂防観測所などで実施されてきている（堤ら(2008)）。ハイドロフォンは砂礫の衝撃を鋼製パイプ内に発生する音圧とパルスで計測するものである。これに対して、日本と同様な山岳河川を有するスイスにおいては、鋼製プレートに振動センサーを設置したジオフォンが開発され、スイスの Solis ダムの排砂バイパストンネルに導入され、平成 25 年より観測が開始された。ハイドロフォンは、小粒径の土砂に対し高感度（感知下限：約 2mm）である一方、大粒径の礫衝突により破損し易いという欠点がある。また、ジオフォンは破損には強いが、小粒径の土砂に対し低感度（感知下限：約 1cm）という欠点がある。これらの長所短所を踏まえると、鋼製プレートでなく、ハイドロフォンの原理を用いるプレートマイクロフォンがより有効と考えられる。本実験では水路実験を通して、プレートマイクロフォンの特性を明らかにする。

2. 実験手法

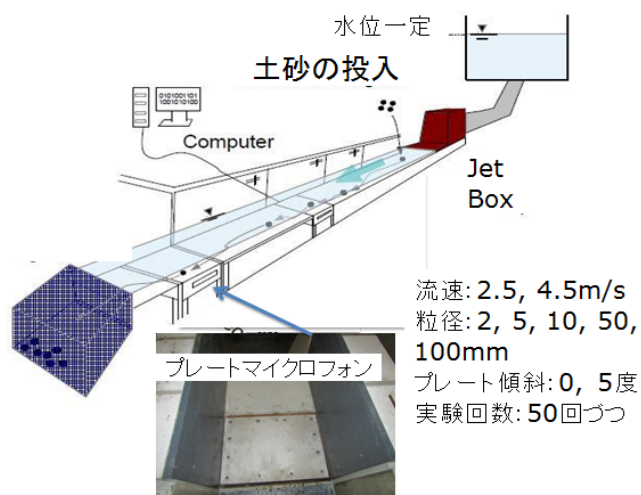


図 1 水路実験概要

プレートマイクロフォンのキャリブレーション実験を図 1 に示す水路で行った。長さ 7.56m の直線水路の下流端にプレートマイクロフォンを設置し、上流から砂礫を投入した。流速は 2.5m/s と 4.5m/s、プレート傾斜は 0°（水平）と 5°、礫の粒径は 2mm, 5mm, 10mm, 50mm, 100mm の 5 パターン用いて、単一粒径砂礫による投入実験と混合粒径砂礫による実験を行った。録音は以下の 3 パターンの方法で記録をした。a) 生波形：砂礫の衝突によって生じた音圧値の波形データ。b) パルス数：得られた生波形データを一定の値で増幅した後、すべて正の値に折り返した波形の包絡線を作成した。この波形を一つのパルスとし、これを 2, 4, 16, 64, 256, 1024 倍に増幅したもので一定の閾値（今回は 2V）を越えたものの数をカウントし、それをパルス数とした。c) 音圧値：パルスが複数個重なったときに、パルス数が低くカウント

されることがある．そこで，パルスの面積の時間平均値として音圧値を定義した．音圧値は一定間隔で計測されたパルスの電圧値を計測し，計測された値を 10 秒間で平均した値である．

3. 結果と考察

本研究では，パルス数を実際に投入した礫の値で除したものを検知率 R_d と定義した．図 2 は検出率と増幅率の関係を表している．(a) は 2.5m/s，(b) は 4.5m/s の結果である．これらによると，2mm, 5mm に関しては検知率が非常に小さく計測に使用することは困難である．また，他の粒径に関しては増幅率 64 倍及び 256 倍が検知率 1 付近にあり，計測に適した増幅率である．また，(b) では増幅率 1024 倍において検知率が大きく 1 を超えており，これは流水に起因するノイズと判断できる．(a) の 5mm, 100mm において比較的増幅率が小さい時点で検知率 1 を超えるのは流速が小さいため一つの石が 2 回以上プレートに衝突したと考えられる．また，傾斜による検知率の違いはみられなかった．

検知率を左右する要因として次の二つについて考察した．1) 飽和度 R_s : パルスの重なりが多いほど，波が干渉し合い検知率は下がると考えられる．そこで単一パルスと投入礫数の積を反応時間で除した値を飽和度と定義し，検知率との関係を求めた．図 3 は 50mm，増幅率 256 倍の結果であり，検知率と飽和度が負の相関にあるとわかる．2) 衝突率 $P(L_p)$: 流水中における石の飛躍長の計算式 (Aue1, 2014) を用いて，プレートの幅を礫の飛躍長で除した値を衝突率とした．図 4 に 50mm，増幅率 256 倍の検出率と衝突率の関係を示す．ここで，流速が大きくなると，衝突率も検出率も下がっている事が確認できる．

図 5 に 50mm，4.5m/s，水平プレートの音圧値の結果を示す．20 個を短時間で流した結果 (continuous) と 10 個を十分な間隔を空けて流した結果 (single) をプロットしているが，後者は波の干渉が一切なく流砂量と音圧値が比例していると考えられる．そこで実直線を理想的な掃流砂量と音圧値の関係として引

いた．すると，前者は理想的な比例関係より専ら下方にプロットされている事がわかり，これは検知率が，掃流砂量が大きくなるほど小さくなることに起因すると考えられる．

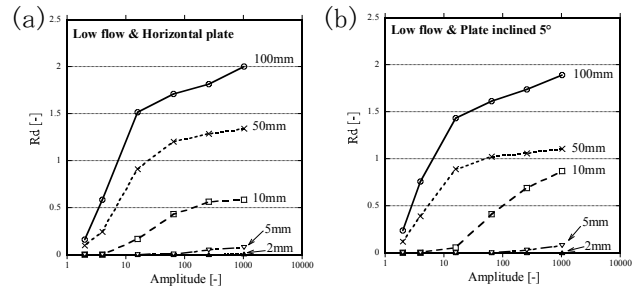


図 2 プレート傾斜が無い場合の検出率の実験結果 (a) 流速 2.5m/s (b) 流速 4.5m/s

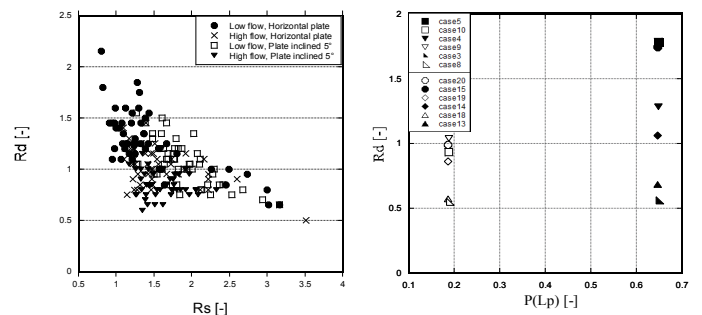


図 3 50mm，増幅率 256 倍の飽和度，図 4 衝突率と検出率の関係

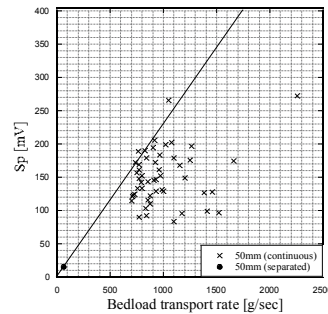


図 5 50mm，4.5m/s，水平プレートの音圧値

4. 結論

本研究により，プレートマイクロフォンに関して以下の事が導かれた．1) 音圧と掃流砂量には正の相関がある．2) 計測に最適な増幅率は 64 倍か 256 倍である．3) 礫の検知率は掃流砂の飽和度 R_s と衝突率 $P(L_p)$ の関数によって表される．4) 計測可能な最小粒径は 10mm である．掃流砂量計測には粒度分布が明確になっている必要がある．5) 今回の範囲ではプレート傾斜による検知率の上昇はみられなかった．