

ハイドロフォンによる粒径別掃流砂量の計測手法に関する検討

国土技術政策総合研究所 ○鈴木 拓郎
(財) 建設技術研究所 長谷川祐治
国土技術政策総合研究所 水野 秀明
国土技術政策総合研究所 小山内信智

1. 背景及び目的

ハイドロフォンを用いた掃流砂計測手法が検討されている。従来のパルスを用いた手法では、流砂量が特に多い時にパルス数をカウントできないなどの問題が指摘されていることを踏まえ、著者らは音圧値を用いた解析手法の検討を行っている。鈴木ら¹⁾は、音圧値から掃流砂量を算出するには、音波の干渉による検出率の減少を考慮する必要があること、検出率は単位時間当たりの粒子の衝突個数の関数であることを明らかにしている。また、個別の衝突波形を用いた数値計算により検出率の関係式を算出可能であることを示し、この関係式に音圧の計測値を適用することによって、掃流砂量を算出する手法を提案している。本手法は一樣粒径の水路実験結果に基づいているため、この手法を現地に適用するには、混合粒径条件への適用性を検討する必要がある。そこで本研究では、この手法の混合粒径への適用性を検討するとともに、粒径別流砂量の算出手法の構築を目的として、波形分析による粒度分布推定手法を検討する。

2. 鈴木ら¹⁾の手法の概要

鈴木ら¹⁾は、音圧値と流砂量の関係について次式のように示している。

$$Sp = \alpha Q_s \cdot R \cdots \cdots (1) \quad R = f(N_b) \cdots \cdots (2) \quad Sp = \alpha \frac{\pi d^3}{6} N_b f(N_b) \cdots \cdots (3)$$

ここで Sp は音圧平均値、 α は比例係数、 Q_s は流砂量、 R は検出率、 N_b は単位時間当たりの粒子衝突個数であり、式(2)は R が N_b のみの関数であることを示している。式(1)に式(2)を代入し、 Q_s を粒子 1 個当たりの体積と N_b の積とすれば式(3)となる。 d は粒径である。式(3)より、 Sp を計測しても未知数は d と N_b の 2 つであり、解を算出するには 2 つの式が必要となることからわかる。そこで、鈴木ら¹⁾はデータを分割・合成し、流砂量が k 倍となった場合の変換データを作成する手法を考案した。変換データに関して式(1),(2)と同様の関係式を記述すると、式(4)と(5)なる。

$$Sp_k = \alpha \cdot k Q_s \cdot R_k \cdots \cdots (4) \quad R_k = f(kN_b) \cdots \cdots (5) \quad \frac{Sp_k}{kSp} = \frac{R_k}{R} = \frac{f(kN_b)}{f(N_b)} \cdots \cdots (6)$$

ここで Sp_k 、 R_k は変換データの音圧平均値、検出率である。式(1)~(5)より、式(6)が得られる。式(6)より、 Sp と Sp_k を計測すれば、検出率の比 R_k/R が算出されることがわかる。 N_b と $(kN_b)/f(N_b)$ の関係式を数値計算により算出しておけば、得られた R_k/R より N_b を算出可能である。さらに、式(2)に代入して R を得れば、式(1)により Q_s が算出可能となる。

3. 混合粒径条件の水路実験

(財) 建設技術研究所の可変勾配水路を用いた。4 つの粒径階の砂礫 (A : 19.0~16.0mm, B : 16.0~9.5mm, C : 9.5~4.75mm, D : 4.75~2.0mm) を用いて、一樣粒径条件及び 3 種類の混合粒径条件 (A:B:C:D を 1:1:1:1, 4:3:2:1, 1:2:3:4 の割合で混合したもの) とした。それぞれ約 100, 200, 300g を通水中に供給してハイドロフォンへの衝突音を測定した。

実験で得られた衝突音データを前述の手法で解析した。一樣粒径条件の結果 (図-1) では、粒径の大きい A,B,C に関しては実際の重量と解析結果がほぼ一致しており、再現率 (解析結果/実際の重量) は、A は 0.95, B は 0.87, C は 0.97 となった。しかしながら、粒径が最も小さい D に関しては、再現率は 0.27 と極端に小さい結果となった。本実験では、摩擦速度と沈降速度 (Rubey の式) が一致する浮遊限界粒径は約 1mm となることから、D の材料は掃流砂と浮遊砂の境界付近であるといえる。そのため、粒子の跳動距離が増加し、ハイドロフォン自体への衝突率が低下したと考えられる。

混合粒径条件の再現率は 1:1:1:1 は 0.59, 4:3:2:1 は 0.61, 1:2:3:4 は 0.51 で解析結果は実験条件よりも全体的に小さい値となった。また、粒度分布の違いによるばらつきがあり、特に小粒径 D の割合が多い 1:2:3:4 の混合比の再現率が小さい結果となった。この原因として、一樣粒径と同様に D の衝突率が減少していることが考えられるため、仮に D の衝突率を一樣粒径結果で得られた 0.27 とした場合の再解析結果が図-2 である。再現率は、1:1:1:1 は 0.73, 4:3:2:1 は 0.66, 1:2:3:4 は 0.72 と若干増加し、粒度分布によるばらつきが減少する結果となった。しかしながら、再現率は平均で約 0.7 程度と 1.0 に満たない値となっている。

混合粒径条件で再現率が小さくなった原因は、一樣粒径条件と混合粒径条件で式(2)の関係式が異なるからである。図-3 に、検出率比 R_{10}/R と検出率 R の関係を示す (N_b と R_{10}/R の関係と N_b と R の関係を合成したもの)。ある R_{10}/R の時の R の値は、混合粒径条件では一樣粒径条件と比べて小さな値となっている。すなわち、混合粒径条件を一樣粒径条件の関係式を用いて解析すると R を過大に評価することになり、その結果 Q_s が過小評価となるということである。

4. 粒度分布推定手法

Q_s の過小評価について、混合粒径条件に応じた N_b と R の関係式、 N_b と R_0/R の関係式を算出しておけば解決可能である。しかし、得られた計測データの粒度分布が明らかでなければ、関係式を選択することは不可能である。そこで、本研究では波形データの電圧分布から粒度分布を推定する手法を考案した。

これまでの研究で、粒子衝突時の最大音圧値は粒子の運動量に比例すること、すなわち、流速が一定であれば粒径の3乗に比例することがわかっている。そこで、音圧値を微小区間で分割して音圧値の3乗根に比例するように粒径値を対応させ、音圧階ごとの計測波形データの極大点の数が当該音圧階に対応する粒径の粒子数に比例しているとして、粒度分布を解析する手法を考案した。そして、この手法により得られた粒度分布結果を用いて数値計算を実施して、 N_b と R の関係式、 N_b と R_{10}/R の関係式を算出し、これらの関係式を用いて計測データの Q_s を解析した。まず、粒度分布の解析結果が図-5である。比較のため、図-4にはDの捕捉率を0.27とした場合の粒度分布条件を示している。解析結果は、全体的に大粒径の割合が多くなっているが、粒度分布の傾向の違いは再現できている。この結果に基づいた流砂量の解析結果が図-6であり、再現率は、1:1:1:1は0.84、4:3:2:1は0.72、1:2:3:4は0.78と若干増加する結果となった。再現率の精度をさらに向上させるには、今後、粒度分布推定手法を改良する必要がある。

5. まとめ

音圧値から掃流砂量を解析する手法について、これまでに開発した一様粒径ベースの手法を混合粒径条件に適用したところ、再現率が0.5~0.7程度となった。流砂量がオーダーベースで議論されていることを考えれば十分な精度である。

再現率が1.0に満たない値となった原因としては、ハイドロフォン自体への衝突率の問題と、混合粒径条件と一様粒径条件では検出率の関係式が異なることが挙げられる。本研究で考案した波形データ分析による粒度分布推定手法を用いて解析を行えば、粒度分布の傾向の違いを再現することができ、再現率を若干向上させることが可能である。しかし、粒度分布の違いを十分に再現するには至らず、今後改良の必要がある。粒子の衝突率に関しては、粒径が小さいほど減少することが推定される。これには、土砂水理学的なアプローチが必要であり今後の課題である。粒子の衝突率の関係が明らかとなれば、粒度分布の推定結果から流砂量を補正し粒径別流砂量を算出することが可能となるため、今後、この両者について検討を進め精度の向上を計っていきたい。

6. 参考文献

- 1) 鈴木・水野・小山内・平澤・長谷川：音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂計測手法に関する基礎的研究，砂防学会誌，Vol.62，No.5，p.18-26，2010

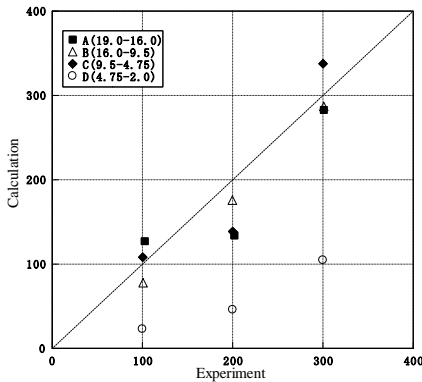


図-1 一様粒径の総重量解析結果

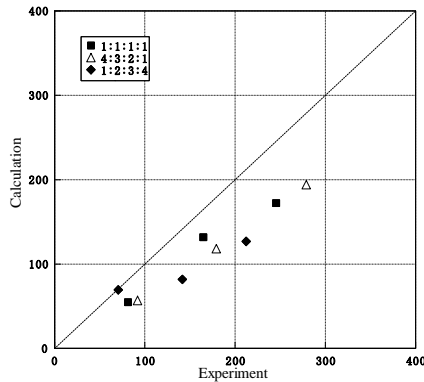


図-2 混合粒径の総重量解析結果

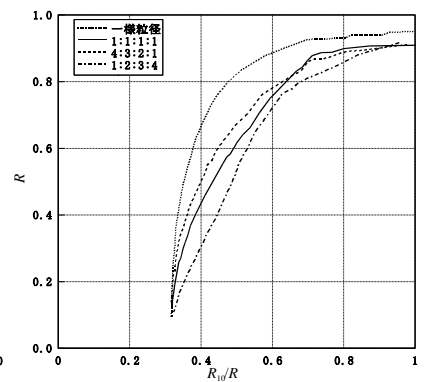


図-3 検出率比と検出率の関係

(捕捉率考慮)

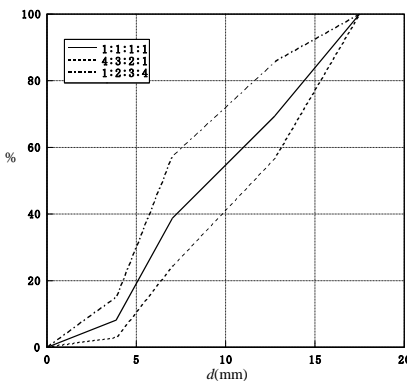


図-4 捕捉率を考慮した粒度分布条件 (粒径加積曲線)

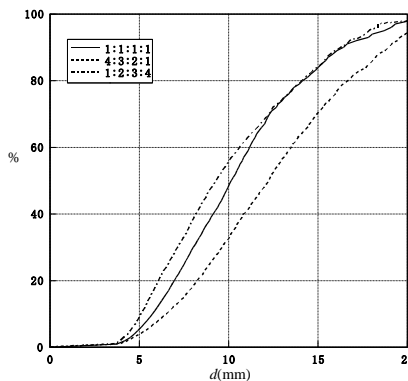


図-5 粒度分布解析結果 (300g)

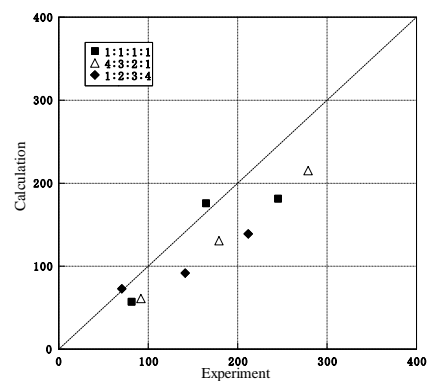


図-6 粒度分布解析を導入した混合粒径の総重量解析結果