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

日本大学生産工学部土木工学科　○小田　晃・落合　実・遠藤茂勝
日本大学大学院生産工学研究科　平野雄也・渡邉真矩

1.はじめに

粒径を自動計測する方法は粉体工学の分野において研究されてきた。現在，レーザー回折・散乱法等が開発され，専用の計測機器も実用化されている[1)]。しかし，これらの計測で対象とする粒径はμm 単位以下の非常に細かい粒子(粉体)を対象としたものである。一方，河川・砂防の分野で対象とする粒子(砂礫)の径は mm 単位以上がほとんどであり，計測方法はふるい分け試験が主である。しかし，この方法は現場からの試料運搬や砂礫を乾燥させる等の作業を必要とするので時間と費用がかかる。そのため，現場において簡易的に粒径を推定する方法が模索されている。そのひとつとして画像解析による間接的な粒径推定方法が内尾ら[2)]により提案されている。画像解析は非常に簡易であり，河床表面の砂礫粒径の推定に有効である。しかし，河川・砂防分野で標準化されている掘削砂礫を採取・分析する方法とは若干結果が異なってくると考えられる。

本研究は，既報[3)]の，砂礫の金属板衝突時に発生する弾性波を用いた河床材料の粒度分布推定法を確立するため，この方法の課題点である，礫(今回はガラス球)が集団で衝突する場合の個数の評価について検討した。

2.実験概要

ガラス球と石球を流下させる斜路は長さ 1.8m，角度 20 度の木製斜路である。斜路下流端の直下 2.5cm に加速度計を取り付けたステンレス鋼板(以下，鋼板。寸法は長さ 300mm×幅 100mm×厚さ 25mm)を防振材の上に設置し，落下してくるガラス球と石球を衝突させた。ガラス球と石球は斜路下流端から 20cm 上流断面～流下させた。使用したガラス球(平均の密度 2.53g/cm^3)と石球(平均の比重 2.70g/cm^3)の諸元を表 1 に示す。各 No.のガラス球の諸元は実験に使用した球(10 個)の平均値である。なお，ガラス球と石球の衝突時に金属板に生じる弾性波はサンプリング時間 2.5μs(400kHz)として加速度計で計測した。

表 1 ガラス球と石球の諸元

	No.	直径 d(mm)	重量 W(N)
ガラス球	1	12.5	0.0251
	2	16.9	0.0625
	3	24.5	0.190
石球	4	11.0	0.0187
	5	29.6	0.356
	6	48.7	1.60
	7	69.3	10.5

3.単独の球の流下実験結果

礫の個数の評価の前に，今回使用するガラス球の弾性波による解析が妥当であるのか，接触時間を用いて確認する。比較には河床材料とほぼ同じ材質である石球を用いた。Hertz 理論によれば鋼球がコンクリート板に落下した時の接触時間(T_c)は式(1)の関係で表わされる[4)]。

$$T_c = 0.00858 \frac{R}{h^{0.1}} \qquad \text{m-s 単位} \qquad (1)$$

ここに，R は鋼球の半径，h は落下高さであり，係数(=0.00858)は弾性体の密度などの物性値で決定される値である。接触時間はガラス球ならびに石球が鋼板に衝突した際の弾性波の第一波の一周期と定義した。図 1，2 に石球とガラス球の直径 d ならびに重量 W と接触時間の関係を示す。また，図 1 には式(1)の理論値も比較のため示した。

図 1, 2 より今回使用したガラス球と石球はほぼ同じ傾向であることが示された。理由としては，両者の比重が大きく変わらなかったためと考えられる。この結果から接触時間は流下する球の材質には大きく影響されないと考えられる。このことは，比重に大きな差がなければ河床における様々な種類

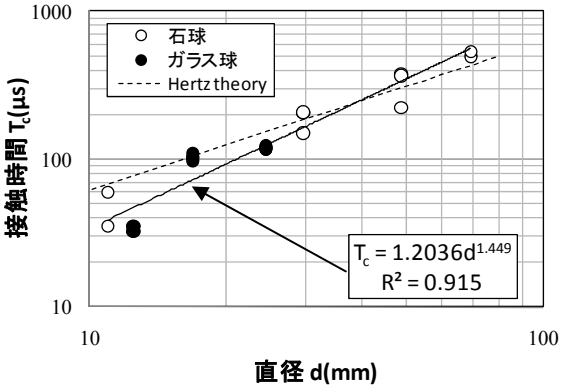

図 1 直径 d と接触時間 T_c の関係

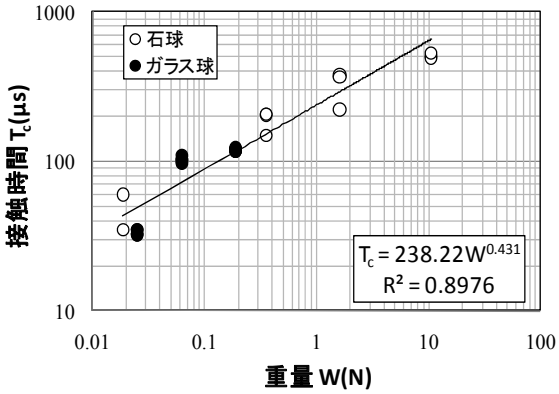

図 2 重量 W と接触時間 T_c の関係

の礫に対して今回提案した方法が有効であることを示唆している。また，実験結果は式(1)と異なり T_c が d の 1.4 乗に比例する関係が示された。衝突する弾性体の物性値(密度など)が大きく異なるためと考えられる。

4.複数のガラス球の流下実験結果

図 3・上に No.3(d=24.5mm)のガラス球を 5 個流下させた場合の振動波形を示す。ガラス球は斜路流下方向に一列に配置した。また，図 3・下に衝突回数の計測を容易にするため振動波形を二乗平均平方根(RMS)で処理した波形も示す。各ピークがガラス球の衝突回数であり，その回数は 5 回であることが分かる。すべてのガラス球が 0.3sec の間に衝突したにもかかわらず，正確な個数がカウントできることが示された。

図 4 は No.3(d=24.5mm)のガラス球を 10 個流下させた場合の RMS 処理後の波形である。ガラス球は斜路流下方向に 5 個ずつ二列に配置した。ピークの数は 12 回となり，流下させた球の個数である 10 個より多い。高速度カメラによる映像から，この条件では後続の礫が前方を流下・移動している礫に衝突して，一部の礫が複数回，鋼板に衝突する様子が観察された。その結果，流下させた球の数である 10 個よりも多い衝突回数がカウントされた。

図 5 は No.1～3 のガラス球を各 3 個流下させた場合の RMS 処理後の波形である。このケースは球の合計数が 9 個であるが，ピークの数は 8 回となり流下させた球の個数より少ない。径の大きな礫が衝突した時の振幅が，それよりも小さい直径の礫が衝突した時の振幅を記録できる程度まで減衰しなかったことが原因と考えられる。

また，同一径の球を流下させた図 3 と図 4 では時間の経過とともに振動波形の振幅が小さくなる傾向が示された。これは，後続の礫が前方の礫に衝突するため，鋼板に衝突する際の速度が低下したことによると考えられる。なお，図 5 のケースは, 最も直径が小さい No.1 の球を下流側に配置して流下させたため，計測初期の振幅が小さい。

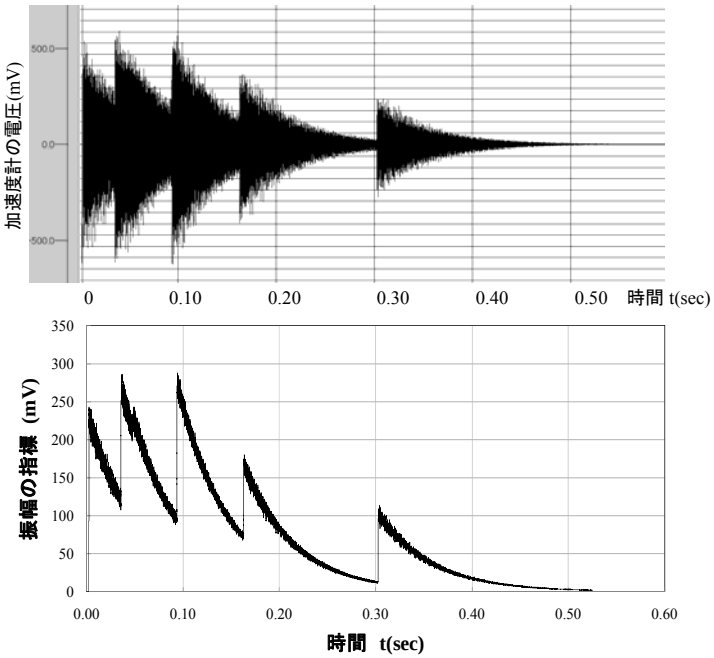

図 3 ガラス球(No3 を 5 個)の振動波形(上)と処理波形(下)

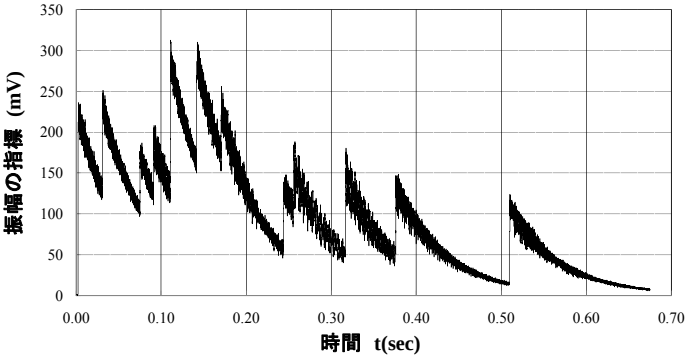

図 4 ガラス球(No.3 を 10 個)の処理波形

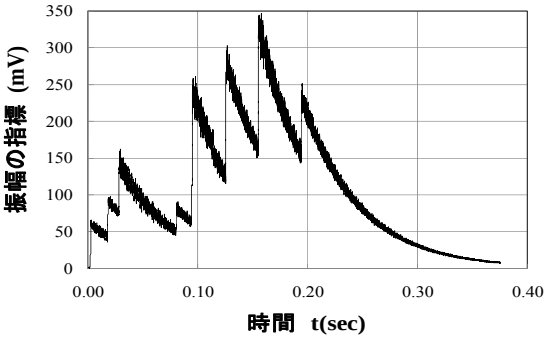

図 5 ガラス球(No.1～3 を各 3 個)の処理波形

5.おわりに

ガラス球が河床材料とほぼ同じ材質である石球と同等に弾性波による解析が妥当であることを確認した。また，ガラス球が複数衝突する場合の球の個数の評価が弾性波を用いて可能であることを示した。今後の進め方として，流下させた礫が金属板に複数回衝突しない工夫と, 大径礫衝突後の弾性波の減衰をより早めて後続の衝突波を計測する工夫を行う予定である。なお、本研究は文部科学省科学研究費補助金、挑戦的萌芽研究(研究代表者小田晃、No.21656123)の助成を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

1)粉体工学会編:粒子径計測技術，日刊工業新聞社，pp.18-27，1994.
2)内尾ら:画像処理方式による礫床河川の粒度分布測定装置の開発，砂防学会誌，Vol.58，No.2，pp.26-31，2005.
3)小田ら: 礫の接触時間を利用した粒度分布の推定法，平成 18 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.84-85，2008.
4)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.