

京都大学工学部 正員 大坪 国順
京都大学工学部 正員 中川 博次

1. まえがき 近年、海洋に大型構造物が建設されることが増えているが、潮流の強い所では、下部工の局所洗掘に大きな問題がある。局所洗掘の防止や軽減に捨石工が有効であることが認められている。潮流が大よ水深の大よ海洋に捨石工を施工する際、確実性、経済性の見地から、捨石のバラツキの重大な問題である。本研究は捨石の潮流中での拡散特性に関する基礎資料を得るために、種々の実験条件のもとでの捨石の分布特性を実験的に明らかにし、その結果について、若干の理論的考察を加えて示す。

2. 実験条件および方法 実験に用いた粒子はビーズ(直径5mm, 比重2.4)と砂粒(直径4.5mm, 比重2.61)の2種類である。投下方法はピンセットとバケツとの2方法である。実験条件を表-1に示す。こゝでは一度に落下した粒子の個数、 N は試行回数である。Rexは $U_{max} d / \nu$ で計算されるレイノルズ数である。 U_{max} は流水の平均流速分布の最大値である。粒子は定められた水面から投下し、粒子が床面に到達した時の粒子の平均流下距離 $\bar{x}$ 、標準偏差 σ 、尖度 K を求めた。解析の際、 x 方向は流れの方向、 y 方向は横断方向でバケツの開閉方向、 z 方向は鉛直方向とした。また各実験条件において粒子の運動をストロボ撮影し、その軌跡から粒子の x, y 方向の速度を求めた。

3. 実験結果と考察 (1) 粒子の終末沈降速度 静水中の終末速度は、単一の場合、ビーズが49.7cm/s, 砂粒が32.64cm/sである。終末沈降速度を与え式から抗力係数を逆算するとビーズで0.38, 砂粒で0.89となる。砂粒の場合、球とみなした時の見かけの C_D である。 $U_{max} d / \nu$ で計算したレイノルズ数は、ビーズで2480, 砂粒で1470である。複数個落下の場合、 U_{max} は単一の場合に比してビーズで2%, 砂粒で3%減少した。また、流水中の U_{max} は流水の平均流速に比し、ビーズで10%, 砂粒で4%減少した。2の場合 C_D を逆算すると、ビーズが0.45, 砂粒が0.95となる。 C_{Df}/C_D はビーズで1.18, 砂粒で1.06となる。粒子が終末沈降速度となるのは、どの場合でも水面下数cmのところであった。

(2) 粒子の平均流下距離特性 粒子の平均流下距離 $\bar{x}$ は、落下個数 n 、落下方法等に関らず、流水の平均流速 U_{max} が一定であれば、同一になることが認められた。 $\bar{x}/d$ (d : 粒径) と U_{max}/U_0 の関係は図-1に示されている。 $\bar{x}/d$ と粒子の種類に関係なく、 U_{max}/U_0 と直線関係にあることがわかった。図-2の $\bar{x}/d$ と $U_{max} H / U_0 d$ の関係を表わしたものである。今回の実験範囲内では、 $\bar{x}$ は $U_{max} H / U_0$ と10%の誤差範囲内で一致することが認められた。次に流水中で降下する粒子の抗力係数 C_{Df} を明らかにするために、流水中で運動する粒子の運動方程式をベクトルで表わす。

表 - /

Damped by Pincette

u_m (cm/s)	H (cm)	n	N	R_{ex}
0.0	20.0	1	200	
7.86				436
12.53				716
17.86				1019
20.65				1180
28.51				1630

Damped by Bucket

u_m (cm/s)	H (cm)	n	N	R_{ex}
0.0	20.0	1	200	
		5	100	
		10	100	
12.53		1	200	716
		5	100	
		10	100	
17.86		1	200	1019
		5	100	
		10	100	
28.51		1	200	1630
		5	100	
		10	100	

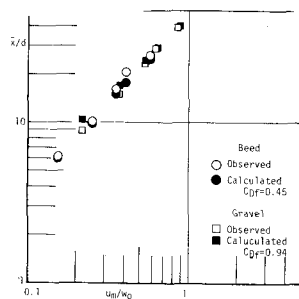


図 - /

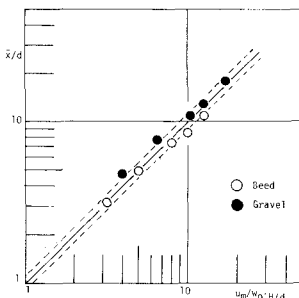


図 - 2

$$(M + C_H m) \frac{dU}{dt} = -\frac{1}{2} \rho A_2 d^2 C_{Df} |U_g - U(z)| (U_g - U(z)) + (M + m) g k \quad (1)$$

こゝで: M : 粒子の質量, m : 粒子と同体積の流体の質量, C_H : 付加質量係数, $(M + C_H m)$: 仮想質量, ρ : 流体の密度, A_2 : 面積に関する形状係数, C_{Df} : 断面流水場の粒子の抗力係数, $U(z)$: 水面から z の位置での流水の平均流速

g : 重力加速度, U_g : 粒子の速度ベクトル, i : x 方向単位ベクトル, k : y 方向単位ベクトルである。いま粒子を球と見ると、 $C_H = 1/2$, $A_2 = 1/4$ と仮定。

U_g の x, y 方向成分を U_{gx}, U_{gy} とし、(1)式を成分に分けると、次の2式を得る。

$$(M + C_H m) \frac{dU_{gx}}{dt} = -\frac{1}{8} \rho d^2 C_{Df} \{ (U_{gx} - U(z))^2 + U_{gy}^2 \}^{1/2} \cdot (U_{gx} - U(z)) \quad (2)$$

$$(M + C_H m) \frac{dU_{gy}}{dt} = -\frac{1}{8} \rho d^2 C_{Df} \{ (U_{gx} - U(z))^2 + U_{gy}^2 \}^{1/2} \cdot U_{gy} + (1 - m)g \quad (3)$$

流場の平均流速分布を指数分布と仮定すると、

$$U(z) = \frac{8}{7} U_m (z - H/H)^{1/2} \quad (4)$$

なる。以上の3式と、粒子の運動学的条件 $d\mathbf{x}/dt = \mathbf{U}_g$... (5),

$d\mathbf{z}/dt = U_{gz}$... (6) を連立させ、初期条件 $t=0$ で $x_0=0, y_0=0, U_{gx}=U_{gy}=0$

の条件下微分方程式を解くと、 $z=H$ にある x, y の粒子の流下距離と与えられる。

C_{Df} の値として、ビーズの場合の0.45、砂粒の場合の0.95の値を用いて $x_g(H)$ を計算

した結果を図-1に示した。計算値と実験値は5%の誤差範囲内で一致し、

2通りの値が流水中に降下する粒子の抗力係数と見られ、ストロボ写真から

求めた C_{Df} と一致する結果となった。

(3). 粒子の分散特性 粒子の床面での分布は、どの実験条件においても、

正規分布と近似してよいと見られる。尖度及び前後の値を示した。これ、バラツキの指

標である標準偏差の2乗の実験条件、投下方法によって異なる特性を示した。

(i). ピンセットによる投下の場合 ピンセットによる投下実験における σ/d と U_m/w_0 の

関係を図-3に示した。ビーズ、砂粒の両者とも σ/d は U_m/w_0 の増加とともに増加する傾向が

あるが、砂粒の場合にはその割合が非常に小さい。 σ/d と U_m/w_0 との関係が図-4に示す

$\sigma/d \propto U_m/w_0$ の関係が認められる。 $\bar{x}$ が $U_m H/w_0$ とよく近似されることから、 $\bar{x}$ の運動を

平均値 $\bar{x}(z)$ が U_m^2/w_0 と与えられる poisson process と見ると床面においては、 $\bar{x}(H) = U_m^2/w_0$

, $\sigma_x = (U_m^2/w_0)^{1/2}$ となり、 $\sigma_x/\sigma_y = (U_m^2/w_0)^{1/2}$ なる関係が成立すると思われる。これ

により、図-4からはその関係は認められず、 $\sigma(z)$ は poisson process としに取り

扱はれないと思われる。

(ii). バケツによる投下の場合 バケツによる投下実験における σ/d と U_m/w_0 の関係

も図-3に示す。バラツキの特性は、ビーズの場合と砂粒の場合とは異なる。

ビーズの場合には方向特性が顕著に現われ、バケツの開閉方向の U_g が大きいため、

x, y 方向とも、落下個数が多いほど σ が大きくなり、 U_m/w_0 に対して増加の傾向が認め

られる。一方、砂粒の場合、方向特性はあまり顕著ではなく、落下個数の影響を認め

られない。 U_m/w_0 の影響は x 方向には認められるが、 y 方向には認められない。

単一投下の場合、投下方法による σ の相違は両者の比として図-3に示した。ビーズ

の場合より投下方法の影響を受けると見られる。図-5は、ストロボ写真の粒子の

軌跡から求めた σ/d , σ_x/d と z/d の関係である。サンプル数が15個で、明確な

結論は下せないが、ビーズと砂粒とで異なる傾向を示している。ビーズは $\sigma/d > 20$

では、 σ/d はあまり増加せず、 σ_x/d は増加する傾向がある。一方、砂粒の場合には

σ/d を通じて σ/d は1を超えて増加してゆくが、 σ_x/d は $z/d > 22$ 以後一定の値に収まる

と認められる。分布特性と σ/d との関係を明らかにするためにはサンプル数を増加させる必要

がある。また、水深、ビーズ径、比重を変えた実験を行ない、データを充実させる必要がある。

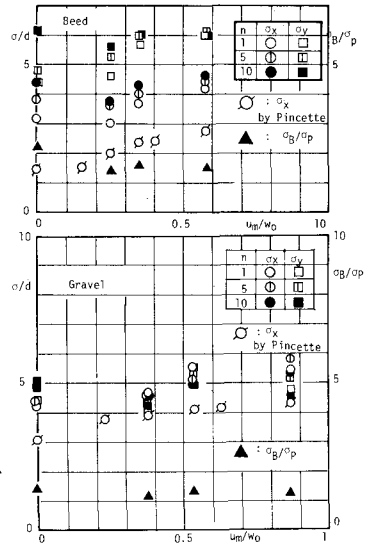


図 - 3

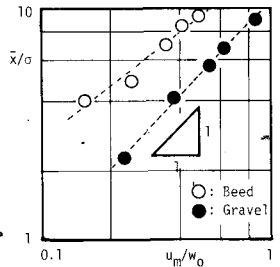


図 - 4

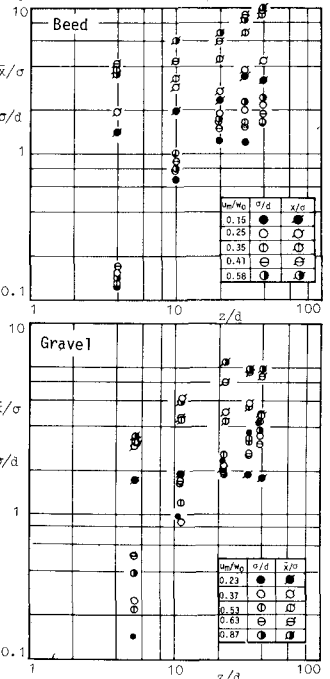


図 - 5