

大阪市立大学大学院 学生員 〇角谷広樹
大阪市立大学工学部 正 員 小田一紀
東洋建設㈱技術研究室 正 員 遠藤正男

1. まえがき 最近、大水深海域に防波堤が建設されることが多くなってきたが、このような海域では基礎捨石マウンドの築造は投入砕石の広い範囲への拡散や潜水作業の困難さの故に従来の浅い水深域におけるそれに比べてはるかに労力を要することになる。このため石運船からの投入砕石粒子群の沈降・拡散・堆積の挙動を究明し堆積形状と精度よく予測できる手法の確立が望まれている。

土砂粒子の沈降・拡散挙動に関する研究は前内¹⁾、Alger²⁾、吉川³⁾、その他^{4)~7)}によって比較的多く行われているがそれらの大部分は粒径2~3mm以下の微粒子を対象としたものであり、大きな粒子を対象としたものは河床礫を取扱ったAlgerと実物捨石による港湾技術研究所の高橋らの研究があるのみである。

本報では、捨石粒子群の堆積形状を予測する研究の第一段階として比較的大きな単一砕石粒子を対象として静水中を落下するときの懸掛けの抗力係数とReynolds数の関係を調べたので、港研の現場実験の結果と合わせて報告する。

2. 実験方法と解析方法

1) 実験方法 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(60m×10m×2.5m、以後A水槽と呼ぶ)の一部(幅2mのガラス壁部分)と東洋建設㈱技術研究所の鋼製水槽(4.5m×4.5m×3.5m、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とした。用いた粒子材料は骨材用の砕石で、比重2.60~2.67、最大寸法1.2~10.6cm、重量8.7~295gの範囲のもので、B水槽では大きめの粒子を用いた。

砕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。

2) 解析方法 静水中を落下する砕石粒子は横滑り回転、ロッキングを生じ、不規則な挙動を示すが、時間平均的な取扱いをすると鉛直方向の運動方程式は運動が

鉛直方向に卓越しているとみなすと次式で表わされる。

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

ここに、 m_0 : 粒子質量、 $\bar{m}_a$: Z軸(鉛直軸)方向の運動における時間平均的付加質量、 m_w : 粒子と同体積の水の質量、 g : 重力加速度、 ρ : 水の密度、 $\bar{C}_D$: Z軸方向の運動における時間平均的抗力係数、 A : 粒子の投影面積、 $\dot{z}$, $\ddot{z}$: Z軸方向の粒子速度および加速度。

(1)式の解に水深Hとこれを落下するに要する時間Tの測定値と与えると時間平均的抗力係数(懸掛けの抗力係数) $\bar{C}_D$ は次式で逆算される。但し、 $\bar{C}_D$ は落下途中では一定と仮定している。

$$\bar{C}_D = V_0 (\rho_0 - \rho) [\alpha^2 T^2 - H b_2 4 + \alpha T \sqrt{\alpha^2 T^2 - 2 H b_2 4}] / \rho A H^2 \quad (2)$$

ここに、 ρ_0 : 粒子密度、 $\alpha = \sqrt{(\rho_0 - \rho)g / (\rho_0 + \bar{C}_D \rho)}$ 、 $\bar{C}_a = \bar{m}_a / m_0$: 時間平均的付加質量係数。

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

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

A水槽の実験では水面と水底に歪ゲージを用いた投下および着底感知装置を設置し、そのパルス状出力をオシログラフ上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。このとき式中の $\bar{C}_a$ として近似的に砕石粒子と同体積を有する球の付加質量に相当するものを用いた。また、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水面から水底までの落下時間を計り(2)式で求める方法と、水面下1.6mから水底までの通過時間を計り、それから平均速度を求めこれを終速度 $\bar{w}_0$ とみなして(3)式から算定する方法の2つを採用した。(2)式から求められる $\bar{C}_D$ の値は(3)式から求められるものより20%程度小さい値を示す場合があったが平均的にはその差は10%以内であったので、今回の解析

には両式による値を区別なく用いた。

投影面積としては、落下挙動の観察の結果、鉛直軸に垂直な面への投影面積が最大になるような姿勢で落下する場合が多いことから $A=a \times b$ を採用し、Reynolds 数は $Re = \bar{w}_0 A / \mu$ (μ : 水の動粘性係数) で定義した。

3. 実験結果と考察

以上のようにして求めた各種形状の碎石粒子の $\bar{C}_D$ と Re の関係を表わすと図-1 に示すとおりである。図には港研の高橋らの水深 23m の海域で実施した実物碎石の現場実験のデータを用いて (3) 式から求めた結果をも記入した。図-1 によると著者らの実験値は $3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^4$ の間で $\bar{C}_D \div 0.5 \sim 1.5$ に分散しているが、 $6 \times 10^3 < Re < 4 \times 10^6$ の範囲にある実物実験の結果もほとんど同じ範囲の $\bar{C}_D$ 値を示している。 $\bar{C}_D$ の値は一般に粒子の形状と Re 数に依存するが、水槽実験における碎石粒子と現場実験における捨石粒子の形状はほぼ類似していると考えられるので、図-1 の結果は、大局的には $3 \times 10^3 < Re < 4 \times 10^6$ の実験の Re 数の範囲内では $\bar{C}_D$ が Re 数にほとんど依存しないことを示唆していると考えられる。

$\bar{C}_D$ と粒子形状との関係を把握するため形状特性を表わすパラメーターとして $C_b = V_0 / abc$ (V_0 : 粒子体積) で定義される方形係数を用いて $\bar{C}_D$ との関係と求めた。その結果は図-2 に示すとおりである。図中の縦線に黒丸印は同一粒子を 10 回投入して得られた $\bar{C}_D$ の最小値と最大値の範囲および平均値を示したものであり、他の白丸は各種形状粒子の 1 回投入による値を示している。この図から同一粒子でも沈降過程における不規則性によって $\bar{C}_D$ 値は大きく変動するが、全体の平均値は方形係数 C_b と一定な相関性が認められ、 C_b の増大と共に増大する傾向を見せ、 $C_b = 1.0$ の直方体模型に対して最大値を示し、その平均値はほぼ $\bar{C}_D \div 1.4$ である。大局的に $\bar{C}_D$ と C_b の関係を表わす実験式は $C_b \geq 0.2$ の範囲において (4) 式のように求められる。

$$\bar{C}_D = 1.5 \sqrt{C_b - 0.12} \quad (4)$$

(4) 式を (3) 式に代入して沈降速度 $\bar{w}_0$ を求めた実験値と比較すると図-3 に示すように (4) 式による計算値 $(\bar{w}_0)_{cal}$ は実験値 $(\bar{w}_0)_{exp.}$ と平均的によい一致を示している。

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碎石粒子の沈降時の抗力係数と Reynolds 数および形状特性との関係を調べた。その結果、沈降する碎石の抗力係数は $3 \times 10^3 < Re < 4 \times 10^6$ の範囲において、その平均値は Re 数にほとんど無関係で、形状のみに依存することと認められた。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。

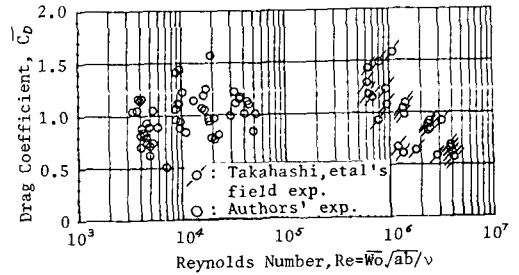


図-1. 単一沈降碎石の $\bar{C}_D$ と Re 数の関係

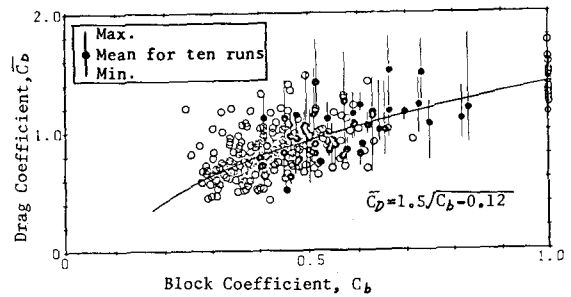


図-2. 単一碎石粒子の $\bar{C}_D$ と C_b の関係

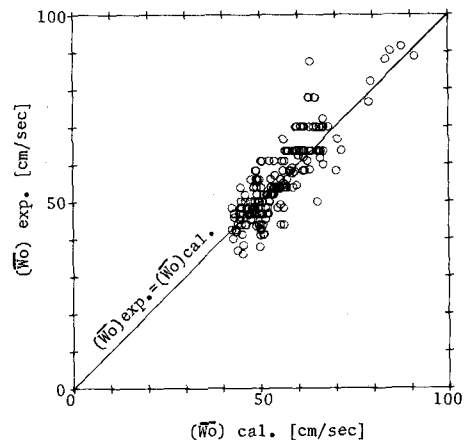


図-3. 単一碎石粒子の沈降速度の計算値と実験値の比較

〈参考文献〉 1) 前内: 砂および礫の水中落下の散らばりに関する研究, 工機論 69 号, 1960. 2) G.R. Alger: Full Velocity of Irregular Shaped Particles, J. Hydr. ASCE 106 8, 1968. 3) 吉川・植田・吉川: 流体と固体粒子の相互作用に関する研究, 工機論 260 号, 1977. 4) 小川・竹内: 土堆船に 53 枚葉工型翼の分散, 工機論 16 号, 1969. 5) 桑野他: 土堆船に 53 枚葉工型翼の分散・沈降実験報告, 東京大学工学部, 49 号, 1973. 6) 河野・植田: 水中で落下する固形粒子の散らばりに関する研究, 27 回発表, 1980. 7) 高橋他: 捨石の水中落下速度について, 筑研資料 No. 249, 1976.