

捨石群の沈降挙動(その1. 沈降碎石の抵抗係数)

大阪市立大学工学部 正 員 小田一紀
 大阪市立大学大学院 学生員 角谷広樹
 東洋建設(株)技術研究室 正 員 遠藤正男

1. まえがき

混成防波堤の基礎マウンドは石運船から捨石を大量投入した後、潜水作業によって所定の断面形に整形して築造されるのが一般的であるが、大水深海域では捨石の散乱範囲も広くなり、また潜水作業もはるかに困難になるので、できる限り無駄なく所定の断面形になるような投入計画を立てなければならない。このためには石運船から投入される捨石粒子群の沈降・拡散・堆積挙動を究明し、堆積形状を正確に予測する手法を確立する必要がある。土砂粒子の沈降・拡散挙動に関する研究は筋内¹⁾、Alger²⁾、吉川ら³⁾、その他^{4), 5), 6)}によって比較的数量多く行われているが、それらの研究の大部分は粒径 $2\sim 3\text{mm}$ 以下の微細粒子を対象としたものであり、比較的大きな粒子を対象としたものは極めて少ない。

捨石粒子群の堆積形状の予測には粒子群の拡散特性と沈降速度の究明が不可欠である。本報では、それらの究明の前段階として粒径の大きな単一碎石粒子の抗力係数を調べたので、その結果を報告する。

2. 実験方法と解析方法

1) 使用水槽 実験は大阪市立大学工学部河海工学研究室の大型コンクリート水槽($60\text{m}\times 10\text{m}\times 2.5\text{m}$ 、以後A水槽と呼ぶ)の一部(幅 2m 部分)と東洋建設(株)技術研究所の鋼製水槽($4.5\text{m}\times 4.5\text{m}\times 3.5\text{m}$ 、以後B水槽と呼ぶ)を用いて行った。水深は前者では 1.5m 、後者では 3.0m にした。

2) 粒子材料 使用した粒子材料はコンクリートなどの骨材に用いられる碎石で、主に花崗岩質、石英閃緑岩質から成り、比重は $2.60\sim 2.67$ である。形状は一般に角ばっており、捨石材料として使われる割石の形状と類似している。大きさは最大寸法が $1.2\sim 11.6\text{cm}$ 、重量が $87\sim 295\text{gf}$ の範囲にあり、B水槽では大きめの粒子を用いた。

3) 粒子の大きさと形状の表現

碎石粒子の大きさは粒子の外接直方体の各辺の長さをノギスで測定し、長い順に a 、 b および c として表わした。形状の表現には従来から色々な無次元指数が用いられているが本研究では碎石の形状特性を比較的うまく表わすものとして、Coreyの形状係数(Corey's shape factor) $SF = c/\sqrt{ab}$ および著者らが今回新しく提案する方形係数(Block coefficient 普通船体形状を表わすのに用いられている) $C_b = V_0/abc$ (V_0 : 碎石の体積)を採用した。

4) 抵抗係数の算定法

水中落下する碎石粒子は剥離渦によって横滑り、回転、ロッキングを生じ定常ではないが、観測時間スケール内で諸量を平均化すると鉛直方向の粒子の運動方程式は鉛直運動が卓越しているとみなせる場合に次式で表わせる。

Kazuki ODA, Hiroki KADOYA, Masao ENDO

$$(m_0 + \bar{m}_a) \ddot{z} = (m_0 - m_w)g - \frac{1}{2} \rho \bar{C}_D A \dot{z}^2 \quad (1)$$

ここに、 m_0 : 粒子質量, $\bar{m}_a$: Z軸(鉛直軸)方向の運動に対する粒子の時間平均的付加質量, m : 粒子と同体積の水の質量, g : 重力加速度, ρ_w : 水の密度, $\bar{C}_D$: Z軸方向の運動に対する粒子の時間平均的抗力係数, A : 代表的な粒子の投影面積, $\dot{z}$, $\ddot{z}$: Z軸方向の粒子速度と加速度。

(1)式を解いて、水深 H と落下時間 T を与えると抗力係数 $\bar{C}_D$ は次式で求められる。

$$\bar{C}_D = \frac{V_0(\rho_0 - \rho)(\alpha^2 T^2 - H \ln 4 + \alpha T \sqrt{\alpha^2 T^2 - 2H \ln 4})}{\rho A H^2} \quad (2)$$

ここに、 ρ_0 : 粒子密度, $\alpha = \sqrt{(\rho_0 - \rho)g/(\rho_0 + \bar{C}_a \rho)}$, $\bar{C}_a$: 時間平均的付加質量係数。但し、このとき $\bar{C}_D$ は水面から水底まで一定とみなしている。

また、 $\dot{z}$ が終速度 $\bar{w}_0$ に達しているときとみなせるときは $\bar{C}_D$ は次式で求められる。

$$\bar{C}_D = 2V_0(\rho_0 - \rho_w)g / \rho_w A \bar{w}_0^2 \quad (3)$$

以上のように抗力係数を求めるには落下時間 T を計って(2)式から求める方法と投下後時間平均的に定常運動をしているとみなせる区間の平均落下速度 $\bar{w}_0$ を計測して、これを終速度 $\bar{w}_0$ とみなして(3)式から求める方法とがある。

A水槽の実験では、水面と水底に歪ゲージを用いた感知装置を設置し、そのパルス出力をオシロペーパーに記録して落下時間 T を測定し、(2)式から $\bar{C}_D$ を求めた。このとき時間平均的付加質量係数 $\bar{C}_a$ として近似的に礫石粒子と同体積を有する球の付加質量係数を採用した。B水槽では落下時間が比較的に長いので、ストップウォッチで落下時間を計り、(2)式から求める方法と、水面下1.6mから水底までの通過時間をストップウォッチで計り、その間の平均速度を $\bar{w}_0$ とみなして(3)式から求める方法の2つを採用した。B水槽における予備の実験によって(2)式から求められる抗力係数の値は(3)式から得られるものより最大20%程度小さいが、平均的にはその差は僅かであることが認められたので、今回の解析には両方法による値を区別なく用いた。

5) 投影面積の採り方

投影面積の採り方は前述の粒子形状の表わし方と関連性があり、Reynolds数の定義式と共に表-1に表わす。

表-1 投影面積等の採り方

方 法	形 状 特 性	投 影 面 積	Reynolds 数
Coreyn方法	$SF = C/\sqrt{ab}$	$A = \pi d_n^2/4$	$Re = \bar{w}_0 d_n / \nu$
着うら方法	$Cb = V_0/abc$	$A = ab$	$Re = \bar{w}_0 \sqrt{ab} / \nu$

ここに、 d_n : 礫石粒子と同体積の球の直径。

表-1におけるRe数の計算に用いる終速度 $\bar{w}_0$ は、落下時間 T の計測から抗力係数を求めた場合はその抗力係数 $\bar{C}_D$ の値を $\bar{w}_0 = \sqrt{2V_0(\rho_0 - \rho_w)g/\rho_w \bar{C}_D A}$ に代入して逆算した値を用いた。

3. 実験結果とその考察

1) Coreyの方法による抗力係数

図-1はCoreyの方法によって求めた各種捨石粒子の抗力係数 $\bar{C}_D$ とRe数の関係を表わしたものである。なお、図には高橋らが水深約23mの海域で実施した実物捨石の現場実験の結果

果をも併せて記入した。図-1によると、着者らの水槽実験による碎石粒子の抗力係数 $\overline{C_D}$ は $2 \times 10^3 < Re < 4 \times 10^4$ の範囲においてほぼ1.0~3.0の間に大きくばらついており、実物捨石の $\overline{C_D}$ の値も $7 \times 10^3 < Re < 4 \times 10^6$ の範囲で0.9~2.7の間に分散しているが、平均的な値は Re 数が 10^4 附近で少し減少する傾向が見られるから全体的に Re 数にあまり関係なく、ほぼ一定値を示している。図-1における $\overline{C_D}$ のばらつきは沈降過程における粒子運動の不規則性が1つの原因であると考えられるが、 $\overline{C_D}$ が粒子の形状に大きく依存することがばらつきの要因であることも事実である。図-2は図-1と同じデータに基づいてCoreyの方法による $\overline{C_D}$ と形状係数 SF の関係を示したものであるが、明らかに $\overline{C_D}$ と SF の相関性が見られ、 SF の値が大きくなるに伴って $\overline{C_D}$ は平均的に約1.2に漸近する傾向が認められる。

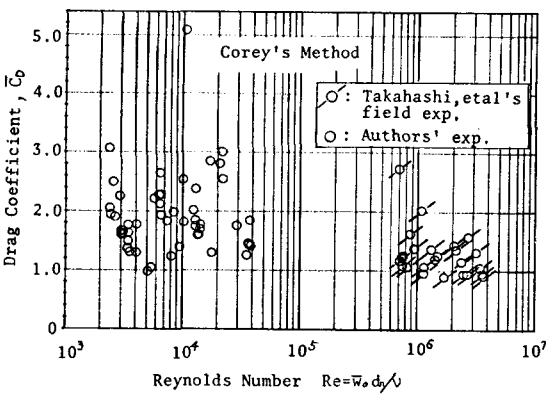


図-1 Coreyの方法による抗力係数と Re 数の関係

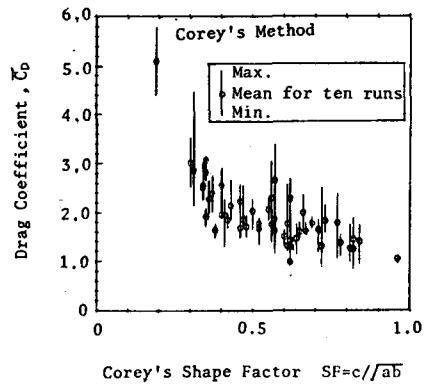


図-2 Coreyの方法による抗力係数と形状係数の関係

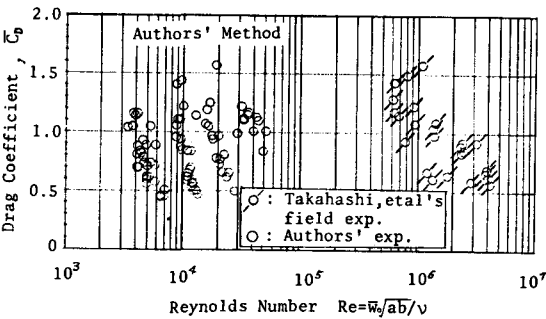


図-3 着者らの方法による抗力係数と Re 数の関係

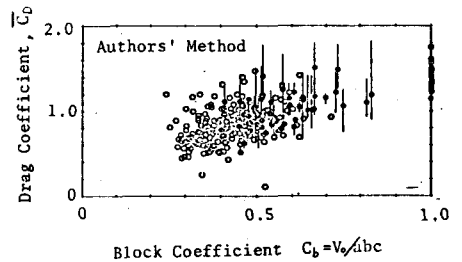


図-4 着者らの方法による抗力係数と方形係数の関係

2) 着者らの方法による抗力係数

図-3は着者らの方法によって求めた $\overline{C_D}$ と Re 数の関係を、また図-4は $\overline{C_D}$ と粒子の方形係数 C_b との関係を表わしたものである。 $\overline{C_D}$ の値のばらつきについてはCoreyの方法で求めた場合と同様な傾向が見られ、 $\overline{C_D}$ の値は0.5~1.5の間に分散しているが実物捨石の実験結果をも含めて $3 \times 10^3 < Re < 4 \times 10^6$ の Re 数の広い範囲でその平均値はほぼ1.0程度の一定値を示し、図-1

の Corey の方法による場合に見られた $Re \approx 10^4$ 付近における減少傾向は見られない。また、図-4 に示すように、ばらつきは大きいが $\overline{C_b}$ の平均値と形状特性を表わす方形係数 C_b との間には一定な相関性が認められ、 C_b の増大と共に $\overline{C_b}$ の値はほぼ 1.4 程度の値に漸近する傾向が見られる。

以上のように著者らの方法によれば Re 数が模型実験から現地実験の広い範囲にわたってその平均値がほぼ一定値を示し、また方形係数 C_b ともある一定な相関性を有し、且つ $\overline{C_b}$ の値の変動幅も Corey による方法より狭いので Corey の方法よりも実用的であると思われる。また、実験の観察によれば粒子は投影面積が大きくなるような姿勢で沈降する場合が多く、この点からも投影面積として $a \times b$ を採用する著者らの方法は物理的合理性が高いと考えられる。

4. あとがき

以上本研究では捨石粒子群の沈降・拡散・堆積挙動を予測するための基礎的知見を得る目的で、単一礫石粒子の沈降時の抵抗係数と Re 数および形状特性との関係を調べた。その結果、沈降する礫石または捨石の抵抗係数は、著者らの表わし方によれば $3 \times 10^4 < Re < 4 \times 10^4$ の範囲においてその平均値は Re 数に無関係で方形係数 C_b の値によって定まることがほぼ判明した。このことは、この種の沈降粒子の模型実験の相似律を考える上で貴重な指針を与えるものと思われる。

<参考文献>

- 1) 箭内寛治：砂および礫の水中落下の散らばりに関する研究—静水中における場合—土木学会論文集，第69号，PP. 51～57，1960.
- 2) G. R. Allen : Fall Velocity of Irregular Shaped Particles, Journal of H.D. Proc of A.S.C.E., PP. 721～737, 1968.
- 3) 吉川秀夫・福岡捷二・吉川勝秀：流体と固体粒子の相互作用に関する研究，土木学会論文報告集，第260号，PP. 89～100，1977.
- 4) 小川元・竹内益雄：土捨船による投棄土砂の分散，土木学会論文報告集，第161号，PP. 39～49，1969.
- 5) 桑野定義・他：土捨船投下土砂の分散滞積実験例，農業土木学会論文集，第47号，PP. 56～61，1973.
- 6) 河野二夫・藤田智康：水中を落下する固体粒子の散らばりに関する研究，第27回海岸工学講演会論文集，PP. 230～234，1980.
- 7) 高橋英俊・他：捨石の水中落下速度について，港湾技研資料，No. 249，1976.