

礫の接触時間を利用した粒度分布の推定法

(財)建設技術研究所
アプライドリサーチ(株)
京都大学大学院農学研究科
筑波大学農林工学系

○小田 晃・長谷川祐治
境 友昭
水山高久
宮本邦明

1. はじめに

流砂量の間接的な計測方法としてハイドロフォンが現地で用いられており、今まで計測できなかった出水時の流砂量の変化を知ることができるようになった¹⁾。次の段階として流砂の粒度分布を知るための研究が行われている。例えばハイドロフォンで計測された衝突音を用いて粒径別流砂量を推定する試みが行われている²⁾。しかし、現時点では実用的な流砂の粒度分布を推定には至っていない。

本研究は、流砂が金属板に衝突した際に発生する弾性波、並びに礫の接触時間に着目し、これらを利用することで流砂の粒径を間接的に推定しようと試みるものである。今回は空中において礫を金属板に落下させたときの粒径と弾性波の変化、並びに接触時間の変化について調べた。

2. 礫の落下実験の概要

礫の衝突時に金属板に生じる弾性波は礫の質量、衝突速度、金属板の形状等により変化する。よって、弾性波を解析することで粒度分布の推定が可能であると考えられる。そこで、単独の礫(質量が2g、6g、10g、40gの4種類)をゴムシートの上に水平に設置した金属板に自然落下させ、その時の振動を測定した。落下高さは約30cmである。金属板としてステンレス鋼板(300mm×100mm×25mm)を使用し、これに加速度計をねじ止めで取り付けた。なお、測定時間は10ms、データのサンプリング時間は2 μ s(500kHz)とした。

次に、幅10cm、勾配35°の矩形断面斜路を用い、集団で礫を落下させる実験を行った。礫は金属板から1.0m離れた場所から投入した。金属板は水路下流端に長さ方向に設置し、加速度計は金属板裏面の下流端付近にねじ止めた。なお、礫は質量の平均が大(167g)、中(14g)、小(3.3g)の3種類と、それらを混合させた礫を使用した。なお、測定時間は集団での礫の通過を考えて2~3sec、データのサンプリング時間は100 μ s(10kHz)とした。

3. 単独の礫に対する実験結果(自然落下実験)

3.1 礫の質量とパワースペクトルの関係

図-1, 2に質量2gと40gの礫を金属板に落下させたときの金属板の振動波形を示す。また、これらの波形のパワースペクトルを図-3, 4に示す。図-3の2gの礫では卓越周波数が11,900Hzとなる。この周波数は今回使用した金属板の表面波の幅(100mm)方向に対する固有振動数とほぼ一致する。また、40gの礫の卓越周波数は3,700Hzであり、同じ表面波でも長さ(300mm)方向の固有振動数とほぼ一致する。また、10gの礫についても40gの礫と同様に卓越周波数が3,700Hzであった。

これらの結果から、礫が金属板に衝突することにより金属板の持つ固有振動数の中のいくつかが共振し、その振動波形が観測されることが分かった。礫の衝突によってどの固有振動数が卓越するかは、衝突した礫の質量の影響を受けると考えられる。したがって、礫の質量の違いによって共振する固有振動数が異なることを利用すれば、衝突時のパワースペクトルから礫の粒径(質量から計算する)の推定が可能であると考えられる。

3.2 礫の質量と接触時間の関係

図-2の波形を拡大して、礫の接触時間を振動波形から直接測定した(図-5)。礫が衝突した時の弾性波が最初に計測されたときから半波長経過するまでの時間が接触時間となる。なお、弾性体の

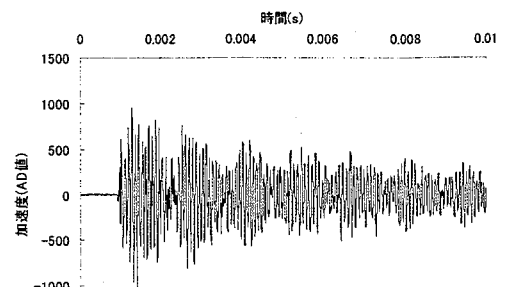


図-1 金属板の振動波形(2g)

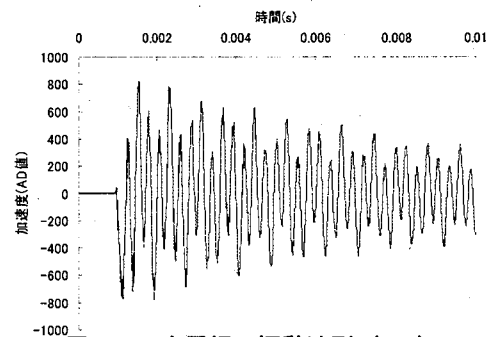


図-2 金属板の振動波形(40g)

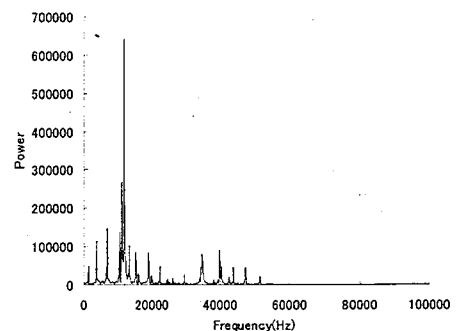


図-3 測定波形のパワースペクトル

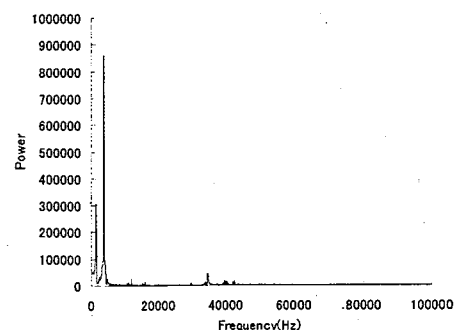


図-4 測定波形のパワースペクトル(40g)

衝突理論によると鋼球が弾性体へ衝突した時の接触時間は鋼球の半径 (R)、落下高さ (h) の関数で表される³⁾。一例として鋼球がコンクリート板に落下した時の接触時間 T_c と h, R の関係式を示す。

$$T_c = 0.00858 \frac{R}{h^{0.1}} \quad (1)$$

式(1)から、接触時間は落下高さの関数である衝突時の速度の影響を受けるものの、鋼球の半径 (=質量の 1/3 乗) が最も大きな支配要因であることが分かる。よって、礫でも同様に質量が大きいほど接触時間が長くなると推測される。

図-6 に各質量の礫に対して 10 回の落下実験を行ったときの平均の接触時間 Index (接触時間を 2,000 倍にした) と礫の質量の関係を示す。これより、接触時間によって衝突した礫の粒径 (質量から計算する) の推定が可能であると考えられる。

4. 単独の礫に対する落下実験のまとめ

前章の結果、金属板に衝突する礫の振動波形から以下の 2 種類の指標による粒径推定の可能性が示された。

- ① 礫の質量の違いにより金属板が共振する固有振動数が異なることを利用し、衝突時の波形 (パワースペクトル) からの礫の質量識別が可能である。
- ② 振動波形から直接測定した接触時間による礫の質量識別が可能である。

上記 2 種類の指標を実用的な点から検討した結果、波形処理が簡単である接触時間を採用することとし、集団で滑落する礫の実験結果を整理した。

5. 集団の礫に関する実験結果 (斜路実験)

混合粒径の粒度分布推定の可能性を示すため、流砂を模して質量が異なる 3 種類の礫を集団で流下させ、その振動波形を計測した。このときの波形の各ピークの数から礫の衝突した回数であり礫の個数となる (図-7)。この波形の各ピーク時における周期 (=接触時間) をゼロクロス法で求め (図-8)、その周期のヒストグラムを作成した (図-9)。

また、ほぼ均一な粒径での斜路実験から、大中小の粒径に対して卓越する接触時間の範囲を求めた。その結果、 $7 \times 100 \mu s$ 以上を大粒径、 $3 \sim 6 \times 100 \mu s$ を中粒径、 $3 \times 100 \mu s$ 以下を小粒径として、混合粒径の粒度分析を行った。結果の一覧表を示す (表-1)。大粒径と合計ではほぼ粒子数が一致する。しかし、中粒径では多く、小粒径では少なめに計量される傾向となっている。ほぼ均一な粒径での斜路実験により得られた、卓越する接触時間の範囲において、中小の粒径に対する分別が出来ていないことが原因のひとつと考えられる。

6. おわりに

中小の粒径分別を正確に行うため、サンプリング時間を小さくする等の課題はあるものの、今回の実験から、粒子数の計量及び粒径分離計測の可能性が示されたと考える。

参考文献

- 1) 久内忠ら: 現地計測によるハイドロフォンパルスと流砂特性との関係, 平成 17 年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 106~107, 2005.
- 他 2) 澤井健二ら: 衝突音による粒径別流砂量測定法に関する研究, 水工学論文集, 第 41 巻, pp. 991-996, 1997.
- 3) Nicholas J. Carino etc.: A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, ACI Journal, pp. 199-208, March-April 1986.

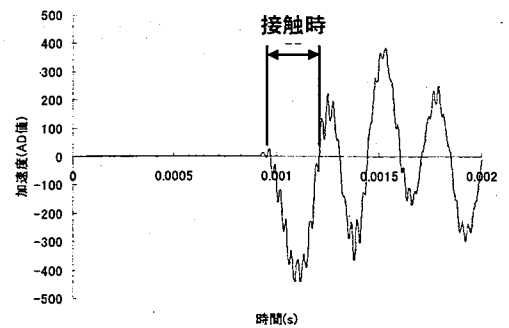


図-5 部分拡大した波形 (40g)

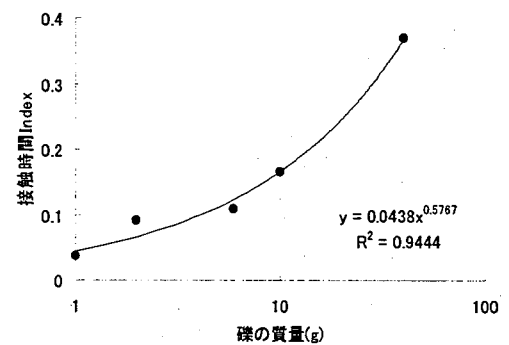


図-6 礫の質量と接触時間の関係

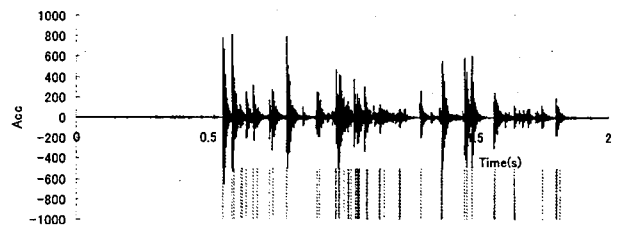


図-7 混合粒径の振動波形とピーク (53 個と判別)

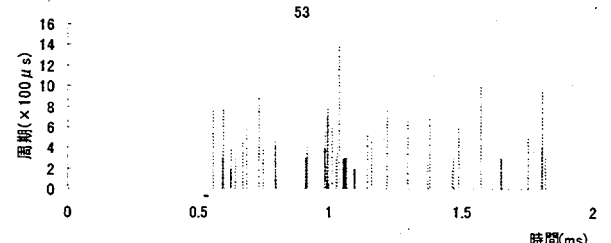


図-8 ピーク時刻近傍の波動の周期 (=接触時間)

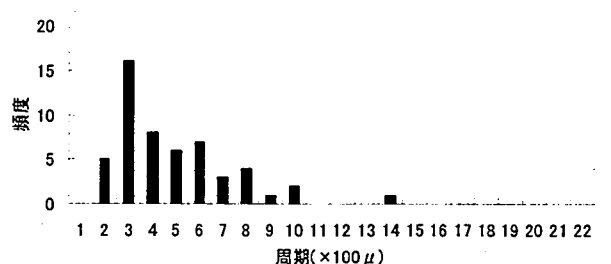


図-9 周期 (=接触時間) のヒストグラム

表-1 接触時間による頻度から推定した混合砂礫における各粒径の計測個数

試行回数		1回	2回	3回	4回	5回
大粒径	10個投入	11	16	29	12	10
中粒径	10個投入	25	19	26	17	12
小粒径	30個投入	17	7	16	16	8
計	60個投入	53	42	71	45	30