

## II-82 渓流における巨れきの移動機構について

大阪府立工業高等専門学校

正員 ○大同淳之

同 上

正員 阪本吉一

### 1. はしがき

出水時に、渓谷で直径1米前後の巨れきが移動する現象がみられる。しかもこの移動がれきの直径あるいはそれ以下で起つてることがしばしば観測される。この移動を説明するのに、

1. 急激な出水に伴う段波現象の不連面での移動
2. れきのまわりの洗堀に伴う移動
3. れき自身のせき上げ効果による移動

が考えられる。このうち1、2は現象としては同じものである。

渓谷では、急こう配に加えて、河床に突出したれきが河床に占める割合が大きい。したがって流れのせき上げ効果が著しい、この一般的な水面形状は図-1に示される。

このせき上げによるれきへの作用力は、せき上げが小さいとき抗力の中に含ませて考慮しても差支えないが、せき上げのはげしいときは、合理的であるといえない。そこで、このようなせき上げのはげしい状態におかれたれきの軌動に対する安定を求めるにおいて、せき上げに伴う静圧効果を分離して考えることにした。この考え方の一部はすでに発表したが、その誘導に用いた係数の決定に実験を行なったので、ここに報告する次第である。

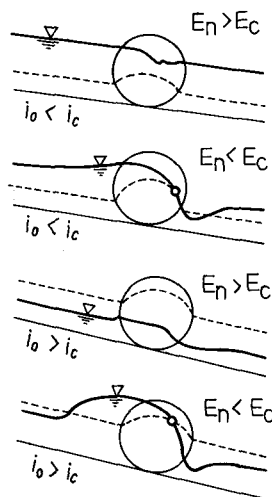


図-1 縮小断面の水面形

Ec:断面縮小部の限界

流のエネルギー

En 同所の等流のエネルギー

### 2. 巨れきに作用する力

れきのまわりの流れを図-2のように簡単化して表わすことにする。

れきに働く力は、上下流の水位差による静水圧、流れによる抗力および揚力、流れの加速度によつて生ずる仮想質量力である。

#### (1) 静 圧

れきの上下流の水深を  $E_1D$ 、 $E_2D$  で表わし、れきを球状とみなすと、上下流の圧力差は、

$$P_1 = \rho g \int_0^{E_1D} b(E_1D - z) dz = \rho g \beta_1 (\pi D^3/8)$$

$$\beta_1 = (E_1 - \frac{1}{2}) \left[ 1 + \frac{8}{\pi} \left\{ (E_1 - \frac{1}{2}) \sqrt{K_1} + \frac{1}{4} \sin^{-1} (E_1 - \frac{1}{2}) \right\} + \frac{2}{3} \frac{8}{\pi} \sqrt{K_1^3} \right]$$

$$K_1 = \frac{1}{4} - (E_1 - \frac{1}{2})^2 \quad (1)$$

$$\text{より } \Delta p = \rho g \lambda (\pi D^3/8), \quad \lambda = \beta_1 - \beta_2 \quad (2)$$

で与えられる。力の作用点  $Z_{cap}$  は

$$Z_{cap} = (P_1 Z_{cpw1} - P_2 Z_{cpw2}) / \Delta p = k_2 E_1 D \quad (3)$$

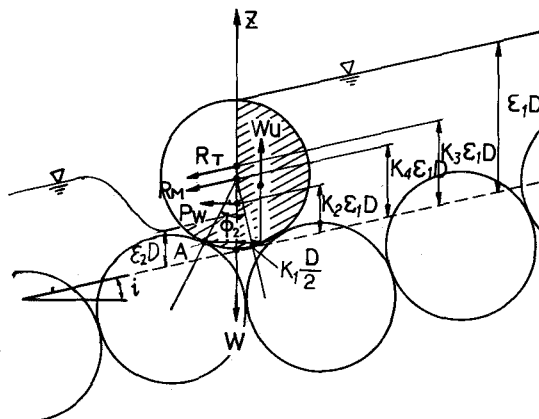


図-2 れきの受ける力とその方向

$$R_z Z_{cpw} = \int_0^{\xi_1 D} p z dz = \frac{1}{2} (3\pi D^4 / 64)$$

$$A = \frac{1}{3\pi} \left[ 8(\xi_1 - \frac{1}{2}) \left\{ \frac{\pi}{2} + \sin^2(\xi_1 - \frac{1}{2}) \sqrt{k_1} \right\} - \left\{ \frac{\pi}{2} + \sin^2 2(\xi_1 - \frac{1}{2}) + 32\sqrt{k_1} \left\{ (\xi_1 - \frac{1}{2})^3 - \frac{1}{8}(\xi_1 - \frac{1}{2}) \right\} \right\} - \frac{64}{3} 2(\xi_1 - 1) \sqrt{k_1}^3 \right]$$

である。作用する方向は水平である。

## (2) 抗力

流れがれきによつて阻止され、流れの方向の運動量を減じることから、流速を $u$ 、高さ $z$ におけるれきの幅を $b$ とすると、れきに働く流れの力は、つぎのように表される。

$$R_T = \rho \int_0^{\xi_1 D} \psi u^2 b dz \quad (4)$$

ここに $\psi$ は、抗力の流れ方向の効率 $\psi$ である。 $\xi_1 D$  ( $\xi_1 \leq 1$ ) は流れの水深である。河床上に突起した障害物のまわりの流速は複雑で、鉛直方向の流れも観測されることから、(4)式はこれを平均して取り扱ひ、

$$R_T = \rho \psi \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \cdot U_m^2 \quad (5)$$

とする。ここに $\frac{\pi D^2}{4}$ はれきの流れ方向の投影面積が他のれきによつてしゃへいされない割合、 $\frac{\pi D^2}{4}$ は水深 $\xi_1 D$ のときのれきの流れ方向の投影面積である。平均流速 $U_m$ は、

$$U_m = A_x U_* \quad (6)$$

と表わすことにする。ここに $A_x$ は流れの水深と粗度に関係する量で、 $U_*$ は摩擦速度である。この力の作用点は、流速分布の不明確さから、河床から

$$Z_{CR} = K_3 \xi_1 D \quad (7)$$

とする。ここに $K_3$ は係数である。作用する方向は河床に平行である。

## (3) 仮想質量力

流れの加速度による力は、つぎのように表わされる。

$$F_M = \rho C_M M'(t) du/dt \quad (8)$$

ここに、 $C_M$ は仮想質量係数、 $M'(t)$ はれきの浸水体積である。この力を、れきのすぐ前面で流れが急激にせき上げられるような状態に対しては、つぎのように表わすことが許されるであろう。

そこでは、摩擦こう配が省略できて、運動方程式はつぎようになる。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{U_m^2}{2g} \quad (9)$$

連続方程式は、幅一様な長方形断面に対しては

$$U_m \frac{\partial h}{\partial x} = -h \frac{\partial U_m}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial t} \quad (10)$$

である。そこで、流れの流速を段波の波頂附近の立ち上りの部分について、近似的に、

$$U_m = \frac{h^{2/3}}{n} \sqrt{1 - \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)} \quad (11)$$

とすると、 $du/dt$  は、(9)式および(10)式より

$$\frac{du}{dt} = - \left\{ \frac{2}{3} - \frac{1}{2} \frac{h}{\left( 1 - \frac{\partial h}{\partial x} \right)} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right\} - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{1}{U_m} \quad (12)$$

と表される。任意時間の浸水体積  $M'(t)$  は

$$M'(t) = M'_0 + (\partial h / \partial t) \Delta t \eta_0 (\pi D^3 / 4) = K (\pi D^3 / 6), \quad K = (\xi M'_0 + \frac{2}{3} \frac{\partial h}{\partial t} \Delta t \eta_0) \quad (13)$$

で与えられる。ここに  $M'_0$  は初期の浸水体積で  $\eta_0$  は  $M'_0$  時におけるれきを浸水面で切断したときの断面係数、 $\xi M'_0$  は  $M'_0$  が全体の体積中に占める割合、 $D$  はれきの粒径である。したがって (8) 式は、 $du/dt$  に (12) 式を用いて

$$F_M = \rho C_M K (\pi D^3 / 6) (du/dt) \quad (14)$$

となる。この力の作用点は、流速分布の複雑さを考えて、 $M'$  の重心に働くと考えるのが妥当であろう。これを河床から

$$\bar{Z}_{CFM} = k_4 \varepsilon_i D \quad (15)$$

と表現する。作用する方向は河床に平行である。

### 3. れきの安定限界

図-2 に示したように、ほゞ一様にならんだ球状のれきの上につた 1 箇のれきを対象に、転動に対する安定を求めることにする。一列に並んだれきの平均こう配を  $\theta$  とし、れきの中心において、河床の法線方向および  $A$  点の向のなす角を  $\phi$  とすると、 $A$  点のまわりのモーメントは、つぎのようである。

表 1  $A$  点のまわりに働く力の大きさとその腕長

|             | 力の大きさ                                    | 腕長                                                                                 | 働く方向 |
|-------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| れきの重量 $W$   | $\sigma g (\pi D^3 / 6)$                 | $(D/2) \sin(\phi - \theta)$                                                        | -    |
| れきの浮力 $W_u$ | $\rho g \xi (\pi D^3 / 6)$               | $(D/2) \{ \sin(\phi - \theta) + \alpha_1 \}$ $\alpha_1 = K_1$                      | +    |
| 静水圧 $P_w$   | $\rho g \lambda (\pi D^3 / 8)$           | $(D/2) \{ \cos(\phi - \theta) - \alpha_2 \}$ $\alpha_2 = (1 - 2K_2 \varepsilon_i)$ | +    |
| 動水圧 $R_T$   | $\rho \psi \xi \eta U_m^2 (\pi D^3 / 4)$ | $(D/2) \{ \cos \phi + \alpha_3 \}$ $\alpha_3 = (2K_3 \varepsilon_i - 1)$           | +    |
| 仮想質量力 $R_m$ | $\rho C_M (du/dt) K (\pi D^3 / 6)$       | $(D/2) \{ \cos \phi + \alpha_4 \}$ $\alpha_4 = (2K_4 \varepsilon_i - 1)$           | +    |

\*  $\xi$ :  $\eta$  は水深が  $\varepsilon D$  であるときに、それぞれ体積比、面積比を表わし、図-3 に示すとおりである。

$$\begin{aligned} & \psi \xi \eta A_s^2 U_m^2 (\cos \phi + \alpha_3) - \frac{2}{3} \frac{\sigma}{\rho} g D \sin(\phi - \theta) - \frac{2}{3} \xi g D \{ \sin(\phi - \theta) + \alpha_1 \} \\ & - \frac{1}{2} g \lambda D \{ \cos(\phi - \theta) - \alpha_2 \} - C_M (du/dt) K (\cos \phi + \alpha_4) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

上式に、 $U_m^2 = g \varepsilon_i D \sin \theta$  を代入すると、

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \frac{\frac{2}{3} \frac{\sigma}{\rho} \sin(\phi - \theta) - \frac{2}{3} \xi \{ \sin(\phi - \theta) + \alpha_1 \}}{\psi \xi \eta A_s^2 \sin \theta (\cos \phi + \alpha_3)} \\ & - \frac{\frac{1}{2} \eta \{ \cos(\phi - \theta) - \alpha_2 \} - C_M \frac{K du}{g dt} (\cos \phi + \alpha_4)}{\psi \xi \eta A_s^2 \sin \theta (\cos \phi + \alpha_3)} \end{aligned} \quad (17)$$

となる。この式は、れきの粒径に無関係に、そのれきが転動し始める水深比とこう配の関係を示す。

### 4. 係数の決定

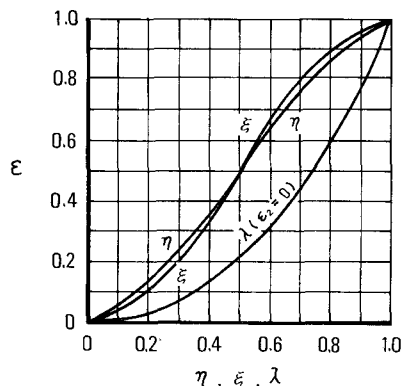


図-3  $\varepsilon$  と  $\eta$ ,  $\varepsilon$  および  $\lambda$  の関係

(1) れきのまわり  
の流れの模様  
まず、水理条件と  
れきの前後の水位差  
の関係を明らかにす  
る必要がある。

鋼製水路に直径5  
cmおよび4cmの球を  
おいてそのまわりの  
流れの模様を写真1  
に示す。

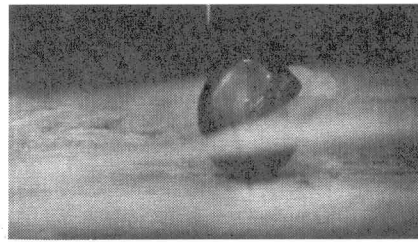
れきの中心線にお  
ける水面形を図-4  
に示す。また球の上  
流側の水面と球の直  
後の水面の差 $h_4$ と上  
流側水深 $h_1$ との比と  
Froude数との関係を  
図-5に示す。

球に作用する抗力  
を定める抗力係数は  
球の上下流の流れの  
運動量の差から得ら  
れる。球の下流側の速度は、ある場合には逆向きの  
流速もあり、まだ十分の範囲についてきめていない。

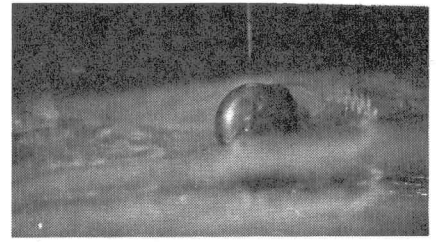
なお、天然河道では移動床であつて、はしがきで  
述べたように、れきのまわりの洗掘による移動も考  
慮する必要がある。図-6は 径2mmの移動床上に  
直径 $D$  3.0cm, 2.4cmおよび1.8cmの硝子球をおき、  
硝子球が洗掘の影響で転動したときの洗掘深を $\delta$ と  
硝子球(≒水深)を表したものである。一般には、  
球の上流側と側方の洗掘が大きくなり下流側は一般  
に小さい。抗力およびその他の係数の決定について  
は講演時に述べる。

#### 参考文献

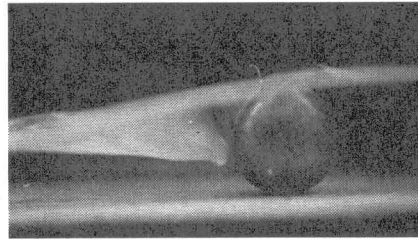
矢野勝正、大同淳之：段波状流れの不連続面におけるれきの移動 第14回水理講演集 昭45.2



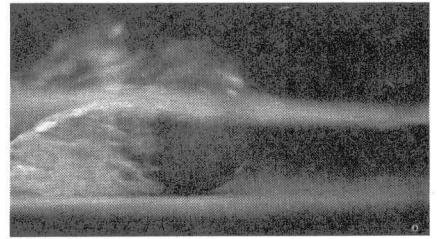
$D=50\text{mm}$  1/300 水深  $0.75D$



$D=40\text{mm}$  1/300 水深  $0.75D$



$D=50\text{mm}$  1/500 水深  $D$



$D=50\text{mm}$  1/50 水深  $0.5D$

写真-1 球のまわりの流れの模様

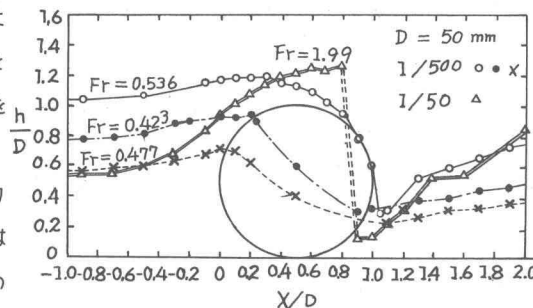


図-4 れきの中心線における水面形

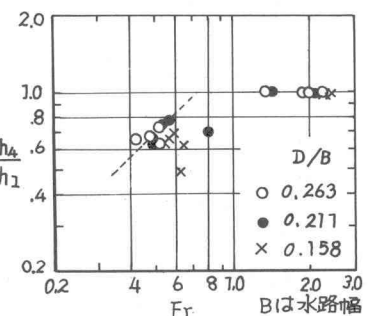


図-5  $h_4/h_1$  と Froude 数との関係

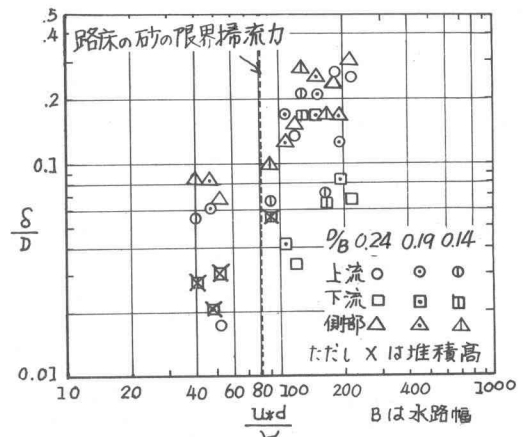


図-6 れきのまわりの洗掘深さによる移動