

# 急流における礫に作用する流体力と移動限界

九州大学 工学部 平野 宗夫  
 林業試験場 防災部 ○ 岩元 賢  
 大成建設 K.K. 角 利津夫

## 1. まえがき

土石流に関する研究はこれまで現地観測や室内実験および理論的に数多くなされ、その発生、流動および堆積過程における運動機構はかなり明らかにされてある。<sup>1)</sup> 本文は、土石流の発生条件の一つである地表流による礫の流送機構に関連して行ったもので、相対水深が小さな急流において、河床の礫が流れから受ける流体力とその移動限界について考察した。

## 2. 実験装置および方法

実験に用いた球は、直径  $d=3.80\text{cm}$  のポンポン球で表-1に示す要領で比重を変化させたもの (No. I~V) である。球には Strain gauge が 2 ヶ-ジ法で張りつけられた真ちゅう棒が結合され、これによって次の流体力を測定した。

抵抗力や浮力、揚力は、図-1に示すように流れに対して  $\theta_0$  なる角度 (抵抗力:  $\theta_0=90^\circ$ , 浮力: 静水中で  $\theta_0=0^\circ$ , 揚力: 任意の  $\theta_0$  における全流体力から予め実測された抵抗力や浮力成分を差し引く) で測定した。

球の移動限界については、図-5に示すような力のつり合いを各種水理条件下で測定した。また、実験には両面アクリライト製可変勾配水路 ( $20 \times 20 \times 360\text{cm}$ ,  $\tan\theta=0.176, 0.287$ ) を用い、流速分布はピトー管で測定した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 抵抗力係数 $C_D$

$C_D$  は噴水弁を変化させて測定した抵抗力  $D$  と次式から求めた。

$$C_D = D / (A_{d1} \cdot \rho \cdot u^2 / 2) \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 $A_{d1}$  は流れの影響をうける球の投影面積、 $\rho$  は水の密度、 $u$  は平均流速で、上式による  $C_D$  と  $h/d$  の関係は図-2に示すとおりで、 $C_D$  は少々のばらつきはあるが、 $h/d$  の増加とともに減少する傾向にあり、 $h/d > 0.5$  で  $C_D \approx 0.5$  となる。また、 $h/d$  の小さい範囲での値のばらつきは球前面のかぶり高およびかぶり厚さが水理条件によって変化するためであろう。

### 3.2 揚力係数 $C_L$

$C_L$  は全流体力から予め実測した抵抗力および浮力成分を差し引いて得られる揚力  $L$  と次式から求めた。

$$C_L = L / (A_{d2} \cdot \rho \cdot u^2 / 2) \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 $A_{d2}$  は球の投影面積で、上式による  $C_L$  と  $Fr$  の関係は図-3に示す。図-3  $C_L \sim Fr$  の関係、 $C_L$  値は負である。これは球の水没時の球下部における速い流れに対するマクス効果<sup>2)</sup> によるものと思われる。

表-1 材料の諸元

No.	充てん物質	比重
I	アラルグライト	1.11
II	ケイ砂	1.67
III	水+ガラス球	1.91
IV	砂	1.51
V	セメントペースト	1.91
VI	アルミナ*	3.60

(\*  $d=1.0 \sim 4.5\text{cm}$ )

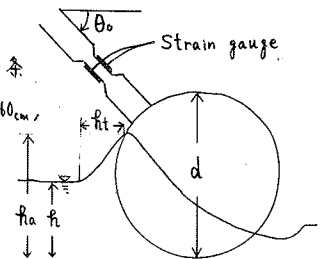


図-1 流体力の測定

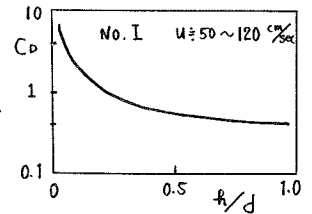


図-2  $C_D$  の平均実験曲線

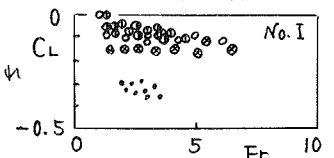
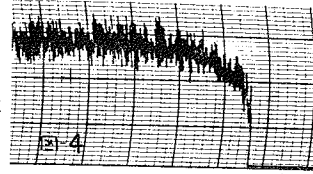


図-3  $C_L \sim Fr$  の関係

### 3.3 段波による衝撃力

段波が球に衝突した際、測定した抗力の一例を図-4に示す。本実験の場合、比較的相対水深が小さかったため、衝突時の急激なクレストの発生は検出できなかったが、抗力は平均的に定常な部分においてもかなりの乱れが発生するようである。



### 3.4 球の物動限界

球に作用する流体力のつり合い条件は、図-5より次式のようになる。

$$\tan \theta_0 = \frac{W \sin \theta + D \left(1 + \frac{a}{d - r_0}\right) + (U_p + L) \frac{e}{d - r_0}}{W \cos \theta - (U_p + L)} \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 $\theta_0$ は球の中心Oが底面と相対要素と対する角度、 $W$ は球の自重、 $a$ および $e$ は $D$ 、 $U_p + L$ の作用する点のOからの偏心量、 $r_0$ は相対高で $r_0/d = (1 - \cos \theta_0)/2$ なる関係が成り立つ。また、運動方程式は次式で与えられる。

$$(M + m) \frac{d^2 \delta}{dt^2} = D \cos \theta + (U_p + L) \sin \theta - W \sin(\theta - \delta) - F \quad \dots\dots (4)$$

ここに、 $M$ は球の質量、 $m$ は付加質量、 $F$ は摩擦力、 $\theta$ は球が動いた場合の角度を $\delta$ とすると $\theta = \theta_0 - \delta$ である。

ここで、表-1に示す比重の異なる球が物動する際の限界水深 $h_c$ の測定結果は図-6に示すとおりである。また、各球による限界掃流力の実験結果は図-7のようであり、岩垣<sup>3)</sup>による実験領域にはほぼ対応する水理条件下にあることが示されている。

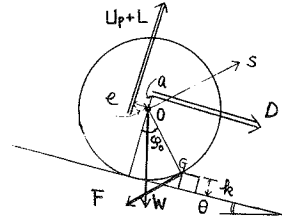


図-5 球に作用する力

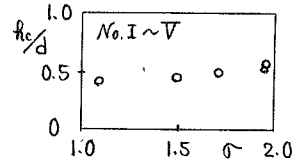


図-6  $h_c/d \sim \sigma$

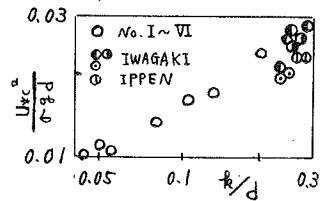


図-7 限界掃流力

### 3.5 流水の乱れを考慮した場合の抗力と物動限界

球が物動する際、球は図-8に示すように流水の乱れの影響を受けやすい状態になる。そこで、測定された抗力が正規分布するものとし、その標準偏差を $\sigma = 0.31$ 、乱れを考慮した場合の $\sigma = 0.55$ について計算値と実測値の比較を次式で行った。

$$D = D_m + \sqrt{2} \sigma \sin \omega t \quad \dots\dots (5)$$

ここに、 $D_m$ は抗力の平均値、 $\omega$ は角速度で周期を $T$ とすると $\omega = 2\pi/T$ 、 $t$ は時間である。

その結果は、乱れを考慮した場合の方がよく実測値と一致することが認められた。

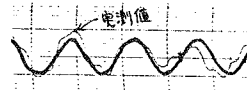


図-8 実測値と正弦曲線

### 3.6 実際の土石流による巨礫物動への適用例

桜島の土石流の場合、 $U = 10 \sim 13 \text{ m/sec}$ が実測されている。そこで、このような土石流を対象とし、前述した各実験結果から巨礫の物動限界に関する物理量を、それぞれ $U = 10 \text{ m/sec}$ 、 $h_c/d = 0.5$ 、 $C_D = 0.5$ 、 $C_L = -0.1$ 、 $A_d = A/2$ 、 $a = e = 0$ とし、 $\tan \theta_0$ をParameterにして式(3)を計算すればその結果は表-2に示すとおりになる。これより、桜島で土石流が発生した場合、 $d = 2 \sim 3 \text{ m}$ の巨礫は容易に動くことが推察され、現地の観測結果をよく説明できるものと考えられる。

参考文献：

$\tan \theta_0$	0.5	0.8
$d(\text{cm})$	2.49	1.14

(1) 大乙博、平野宗夫、岩元賢：土石流の発生と流動に関する研究、科研「山林地の荒廃予測に関する基礎的研究」付録者、未勝海、1979.3

(2) 谷口義信：土石流の基礎的研究(3)一泥しう流中の礫に作用する流体力一、砂防学会講演集、1974.

(3) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究、土木学会論文集、No. 41、1956. 12.