VI－7　　急流における礫のSaltationについて


九州大学　工学部　正員　平野　宗夫
〃　〃　〃　岩元　賢
〃　大学院　学生員　○猿渡　裕明


## I　まえがき

山地河川における土石流は、その先端部に巨礫が集中し鉄砲水、山津波などの呼称が示すように、段波状をなして流下することはよく知られている。しかし、現地での観測の困難さなどで、その性状は不解明の点も少なくない。そこで、著者らは段波を静止させる目的として、ベルトコンベア式水路を用いて、静止した段波中を移動する砂礫の運動特性の解析を行なった。

## II　実験装置及び方法

ベルトコンベア式水路（装置の概要は、参考文献(1)を参照）に、段波の静止した流れを作り、種々の粒径の砂礫（$d=0.083\sim1.35cm$）、ガラス球（$d=0.11\sim1.25cm$）および鋼球（$d=0.16\sim1.12cm$）を投入し、その流下形態を16mmシネカメラおよびV.T.R.によって撮影した。各材料の諸元は、表－1のとおりである。

表－1　材料の諸元

| 材質 | $d$ cm | $\sigma$ |
|---|---|---|
| 砂礫 | 0.083－1.25 | 2.65 |
| ガラス球 | 0.11－1.25 | 2.54 |
| 鋼球 | 0.16－1.12 | 7.63 |

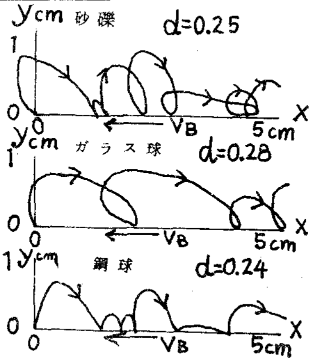
## III　実験結果および考察

(1)　砂礫の流動に関する実験結果

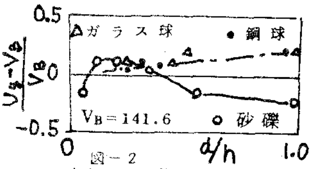
各粒子の移動形態は、Saltationを主体とし、流れが水面近くでは下流へ底面近くでは上流へ向っているので、図－1に示すように軌跡は楕円状になる。また、各材料、粒径について、平均速度$U_g$とベルト速度$V_B$の比と粒径の関係をプロットしたものが図－2である。これによると、ガラス球と鋼球は平均流速より速く移動し、粒径が大きくなるにつれて移動速度も増大しているが、礫の場合は、ある粒径範囲の砂礫は下流へ移動し、それより大きい砂礫も小さい砂礫も上流へ移動している。したがって、段波の先端部には、ある粒径範囲の砂礫だけが集中することになる。これは、ある粒径より大きな礫の場合は、Saltationがしにくいため水路床に接触する機会が多くなり、水路床との摩擦効果が顕著となるため、移動速度は減少するものと考えられる。また、Saltationをする場合、一般に流れに流速分布があるため高く跳躍した球ほど速い流れの影響を受けるため、移動速度も大きくなり、また、同じ跳躍高さの球の場合は、大きい粒径の球ほど、球自身の重力成分の効果が流れの流体力に付加されるために、移動速度が大きくなるものと思われる。

(2)　砂礫の流動に関する運動機構の考察

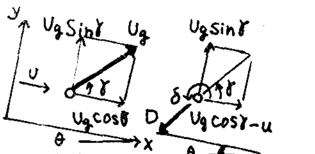
一般に$u$なる速度で動く移動座標系では、図－3に示すように、砂礫は$u=0$なる水中を$x$軸方向に$U_g\cos\gamma-u$、$y$軸方向に$U_g\sin\gamma$なる速度で、移動しているようにみえる。この場合の砂礫の水平および垂直方向の運動方程式は、次式で表わすことができる。




図－1　各粒子の移動形態




図－2　各粒子の移動速度と粒径の関係




$\rho$：水の密度　$\Delta P_x$：水平方向における礫の前後に作用する圧力差
$\sigma$：砂礫の密度
$d$：砂粒の粒径　M：マグナス効果
$g$：重力加速度　D：流体力
$\delta$：Dの作用方向のX軸となす角度

図－3　砂粒に作用する力

$$(\sigma+\frac{\rho}{2})\frac{\pi}{6}d^3\frac{d^2x}{dt^2} = D\cos\delta + \sigma g\frac{\pi}{6}d^3\sin\theta + \Delta P_x + M\sin\delta \tag{1}$$

$$(\sigma+\frac{\rho}{2})\frac{\pi}{6}d^3\frac{d^2y}{dt^2} = D\sin\delta - (\sigma-\rho)g\frac{\pi}{6}d^3\sin\theta + M\cos\delta \tag{2}$$

ここで、流れ方向と$\gamma$なる角度の方向に移動している粒子に作用する流体力Dとその方向$\delta$は、平野[2]により次のように導びかれている。

$$\tan\delta = \frac{u_g\sin\gamma}{u_g\cos\gamma - u} = \frac{dy/dt}{dx/dt - u} \tag{3}$$

$$D = \frac{\pi}{8}C_D d^2\rho\left\{\left(u-\frac{dx}{dt}\right)^2+\left(\frac{dy}{dt}\right)^2\right\} \tag{4}$$

つぎに、Saltationした砂粒が、河床において図－4に示すような半球上の突起にランダムに衝突するものとすると、衝突前後の速度をそれぞれ$u_{g1}$, $u_{g2}$ それらが水平面となす角をそれぞれ$\alpha$, $\beta$　反発係数を$e$とし、摩擦を無視すると、周知の反発機構に関する次式がえられる。[3]

$$u_{g2}\sin(\gamma-\alpha) = u_{g1}\sin(\pi-\gamma-\beta) \tag{5}$$

$$u_{g2}\cos(\gamma-\alpha) = e\,u_{g1}\cos(\pi-\gamma-\beta) \tag{6}$$

また、摩擦を考慮した場合は、上式はそれぞれ次式のようになる。

$$u_{g2}\sin(\gamma-\alpha) - u_{g1}\sin(\pi-\gamma-\beta) = -\frac{\mu P}{(\sigma+\frac{\rho}{2})\frac{\pi}{6}d^3} \tag{7}$$

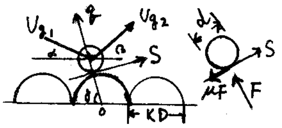
$$u_{g2}\cos(\gamma-\alpha) + u_{g1}\cos(\pi-\gamma-\beta) = \frac{P}{(\sigma+\frac{\rho}{2})\frac{\pi}{6}d^3} \tag{8}$$

および

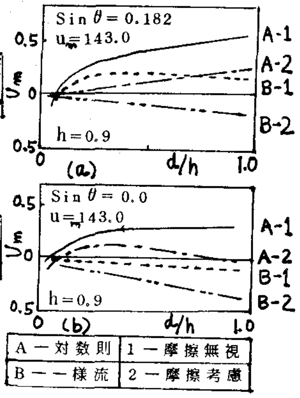
$$u_{g2}\cos(\gamma-\alpha) = e\,u_{g1}\cos(\pi-\gamma-\beta) \tag{9}$$

ここに、$\mu$は摩擦係数、Pは衝突による力積、Sおよび$\xi$は、それぞれ衝突面に水平および垂直方向にとった長さ、$\gamma$は水平面と$\xi$軸とのなす角である。

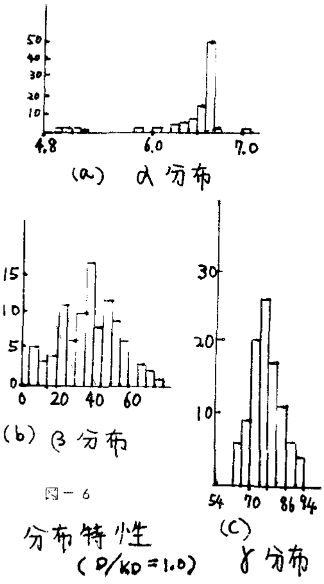
以上より、これらの条件を用いて、Saltationに関するシミュレーションを行なう。移動速度が定常になった時の速度を示すと図－5(a),(b)のようになる。それぞれ流速分布として対数則、一様流速とした場合、および反発機構において摩擦を無視した場合の線が示されており、図の(a)は急勾配におけるもの、(b)は勾配を0とした場合である。これによると、$d/h$が大きくなると、流速分布として対数則を用いた場合が、一様流速を用いた場合より移動速度は大きくなっている。また流速分布がある場合、重力の流れ方向の成分を無視し摩擦を考慮すると、$d/h$のある値で移動速度はピークを示し、それよりdが大きくなると、移動速度は次第に小さくなっている。このように、底面の摩擦が重力の流れ方向の成分に対して大きい場合には、ある粒径範囲の砂礫がもっとも速く流下することになり、砂礫の実験結果（図－2）と同じ傾向を示す。



図－4　砂礫の反発機構



図－5　移動速度の計算結果



図－6　分布特性（D/KD＝1.0）

定常的な連続Saltationにおける$\alpha$, $\beta$, $\gamma$の分布特性はそれぞれ図－6(a),(b),(c)に示すとおりである。図より、$\alpha$は大体一定値を有し D/KDの増加とともに大きくなり、$\beta$は平均的にD/KDの増大とともに、小さな値を有する傾向がみとめられたが$\gamma$は、$\beta$の逆傾向を示した。これらの諸特性は、水理条件（流れの流速分布等）の影響に規制されるものと思われるのでさらに検討を加えたい。


参考文献　1)平野他：土石流先端部の挙動について、土木・西部支部 1978、2)平野：拡幅を伴う流路変動について、土木学会論文集、1973
3)土屋他：水流による砂礫のSaltation機構(2)、京大防災研年報No.13B.1970、4)平野他：ベルトコンベア式水路による2.3の実験結果、第22回水理講演集、1978