

実験水路を利用したハイドロフォンデータのばらつきに関する検討

富山県立大学工学部 学生会員 ○磯村慎吾
富山県立大学工学部 正会員 手計太一

1. はじめに

掃流砂は堆積することで河床を形成する主要要素となり、出水の際には土砂災害を引き起こす原因となる¹⁾。そのため、移動する土砂量を定量的に把握することは河川管理をする上で重要である。また、昨今においては気候変動に伴い集中豪雨が増えていることから、防災においても、今まで以上に移動土砂量の把握が必要とされる²⁾。

本研究の目的は、粒子の運動量に対する音圧値から流砂量を定量的に測定する方法の開発と、観測される音圧値のばらつきの補正方法の検討とする。

2. 本研究におけるハイドロフォンの概要

本研究では、ハイドロフォンによる音響法を採用し、土砂である砂礫粒子の直接測定を行った。ハイドロフォンとは、金属管または金属板の内部にマイクロフォンが封入されており、砂礫粒子との衝突音を記録し、その音の強さや数から流砂量を推定する装置である³⁾。

本研究では、直径 48 mm の金属管内にマイクロフォンが封入されているハイドロフォンを使用する。流水や流砂に対して垂直に実験水路下端の河床に設置し、砂礫の衝突音を記録する。図-1 は実験で用いる実験水路とハイドロフォンの写真である。

3. 実験条件

実験では、可変勾配式の実験水路を使用した。全長 6 m、幅 80 cm である。流量は自動制御であり、水深を直接計測し、流速を算出した。表-1 は実験条件である。水路に水を流し、試料である砂礫を投下し、ハイドロフォンと砂礫の衝突音を計測した。あらかじめ砂礫は長径、短径、質量を計測した。また、砂礫の流下の際にはハイドロフォンと衝突する直前の 1 m を流下する時間を計測し、流下速度を求めた。同試料を繰返し流下する実験も行った(繰返し実験: case7,12)。ハイドロフォンに対して鉛直上方の一定の高さ(0.1, 0.5, 1.0 m)から試料を自由落下させ試料の運動量を一定にし、同試料の繰返し実験も行った(自由落下実験: case10,11)。

音響データのサンプリング周波数は 100 kHz とし、10 秒間の測定を行った。

4. 実験結果と考察

4. 1 砂礫試料の運動量と最大音圧値の関係

観測された音圧値から最大値を抜き出し、砂礫試料の運動量との関係を調べた。その結果、図-2 のようになった。図-2 において、運動量に対する最大音圧値はばらつきが大きい。運動量の増大に伴い最大音圧値も大きくなる傾向がある。これは既往研究でのガラスビーズを用いた実験における結果と同様である⁴⁾。

次に、case10,11 における運動量と最大音圧の関係を調べ

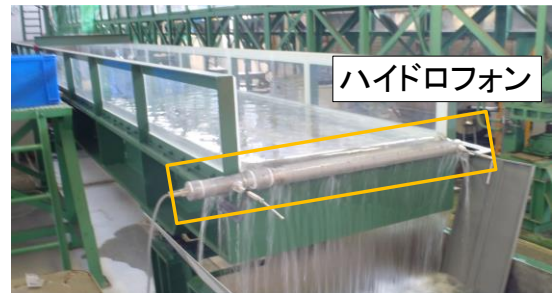


図-1. 本研究における実験水路とハイドロフォンの写真

表-1. 実験条件

実験case	case1	case2	case3	case4	case5	case6
サンプル数	50	48	47	50	50	50
流量(L/min)	2000	2000	2000	1000	1000	1000
河床勾配	1/60	1/20	1/10	1/10	1/20	1/60
水深(cm)	2.92	1.85	1.3	0.85	1.21	1.85
流速(m/sec)	1.427	2.252	3.205	2.451	1.722	1.126
フルード数	2.66	5.22	8.96	8.49	5.01	2.64
実験case	case7	case8	case9	case10	case11	case12
サンプル数	240	50	100	120	118	200
流量(L/min)	2000	1000	1000	**	**	2000
河床勾配	1/20	1/20	1/20	**	**	1/30
水深(cm)	*	1.3	1.5	**	**	2.69
流速(m/sec)	*	1.603	1.389	**	**	1.549
フルード数	*	4.49	3.62	**	**	3.02

* 水深を計測していないため、値は不明。条件はcase2と同じ。

** 自由落下実験であるため、流量等の値はない。

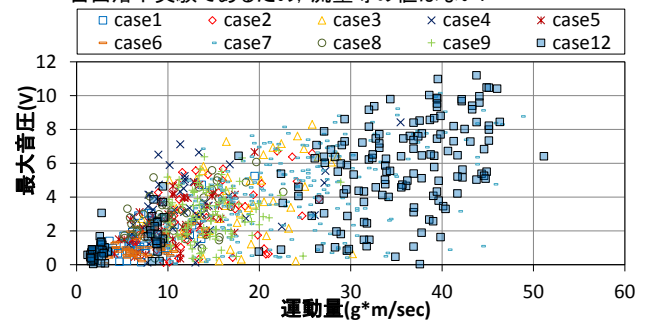


図-2. 運動量と最大音圧値の関係

た。その結果、図-3 の case10,11 のノンフィルタ(以下、NF)データのようになった。この case10,11 の実験結果においても各運動量に対して最大音圧値にばらつきがある。また、運動量が 50 g*m/sec を超えると運動量に対する最大音圧値の増加量が小さくなっており、最終的に運動量が 272.077 g*m/sec で最大音圧値が 11.32 V となり、これを超える最大音圧値は観測されなかった。これは、金属管が出せる衝突音の大きさに構造的な限界があるためである。また、運動量が約 0-50 g*m/sec の範囲における最大音圧値が case1-9,12 の結果の分布に概ね収まっていることから、観測される最大音圧値は流水による減衰がないことが分かる。

そこで、case10,11 の実験で得た最大音圧値に対して、最小二乗法による非線形近似を行った。その結果、以下のような、ある運動量で音圧値が収束する 2 種類の近似曲線が考えられた。

$$y = a \{1 - \exp(-bx)\} \quad (1)$$

$$y = \frac{a \times x}{b + x} \quad (2)$$

これらの式において、 y は係数 a に収束するため、本実験において実際に音圧値が構造上の限界値である 11.32 V という値を係数 a に入れて近似を行った。その結果、図-3 のような係数 b 及び相関係数 R^2 となった。図-3 の case10,11 の NF データにおいて(2)式の相関係数が 0.9289 であり、(1)式の相関係数よりも 1 に近い。よって、case10,11 の NF データにおいて(2)式での近似が、ハイドロフォンへの理想的な衝突による最大音圧値を表していると考えられる。

4. 2 音響の周波数特性

前項で述べたように、全実験 case、特に case1-9,12 において、運動量に対する最大音圧のばらつきが大きい。これは、ハイドロフォンへの砂礫試料の衝突の仕方が定まらないためである。この音圧値のばらつきの補正方法を検討するために、全実験から得た音響データに対して高速フーリエ変換による周波数解析を行い、音響データの周波数特性を調べた。その結果、約 3 kHz 台の周波数帯で振幅が卓越する傾向が強いことが分かった。さらに、ハイドロフォンの円周方向の固有振動数 f が下の式によって求められる⁴⁾。

$$f = 0.298(c/a) \quad (3)$$

ここで、 c は音速、 a はハイドロフォンの管の半径である。本研究では固有振動数は約 4.2 kHz となる。そこで、 4.2 ± 1 kHz の周波数帯でのバンドパスフィルタ(以下、BPF)によるフィルタリングを case7 及び case10,11 の実験結果に対して行った。その結果、図-3 及び図-4 における BPF データのようになった。この結果から、BPF 処理を施しても最大音圧値のばらつきが大きいことが分かる。

次に、(1)式と(2)式を case7 の NF 及び BPF データに適用すると、図-4 の近似式となった。この結果において、どれも相関係数は 0 に近く、どの近似式も最大音圧値のばらつきの影響を強く受けていると考えられる。また、NF と BPF の各近似曲線は、運動量が約 0-50 g*m/sec の範囲では、三つの近似式に大きな違いがないことも分かった。

また、表-2 は case1-9,12 における運動量の実測値と計算値を比較した結果である。どの近似式も相関係数が 0.5 を下回り、計算値が実測値を十分に再現できていないことが分かる。特に、(1)式と(2)式による計算において、係数 a に近い最大音圧値が観測されると運動量が過剰に大きくなる傾向があった。

5. まとめ

ハイドロフォンを実験水路に設置し、砂礫試料を用いて衝突実験を行った。その結果、既往研究と同様に、砂礫の運動量の増大に伴い最大音圧値も大きくなる傾向があることが分かった。また、理想的な衝突による最大音圧値に対して近似を行う場合、(2)式による近似が妥当であるが、観測された最大音圧値に適用しても、運動量の計算値は実

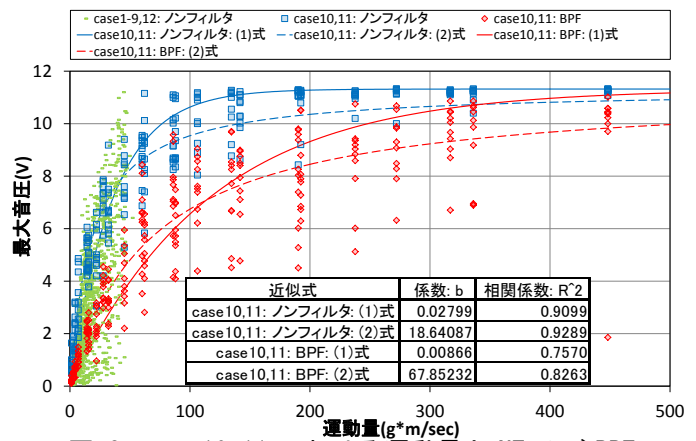


図-3. case10,11 における運動量と NF 及び BPF 処理後の最大音圧値から導いた近似曲線

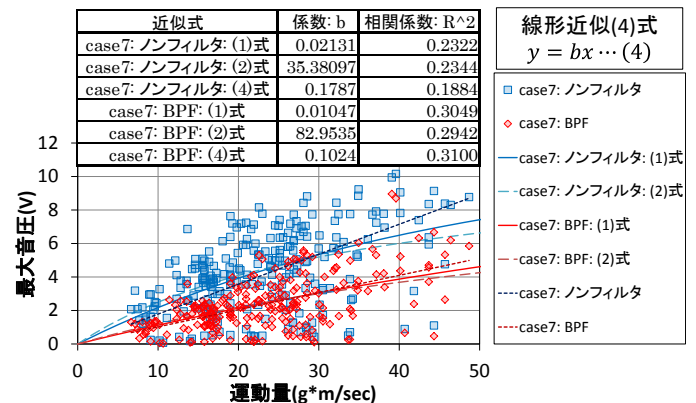


図-4. case7 における運動量と NF 及び BPF 処理後の最大音圧値から導いた近似曲線

表-2. case1-9,12 における運動量の実測値と各近似式から求めた運動量で線形回帰を行った結果

運動量算出式	実測値と計算値の回帰式	実測値と計算値の相関係数	運動量算出式	実測値と計算値の回帰式	実測値と計算値の相関係数
case7: NF (1)式	$y=1.1554x$	0.4232	case7: BPF (1)式	$y=2.3517x$	0.4232
case7: NF (2)式	$y=2.0511x$	0.0658	case7: BPF (2)式	$y=4.8089x$	0.0658
case7: NF (4)式	$y=1.0007x$	0.4234	case7: BPF (4)式	$y=1.7464x$	0.4234
case10,11: NF (1)式	$y=0.8797x$	0.4232	case10,11: BPF (1)式	$y=2.8432x$	0.4232
case10,11: NF (2)式	$y=1.0806x$	0.0658	case10,11: BPF (2)式	$y=3.9335x$	0.0658

測値を十分に再現できないことが分かった。また、BPF での処理を施しても最大音圧値がばらつくことが分かった。

謝辞：本研究の遂行にあたり株式会社コルバックの鶴田謙次氏、野村哲郎氏と吉村暢也氏にご協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 長田健吾, 安部友則: 石礫河川の河床安定に果たす石の役割, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.643-648, 2008.
- 2) 秋本嗣美, 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹: 土砂崩壊によるダム貯水池の影響評価, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.571-576, 2008.
- 3) 水山高久, 野中理伸, 野中伸久: 音響法(ハイドロフォン)による流砂量の連続観測, 砂防学会誌, Vol49, No.4, pp.34-37, 1996.
- 4) 栗原淳一, 宮本邦明: 音響を利用した流砂量計測装置について, 砂防学会誌, Vol44, No.5, pp.26-31, 1992.