

武蔵工業大学正員 王 方一

河床の砂礫の始動は砂礫の形状、露出程度、表層の間隔、空隙率およびこれらの複合状態に対応する流れの性状に依存する。密に配置された粒子列に単一粒子のせじとときの始動条件は実際の河床の条件と直接結びつくことは難しいが、ここでは単一粒子の形状、向き、露出度およびまわりの空白程度の影響を明らかにするの目的で実験観察した。

§1. 単一長円形粒子の始動条件

抗力 F_x 、揚力 F_z 、水中重 G' のみとすると、 x, z を河床に平行と垂直に取り、底面傾角を θ 、下流側の支持面に潤する x 以外とすれば

$$F_x l_x + F_z l_z + l_{gx} G' \sin \theta = l_{gz} G' \cos \theta \quad \dots (1)$$

よって、 l_x, l_{gx} は F_x, G' の x 方向成分の作用距りである。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D u_b^2 d_{2x} d^2 \quad \dots (2-1); \quad F_z = \frac{1}{2} \rho C_D u_b^2 d_{2z} d^2 \quad \dots (2-2)$$

$$G' = d_3 d^2 g (\rho_s - \rho) \quad \dots (2-3) \quad \text{とすれば}$$

$$u_{bc}^2 = A_K^2 g s^2 d \quad \dots (3); \quad A_K^2 = N_K^2 / D_K^2 \quad \dots (4)$$

$$\text{よって} \quad D_K^2 = (C_D \pi / 2 d_3) \{ d_{2x} (l_x / l_{gx}) + d_{2z} (l_z / l_{gx}) r_K \} \quad \dots (4-1)$$

$$N_K^2 = (l_{gz} / l_{gx}) \cos \theta - \sin \theta \quad \dots (4-2)$$

$$r_K = C_D / C_D \quad \dots (4-3)$$

流線作用長が粒子の重心と一致する場合に $l_x = l_{gx}, l_z = l_{gz}$

$$D_K^2 = (C_D \pi / 2 d_3) \{ d_{2x} + d_{2z} \tan \phi \cdot r_K \} \quad \dots (5-1)$$

$$N_K^2 = \tan \phi \cos \theta - \sin \theta \quad \dots (5-2)$$

$$\tan \phi = l_{gz} / l_{gx} \quad \dots (5-3)$$

今、粒子を長円形とし、 $\int_{d_{2x}} \frac{1}{r} dr = \int_{d_{2z}} \frac{1}{r} dr$ $A_K = d_3 x d^2, d_{2x} = \beta_y \beta_z \frac{\pi}{4}, \alpha$ として表わし、 $d_{2z} = \beta_x \beta_y \frac{\pi}{4}, d_3 = \beta_x \beta_y \beta_z \frac{\pi}{4}, \beta_x = d_x / d, \beta_y = d_y / d, \beta_z = d_z / d$ 、さらに $l_{gz} = \frac{d}{2} \beta_x \mu_z, l_{gx} = \frac{d}{2} \beta_z \mu_x$ とすれば

$$D_K^2 = \frac{3}{4} C_D \pi \left\{ \frac{1}{\beta_x} + \frac{1}{\beta_z} \tan \phi \cdot r_K \right\} \quad \dots (6-1)$$

$$N_K^2 = \tan \phi \cos \theta - \sin \theta \quad \dots (6-2)$$

$$\tan \phi = (\beta_x / \beta_z) (\mu_z / \mu_x) \quad \dots (6-3)$$

Coleman (1967, proc 12 IAHAR, C-22) によれば、球のとき A 型配置 $\rightarrow \text{図}$ によれば $\mu_z = 1/\sqrt{3}, \mu_x = 1/\sqrt{3}$; また B 型配置 $\rightarrow \text{図}$ によれば $\mu_z = \sqrt{3}/3, \mu_x = 1/\sqrt{3}$ 従って前者によれば $\mu_z / \mu_x = 0.5$, 後者によれば $\mu_z / \mu_x = \sqrt{2}$ となる。

長円形の場合の μ_z と μ_x は計算していないが、球の場合と同様とすれば

$$\text{A 型} \quad \tan \phi = 0.5 (\beta_x / \beta_z) \quad \dots (7-A); \quad \text{B 型} \quad \tan \phi = \sqrt{2} (\beta_x / \beta_z) \quad \dots (7-B)$$

さらにほぼ中間状態の $\mu_z = 1, \mu_x = 1$ の場合をも仮定すれば $\tan \phi = (\beta_x / \beta_z) \quad \dots (7-C)$

合, 4.4 (a): $\beta_y=1, \beta_x=\frac{2}{3}, \beta_z=\frac{2}{3}$ (長径に法向と一致) 従って $\beta_x=0.75, \beta_y/\beta_z=2$
 (b): $\beta_x=1, \beta_y=\frac{2}{3}, \beta_z=\frac{2}{3}$ (中径に法向と一致) 従って $\beta_x=1, \beta_y/\beta_z=1.5$ (c): $\beta_x=1, \beta_y=1, \beta_z=1$ (球) 従って $\beta_x=1, \beta_y/\beta_z=1$ の3つの場合について考える。これらの数値を用いた

[A]. $\mu_z/\mu_x=0.5$ のとき:

(a): $\beta_x=\frac{2}{3}, \beta_z=\frac{2}{3}$ に対して: $\tan\phi=1, \tan\phi/\beta_z=3$

$$D_K^2 = \frac{3}{4} \cos(0.75 + 1.5 \gamma_K) \quad \dots (8-1); \quad N_K^2 = \cos\theta - \sin\theta \quad \dots (8-2)$$

(b) $\beta_x=1, \beta_z=\frac{2}{3}$ に対して: $\tan\phi=0.75, \tan\phi/\beta_z=\frac{9}{8}$

$$D_K^2 = \frac{3}{4} \cos(1 + \frac{9}{8} \gamma_K) \quad \dots (9-1); \quad N_K^2 = 0.75 \cos\theta - \sin\theta \quad \dots (9-2)$$

(c) $\beta_x=1, \beta_z=1$ (球) に対して: $\tan\phi=0.5, \tan\phi/\beta_z=0.5$

$$D_K^2 = \frac{3}{4} \cos(1 + 0.5 \gamma_K) \quad \dots (10-1); \quad N_K^2 = 0.5 \cos\theta - \sin\theta \quad \dots (10-2)$$

[B] $\mu_z/\mu_x=\sqrt{2}$ のとき:

(a): $\beta_x=\frac{2}{3}, \beta_z=\frac{2}{3}$ に対して: $\tan\phi=2\sqrt{2}, \tan\phi/\beta_z=3\sqrt{2}$

$$D_K^2 = \frac{3}{4} \cos(0.75 + 3\sqrt{2} \gamma_K) \quad \dots (11-1); \quad N_K^2 = 2\sqrt{2} \cos\theta - \sin\theta \quad \dots (11-2)$$

(b) $\beta_x=1, \beta_z=\frac{2}{3}$ に対して: $\tan\phi=1.5\sqrt{2}, \tan\phi/\beta_z=\frac{9}{4}\sqrt{2}$

$$D_K^2 = \frac{3}{4} \cos(1 + \frac{9}{4}\sqrt{2} \gamma_K) \quad \dots (12-1); \quad N_K^2 = 1.5\sqrt{2} \cos\theta - \sin\theta \quad \dots (12-2)$$

(c) $\beta_x=1, \beta_z=1$ (球) に対して: $\tan\phi=\sqrt{2}, \tan\phi/\beta_z=\sqrt{2}$

$$D_K^2 = \frac{3}{4} \cos(1 + \sqrt{2} \gamma_K) \quad \dots (13-1); \quad N_K^2 = \sqrt{2} \cos\theta - \sin\theta \quad \dots (13-2)$$

[C]: $\mu_z/\mu_x=1$ のとき

(a): $\beta_x=\frac{2}{3}, \beta_z=\frac{2}{3}$: $\tan\phi=2, \tan\phi/\beta_z=3$

$$D_K^2 = \frac{3}{4} \cos(0.75 + 3 \gamma_K) \quad \dots (14-1); \quad N_K^2 = 2 \cos\theta - \sin\theta \quad \dots (14-2)$$

(b): $\beta_x=1, \beta_z=\frac{2}{3}$: $\tan\phi=1.5, \tan\phi/\beta_z=\frac{9}{4}$

$$D_K^2 = \frac{3}{4} \cos(1 + \frac{9}{4} \gamma_K) \quad \dots (15-1); \quad N_K^2 = 1.5 \cos\theta - \sin\theta \quad \dots (15-2)$$

(c): $\beta_x=1, \beta_z=1$ (球): $\tan\phi=1, \tan\phi/\beta_z=1$

$$D_K^2 = \frac{3}{4} \cos(1 + \gamma_K) \quad \dots (16-1); \quad N_K^2 = \cos\theta - \sin\theta \quad \dots (16-2)$$

限界無次元掃掠力 T_{KC} は $T_{KC} = A_K^2/a_0^2 t_K^2$ (ここに $a_0 = \bar{u}_b/u_x = 8.5 + 5.75 \lg \frac{b}{d}$, $b=dd$, $t_K = 1 + mK$, $K = 6\pi/\bar{u}_b$) で計算出来, a_0, m, K を一定とすれば球形の T_{KC} に対する長円形粒子の T_{KC} の比は A_K^2/A_{K0}^2 で表わされ, 次の表の数値となる。 A_{K0}^2 は球形の A_K^2 , $\cos\theta \approx 1, \sin\theta \approx 0$ とした。

	A: $\mu_z/\mu_x=0.5$		B: $\mu_z/\mu_x=\sqrt{2}$		C: $\mu_z/\mu_x=1$	
	(8) 或 $A_K^2/(10) 或 A_{K0}^2$	(9)/(10)	(11)/(13)	(12)/(13)	(14)/(15)	(15)/(16)
$\gamma_K=0.25$	2	1.32	1.50	0.89	1.67	1.20
$\gamma_K=0.85$	1.41	1.09	1.01	0.89	1.12	0.96

A_K^2/A_{K0}^2 が1より大きければ球より掃掠ににくく, 小さければ易い。上表の数値より, 中径に法向に平行, B型配置のときは1より小さくなっており球より掃掠き易いこともありうることを示す。これらの比値は $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ の値によって変化するから T_{KC} の値もこれらに依存することになる。

合 A型配置を例にとり, $C_D \approx 0.40$, $a_0 = \bar{u}_b/u_x = 6.77$ ($b=0.5d$ に相当) 座標厚実

と球列値より $a/2d$ とすれば球の中心高は $b = a/2d - \frac{1}{4}(2 - \sqrt{2})d + 0.5d = 0.506d \approx 0.5d$; $n=3$, $t_k = 1 + nK$, $K = \frac{5\pi}{u_* a b}$, $\frac{5\pi}{u_*} = 2.2 - 0.53 \lg(u_* b/\rho)$ (Bayazit 1972) と A_k^2 と (8) (9) (10) 式などを用いて $T_{rc} = A_k^2 / a^2 t_k^2$ ($v_k = 0.25$, $v_k = 0.85$ の 2通りに対応) と計算すれば図-1 のようになる

§2: 実験 (1)

幅 20 cm, 長さ約 11 m の水路底に 5.66 mm 篩残留, 6.73 mm 通過 (平均 6.2 mm) の砂礫をばりつけ, ほぼ中央に長さ 25 cm の区間だけを 6.6 mm 径のガラス球 (比重 2.3) を千鳥型に密に配置し, その上に, 横にほぼ等間隔に単独ガラス球 5 個をのせ, 水深を徐々に増しながら ($i=1/100$) 移動限界水深を観察した。最初と最後に移動するときの水深はかなり異なり, 流速変動の偶然性のため, 増水後の放置時間と配置作業の精度が原因と考えられる。ガラス球 5 個について 3 回に亘る観察結果を図-2 に示す (実験番号 1, 2, 3)。描画番号は下流に向かって左より No. 1...5 とした。また 同じガラス球の空配列の上の 横向き砂利 (実験番号 4; $d_x = 6.6$ mm, $d_y = \frac{4}{3}d_x$, $d_z = \frac{2}{3}d_x$ の a を選んだ) および流向向き砂利 (実験番号 5; $d_y = 6.6$ mm, $d_x = \frac{4}{3}d_y$, $d_z = \frac{2}{3}d_y$) について観察した T_{rc} も図-2 に示す

始動の様子について: ガラス球はこぼれで移動に始まり, 中径と流向に平行にのいた砂利も中径で転動に始まり, 長径と流向向きにのいた砂利は長径で転動するものもあるが滑りながら横向きに方向を変えて中径で転動するときもある。

§3. 実験 (2)

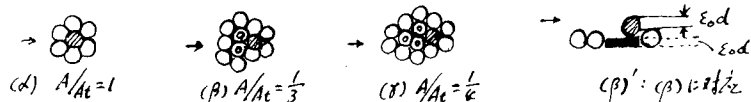


図 (a), (b), (c) に示す平面配置について, 自由状態のガラス球 $\odot$ を底より 1 mm づつ 5 段階あげ, 露出度 ε_0 を変化させて移動開始を観察した。○は固定球, $\odot$ は空白を示し, 空白部分は $\odot$ の下縁と同一高さの同径円柱でめれた。従って $\odot$ 対空白部の面積比はほぼ (a): 1, (b): $\frac{1}{3}$ (c): $\frac{1}{2}$ となる。各場合について 幅方向に等間隔に 5 個所作り, 左より No. 1...5 とした。

(a), (b), (c) について記録した T_{rc} を ε_0 との関係で示すと図-3, 4, 5 になる。ただしこれらの図では T_{rc} の算出には h_c を用い, 側壁の影響の補正はこめられた。 ε_0 の影響ようは目立つが, 空白の影響ようは殆んど現れていない。 $\varepsilon_0 d = 5$ mm は $\varepsilon_0 = 0.76$ に相当し, 空配列上の単一粒 ($\varepsilon_0 \approx 0.8$) と極めて近い状態にある。これらの描画を平均すると変動の特性と見失うが A/A_c による大体的影響ようはわかる (図-6)

§4 結び: §2 で単一粒の形状, 向きが λ mm 中と T_{rc} に影響ようするのを示し, また実験も行ったが一歩進んだ検討にはもっと多くの自由粒子を使用する必要があると考える。

実際の河床の表面は単一粒ではなく間隔 $s > d$ の後流干渉状態に近い。表面を $\odot \odot$ あるいは $\odot \odot \odot$ の場合について自由粒子 $\odot$ 5~7 個について粗観を観察した所, 単一粒の場合の T_{rc} に比して 平均的に約 2 倍の結果を得た。この場合の自由粒子の受力状況は単一の a と異なり別な取扱が必要と思われる。

