

接触時間を利用した流砂の粒径推定に関する実験的研究

日本大学生産工学部土木工学科 ○小田 晃

1. はじめに

河川・砂防計画の立案に必要な流砂量を効率的・経済的に計測するため、ハイドロフォンなどの間接的な計測方法が検討され、実際の河川でデータが収集されている¹⁾。これらの間接的な流砂量計測方法は現地での作業量が少なく経済的であり、今後さらにその利用が増加するものと考えられる。次の段階として、流砂の質である粒度分布を間接的に推定する方法が模索されている²⁾。

筆者は気中実験から砂礫の粒度分布を間接的に推定する方法を提案している³⁾。この方法は、砂礫と弾性体との衝突時に発生する弾性波から接触時間（礫が衝突した時の弾性波の第一波の半周期）を計測し、それを基に砂礫の粒径を推定している。砂礫の形状考慮の方法などの課題は残るものの、実施した条件内では推定した粒度分布がふるい分け試験の結果と概ね一致することが示された³⁾。そこで、この方法を流砂に適用し、簡単な解析手法で流砂の粒度分布の推定を試みたので報告する。

2. 実験概要

実験は幅 30cm、水路勾配 1/30 の矩形断面水路を使用した。この水路下流端にアクリル角材(500mm×30mm×30mm)を設置した(図 1)。アクリル角材底面には弾性波を計測するための防水型加速度計(TEAC 社製 ACCELEROMETER 611W)を取り付けた。実験は、単独礫を対象とした流下実験と、集団での礫を対象とした流下実験の 2 種類を実施した。両実験とも使用した砂礫は自然の礫である。単独礫の実験では質量が 0.57g～11.9g(中軸の最大は 20.5mm、最小は 5.2mm)の 10 個を使用した。集団での流下実験で使用した砂礫のふるい分け試験による粒度分布図を図 2 に示す。平均粒径は $d_m=11.7\text{mm}$ である。単独礫での実験砂の中軸範囲より最大径が若干大きくなっている。なお、両方の実験とも砂礫は水路下流端から 5.0m 上流断面より投入した。

弾性波はサンプリング時間 $2.0\mu\text{s}$ (500kHz)で計測した。単独礫の実験では礫が確実に移動するように予備実験から流量は $4244\text{cm}^3/\text{s}$ とした。集団の礫の流下実験では投入した礫をすべて流下させるため流量を $7050\text{cm}^3/\text{s}$ とした。

3. 流水中の単独礫と接触時間の関係

単独で流下させた砂礫の接触時間 T_c と粒径 d の関係を図 3 に、実験式を式(1)に示す。実験は 3 回実施した。粒径は礫を球体と仮定して質量から求めた直径とした。砂礫の密度は $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ である。

$$T_c = 18.665d^{0.6399} \quad (1)$$

図 3 で示されるように、 T_c と d の関係は同じ換算直径でも接触時間に差が見られる。この原因は、礫の形状や水路底面を転動する際の礫の経路（水路中央か水路壁面近くかなど）の違いによるものと思われる。同じ礫であっても、礫の移動速度が異なるとアクリル角材衝突時の速度が異なる。ここで、Carino ら⁴⁾による弾性体の衝突理論から導かれた鋼球の半径(r) とコンクリート板との接触時間(T_c) の関係を式(2)に示す。

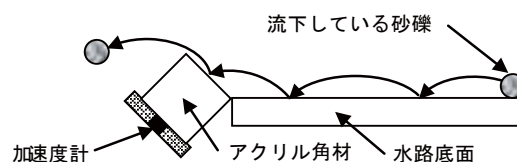


図 1 砂礫の流下実験略図

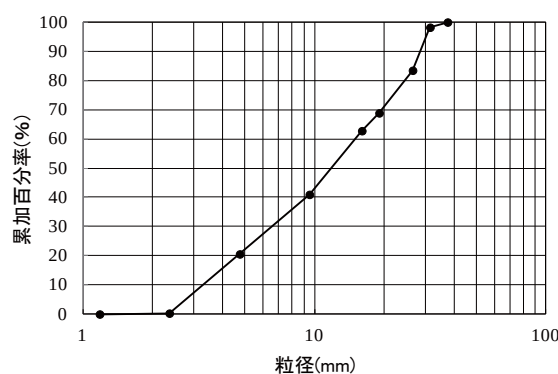


図 2 実験砂の粒度分布図

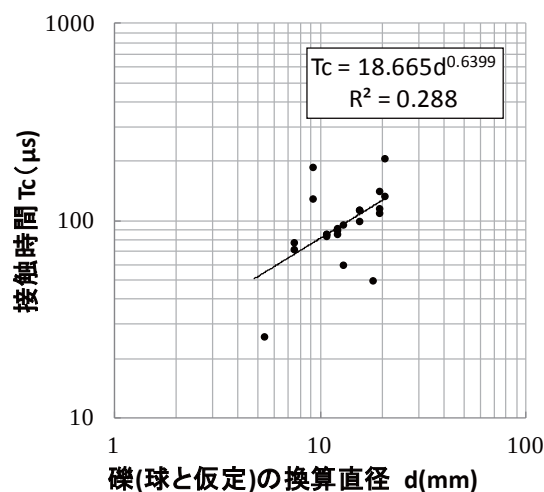


図 3 礫の直径と接触時間の関係

$$T_c = 0.0858 \frac{r}{h^{0.1}} \quad (2)$$

ここに、 h は鋼球の落下高さである。今回の実験で式(2)の落下高さに相当する因子は礫の速度である。このことから礫の衝突速度が T_c と d の関係に重要な因子であることが分かり、今回の実験値のばらつきの原因の一つが礫の衝突速度であることが予想される。

4. 集団の礫を用いた粒度分布の推定

4.1 礫が衝突した時のピークの判定

粒径推定は採取した弾性波のピーク時の接触時間を式(1)に代入して求めた。ピークの決定法は既往の研究成果と同様、二乗平均平方根を用いて処理した波形をもとにした。図 4 に集団の礫の流下実験による最初の礫が衝突した時の波形を示す。礫が衝突した時のピークは、波形の減衰状況を考慮して、ピーク前の谷部とピークの指標値が 2 倍以上の場合と仮定した。このピークの時間に一致する、処理前の波形のピークを含む半周期をゼロクロス法で求め接触時間とした。ピークの決定法については今後、検討する余地がある。なお、礫が衝突していない 0 秒から約 0.02 秒の振幅の指標が 0 ではない。流水による雑音記録されているものと考えられる。

4.2 粒度分布の推定

流量 $7050\text{cm}^3/\text{s}$ の流れ中に図 2 の粒度分布の砂礫を 2394g 投入した。この量は、データロガーの最大計測継続時間(10 秒)を考慮して決定した。実験は同じ礫を回収して 3 回繰り返した。粒度分布は、接触時間を基に式(1)から求まる粒径を用いて推定した。得られた粒径をふるい分け試験の粒径範囲に分けて個数を数えた(図 5)。なお、ふるい目を代表粒径とし、礫を球体として換算したときの砂礫の総質量は 3392g であった。図 5 に示されるように粒径が 31.5mm 以上と 2.36mm 以下の範囲における礫の個数が多い。集団で礫が流下した場合において、礫一つ一つの衝突時のピークの分別が良好でないと考えられる。

接触時間からの粒径推定結果とふるい分け試験の実測値との比較を図 6 に示す。推定した粒度分布の平均粒径は $d_m=19.6\text{mm}$ 、ふるい分け試験結果の平均粒径は $d_m=11.7\text{mm}$ であり大きく異なる結果となった。全体的に大きめの粒度分布図となっている。

5. おわりに

今回実施した方法で推定した粒度分布はふるい分け試験の結果と大きく異なる。解析的な課題として、礫の衝突時のピークの決定法、集団の礫の衝突波形から個別の礫が衝突した時の波形を抽出する方法等があげられる。また、実際の河川に適用する場合、流量は一定ではない。礫が衝突するときの速度が接触時間にどのように影響するのかについても検討を試みる予定である。

参考文献

1)鈴木拓郎ら：流砂観測データベースシステムの構築とハイドロフォンの観測事例について，平成 23 年度砂防学会研究発表会概要集,pp.336-337, 2011. 2)小田晃ら：接触時間を用いた掃流砂の粒度分布の推定について，平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集,pp.520-521, 2012. 3)小田晃ら：弾性波を用いた河床材料の粒度分布推定法に関する実験的研究，平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集,pp.34-35, 2010. 4) N.J.Carino et al., A Point Source-Point Receive, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, ACI Journal/March-April 1986, (1986) p.199-208.

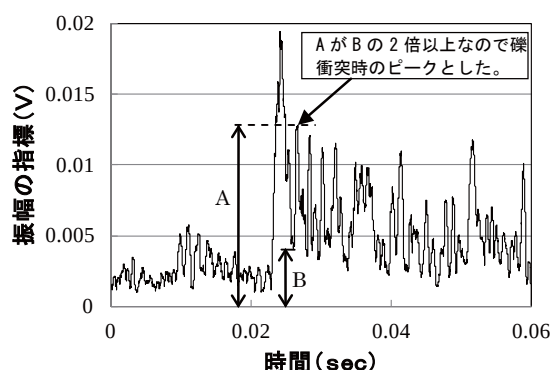


図 4 二乗平均平方根処理後の弾性波

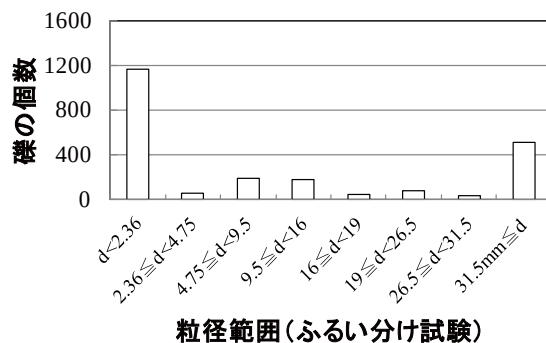


図 5 各粒径範囲における礫の個数

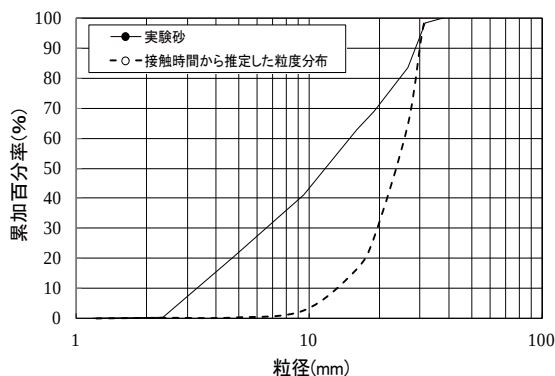


図 6 粒度分布の比較