

# 砂および礫の水中落下の散らばりに関する研究\*

—— 静水中における場合 ——

正員 箭 内 寛 治\*\*

## STUDIES ON THE VARIANCE OF FALLING OF SANDS AND GRAVELLS.

—— in Quiescent Water ——

By Kanji Yanai, C.E. Member

**Synopsis :** When the sands and gravells go down one by one in quiescent water, they turn round many times owing to their irregular forms and get to the initial mark and its surrounding.

The author pointed out that the probability of their plane scattering followed the Binomial distribution and he estimated their results by experiments. And he checked also that they went down as a group, their scattering approximated the preceding distribution, but showed larger variance than its deviation.

Furthermore, in order to reduce their variance he suggested a few propositions for the practical use and checked their effects comparing with his theoretical results by experiments.

**要 旨** 砂および礫が静水中を落下する場合、その形の不規則性のために多くの反転運動をくり返して、意図した地点のまわりに広く分散して到達する。この平面的な散布の確率は各粒子自由落下の場合には二項分布に従うことを指摘し、それらを実験によつて確かめた。また集団落下の場合にもほぼこれに近似する分布になるが、一般に自由落下の場合よりも大きい散らばりを示す。さらにこれらの分散を小ならしめるための二、三の提案（ガードの設定、粒子の連結など）を行ない、実験的にもその効果を比較検討した。

### 1. 緒 言

各種の水中工事において捨石によつて根固めをする場合、あるいは捨石防波堤のごとくすべて捨石による施工が行なわれる場合などでは、捨石が波浪その他の原因で施工中に散乱し、所要の範囲から逸脱した範囲内に入つても凹凸を生ずるために、ある部分は無駄になりある部分は改めてこれを平滑にならすことが必要となる。この散乱量または地均し経費は決して少ないものではなく、たとえば捨石の割増は最小 20~30% で、多い時には 100% 以上<sup>(1)</sup> (ただし地盤沈下による割増をふくむ)が見込まれている。それにもかかわらずこの捨石散乱量を定量的に確かめ、さらにこの散乱を制御しようとする試みは比較的少なかつたように考えられる。

この散乱に関係する諸問題のうち、とくに基礎的なものとして静水中を自由落下する砂および礫（以下石と略称する）の散乱状況が、主として水深、粒径、粒形、粒子の比重、液体の粘性、および液体の密度によつて影響を受けること、また上記の諸元が一定で、各粒子自由落下であるならばその散乱分布は原則的に、目標をその平均値とし、水深と粒径の積の平方根に比例する標準偏差を持つ二項分布に従うことに注目してこの問題を究明し、さらに実験的に検討を行ないその妥当性を確かめた。また上記の比例定数はおおよそ粒子の比重、液体の粘性、および液体の密度から構成されるものであると想定し、その組立については実験的に検討を行ない半理論式を導びいた。

さらに実際の場合には集団投下することが少なくないので、その模型としてパイプから同時に石を集団落下せしめた結果、その散乱分布は上記半理論式に近似するが、それよりやや大きい散らばりを示すことを知つた。次ぎに施工上の問題として、できるだけ散乱を防止することが望ましいので、二、三の実験的工夫を試みた。その内各粒子をヒモその他で連結して投下する方法は、散乱防止にきわめて効果的である。なおこの方法は施工後の波浪その他による崩壊を防ぐのにも役立つと想像される。

### 2. 落下する石の散乱分布

(1) 不規則な形をした統計的平均粒径  $d$  なる寸法の 1 個の石を考え、この石を十分広い水槽の底部の 1 点  $O$  をねらつて自由落下させる。今 図-1 のごとく、深さ方向を  $z$  軸とした右手座標系を想定し、 $x-y$  平面にお

\* 第 15 回年次学術講演会 (昭 35.5.28) にて一部発表

\*\* 山梨大学助教授、工学部土木工学教室

る  $x$  軸方向の  $0$  点のまわりの散らばりを考えてみる ( $y$  軸方向も事情は全く同様となる)。石は一段階ごとに平均として、右、左それぞれ  $X_i = +c_1d, -c_1d$  (ただし  $c_1$ : 比例定数) を選択しつつ落下して、その選択の確率はそれぞれ  $p, q=1-p$  であり、各段階は確率的に独立であるとする。

$n$  段階たつたあとの状態を考える。

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_n$$

とおけば、 $X$  は  $n$  回試行をくり返したあとの目標  $0$  点からのふれの値をあらわす確率変数となる。ゆえに石が  $\alpha$  回右に行き、 $\beta$  回左に行つて  $X=K$  となる確率は

$$\alpha - \beta = \frac{K}{c_1d} = k, \quad \alpha + \beta = n$$

として、 $p$  の  $\alpha$  個の積と  $q$  の  $\beta$  個の積  $p^\alpha \cdot q^\beta$  の  $\binom{n}{\alpha}$  個の和

$$\binom{n}{\alpha} p^\alpha \cdot q^\beta = \binom{n}{n+k} p^{\frac{n+k}{2}} \cdot q^{\frac{n-k}{2}}$$

であらわされる。これは  $(p+q)^n$  を二項定理により展開した  $\alpha$  番目の項である。よつてこの散乱分布は二項分布になることがわかつた。さてこの二項分布の平均値、および分散を求めると、

$$\begin{aligned} E(X)^2 &= \sum_{k=0}^n K \cdot \binom{n}{\alpha} p^\alpha \cdot q^\beta = \sum_{k=0}^n k \cdot c_1d \binom{n}{\frac{n+k}{2}} p^{\frac{n+k}{2}} \cdot q^{\frac{n-k}{2}} \\ &= \sum_{k=0}^n \left\{ \frac{n+k}{2} (+c_1d) + \frac{n-k}{2} (-c_1d) \right\} \frac{n!}{\left(\frac{n+k}{2}\right)! \left(\frac{n-k}{2}\right)!} p^{\frac{n+k}{2}} \cdot q^{\frac{n-k}{2}} \\ &= \sum_{k=0}^n nc_1d p \frac{(n-1)!}{\left(\frac{n+k}{2}-1\right)! \left(\frac{n-k}{2}\right)!} p^{\frac{n+k}{2}-1} \cdot q^{\frac{n-k}{2}} - \sum_{k=0}^n nc_1d q \frac{(n-1)!}{\left(\frac{n+k}{2}\right)! \left(\frac{n-k}{2}-1\right)!} p^{\frac{n+k}{2}} \cdot q^{\frac{n-k}{2}-1} \\ &= nc_1d (p-q) \\ V(X) &= E(X^2) - E^2(X) = \sum_{k=0}^n \left\{ \frac{n+k}{2} (+c_1d) + \frac{n-k}{2} (-c_1d) \right\}^2 \frac{n!}{\left(\frac{n+k}{2}\right)! \left(\frac{n-k}{2}\right)!} p^{\frac{n+k}{2}} \cdot q^{\frac{n-k}{2}} - \{nc_1d(p-q)\}^2 \\ &= n^2 c_1^2 d^2 - 4 c_1^2 d^2 \sum_{k=0}^n n(n-1) p \cdot q \frac{(n-2)!}{\left(\frac{n+k}{2}-1\right)! \left(\frac{n-k}{2}-1\right)!} p^{\frac{n+k}{2}-1} \cdot q^{\frac{n-k}{2}-1} - \{nc_1d(p-q)\}^2 \\ &= 4 c_1^2 d^2 \cdot n \cdot p \cdot q \end{aligned}$$

ここで、 $p=q=1/2$  と仮定すれば  $E(X)=0, V(X)=nc_1^2d^2$  となり、平均値は目標  $0$  点に一致し、標準偏差  $\sigma (= \sqrt{V(X)})$  は  $\sqrt{n} \cdot c_1d$ 、すなわち試行回数の平方根と粒径との積に比例することになる。さらにまた試行回数は石の反転回数に等しく、反転回数は (水深)/(平均回転直径) に等しいものと考えれば (図-1 参照)、水深を  $h$  として

$$\sigma = \sqrt{n} \cdot c_1d = \sqrt{\frac{h}{c_1d}} \cdot c_1d = C \cdot \sqrt{h \cdot d} \dots \dots \dots (1)$$

(ただし  $C = \sqrt{c_1}$ )

よつて、標準偏差は水深と粒径の積の平方根に比例することになる。

以上の結果は 1 個の石が  $n$  段階後どこにいるかという確率分布についての考察であるが、 $n$  個の石について落下をくり返したあとの  $x-y$  平面上の分布密度状態についても同様に適用することができる。

(2) つぎにできるだけ分散を小さくする落下方法として、石をいくつかのヒモで連結して投下することが考えられる。結びつけられたことによって、各石の独立反転の総和がそのグループの反転を規定するように自由度が決められるものとする。すると一般に  $k$  個の石を連結した場合、その平均値および分散は、各個の石のとる本来の値を  $X'_1, X'_2, \dots, X'_k$  として

$$E \left\{ \frac{X'_1}{k} + \frac{X'_2}{k} + \dots + \frac{X'_k}{k} \right\}, \quad V \left\{ \frac{X'_1}{k} + \frac{X'_2}{k} + \dots + \frac{X'_k}{k} \right\}$$

で表わされる。演算子  $E(\quad)$  が線型であることに注目すると、

$$E \left\{ \frac{X'_1}{k} + \frac{X'_2}{k} + \dots + \frac{X'_k}{k} \right\} = \frac{1}{k} \left\{ E(X'_1) + E(X'_2) + \dots + E(X'_k) \right\}$$

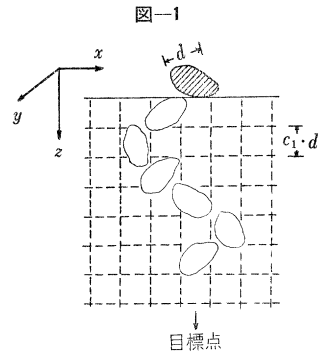


図-1

$$\begin{aligned}
V\left\{\frac{X_1'}{k} + \frac{X_2'}{k} + \dots + \frac{X_k'}{k}\right\} &= E\left\{\frac{X_1' + X_2' + \dots + X_k'}{k} - E\left(\frac{X_1' + X_2' + \dots + X_k'}{k}\right)\right\}^2 \\
&= E\left\{\frac{1}{k^2}(X_1' - E(X_1'))^2 + \dots + \frac{1}{k^2}(X_k' - E(X_k'))^2 + \frac{2}{k \cdot k}(X_1' - E(X_1'))(X_2' - E(X_2')) + \dots\right. \\
&\quad \left. + \frac{2}{k \cdot k}(X_{k-1}' - E(X_{k-1}'))(X_k' - E(X_k'))\right\} = \frac{1}{k^2}\left\{V(X_1') + V(X_2') + \dots + V(X_k')\right\} \\
&\quad + \frac{2}{k^2}\left\{V(X_1', X_2') + \dots + V(X_{k-1}', X_k')\right\}
\end{aligned}$$

ただし  $V(X_i', X_j') = E\{(x_i' - E(x_i'))(x_j' - E(x_j'))\}$

ここで石はおのおの連結されているから、その落下過程は結びつけられているもの同志では完全相関するものとすれば、相関係数は1で

$$r = \frac{V(X_i', X_j')}{\sqrt{V(X_i') \cdot V(X_j')}} = 1$$

よつて

$$\begin{aligned}
V\left\{\frac{X_1'}{k} + \frac{X_2'}{k} + \dots + \frac{X_k'}{k}\right\} &= \frac{1}{k^2}\left\{V(X_1') + V(X_2') + \dots + V(X_k') + 2\sqrt{V(X_1') \cdot V(X_2')} + \dots\right. \\
&\quad \left. + 2\sqrt{V(X_{k-1}') \cdot V(X_k')}\right\} = \frac{1}{k^2}\left\{\sqrt{V(X_1')} + \sqrt{V(X_2')} + \dots + \sqrt{V(X_k')}\right\}^2
\end{aligned}$$

ここで各石は統計的に等しい動きをするものとすれば、

$$X_1' = X_2' = \dots = X_k' = X'$$

とすることができて、また1シリーズの落下個数の総和が等しいものとすれば、 $k$ 個連結したことにより投下試行の回数は  $n/k$  回になり

$$\begin{aligned}
E\left\{\frac{X_1'}{k} + \frac{X_2'}{k} + \dots + \frac{X_k'}{k}\right\} &= E(X') = \frac{n}{k} c_1 d(p-q) = 0 \\
V\left\{\frac{X_1'}{k} + \frac{X_2'}{k} + \dots + \frac{X_k'}{k}\right\} &= V(X') = 4 c_1^2 d^2 \frac{n}{k} \cdot p \cdot q = \frac{1}{k} V(X) \\
\therefore \sigma' &= \frac{1}{\sqrt{k}} \sigma = \frac{C \cdot \sqrt{h \cdot d}}{\sqrt{k}}
\end{aligned}$$

かくして一般に  $k$  個の石を結びつけることにより、平均値はもとと同じく目標 $\bar{0}$ 点に一致する。そして標準偏差はもとの散らばりの  $1/\sqrt{k}$  倍に減少せしめることが可能である。

### 3. 実験装置、および実験結果とその考察

#### (1) 試料

山梨県釜無川から採取した砂および砂利をフルイによつて、0.40~0.85 mm, 0.85~2.0 mm, 2.0~4.8 mm, 4.8~10 mm の4種に分類して使用した。粒径が大きいのでいずれも沈降時には、Reynolds 数が大きく Stokes の範囲をはづれ Allen の範囲<sup>3)</sup>にかかるものである。計算のつごう上(1)式にあらわれる粒径  $d$  は便宜的に最大径と最小径の算術平均をとり、それぞれ、0.625 mm, 1.43 mm, 3.40 mm, 7.40 mm を用いた。また粒形による散らばりを検討する際に区別した分類は同一粒子の方向による最大径  $d_{\max}$ , 中間径  $d_{\text{med}}$ , 最小径  $d_{\min}$  をとり丸形 ( $d_{\max} < 2 d_{\min}$ ) 平形 ( $d_{\max} < 4 d_{\min}$ ,  $d_{\max} < 2 d_{\text{med}}$ ) 長細形 (上記以外のものすべて) と決めた。

#### (2) 実験装置

長さ 120 cm, 巾 80 cm, 深さ 50 cm および長さ 200 cm, 巾 50 cm, 深さ 80 cm の2種の水槽を用い、必要に応じて所要の深さまで水を入れる。水底には  $x, y$  方向それぞれ 5 mm 間隔の線を引いて油浸した約 50 cm × 50 cm のセクションペーパーを敷いてガラスその他でおさえる。ガラスに薄くグリスを塗布しておけば石の反撥または横すべりをある程度防止できる。石は1個ずつピンセットではさみ、目標の $\bar{0}$ 点を狙つて、水面に附着させて落とす。各個の時間間隔は水面の十分静まるのを待つて投下し、かくして一回に100個投下する。粒径が大になると水底にあたつて上記の反撥、横すべりをするものが増加するが、確認不能のもの以外は落下地点そのものを記録することにした。

#### (3) 実験結果および考察

(a) 図-2に示したのは個別投下の散布図の一例である。目標 $\bar{0}$ 点は中央たい正方形わくの真中である。比較的規則正しく目標点のまわりに分布しており、ほぼ二項分布に従う。またこの分布はいずれの場合でも  $x$  方向  $y$  方向ともに全く確率的であつて有意性はない。よつてここでは平均値、標本偏差ともに  $x$  方向と  $y$  方向の値の

図-2 散布図

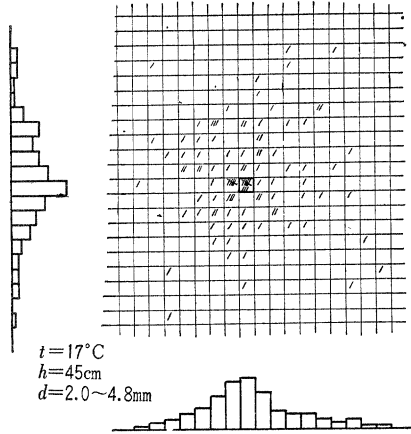
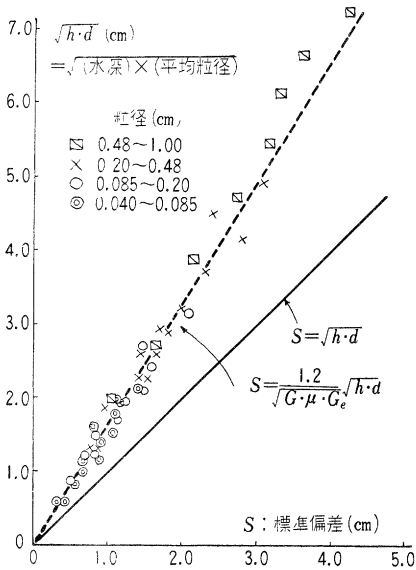


図-3



算術平均をとることとした。これら散布図から目標0点を平均値とする標本偏差を計算して、縦軸  $\sqrt{h \cdot d}$ 、横軸  $S$  にプロットしたのが 図-3 である。この図で実線で示したのは (1) 式において  $C=1$  として求めたものである。実験値はすべて左側にかたよっており、平均約 40% 過少にできることがわかる。 $C=1$  の仮定が正しければ実線の左右両側に落ちるべきであるがそおはならない。このことについては後述する。

さて 図-3 では粒径小なるほど散らばり小さく、粒径大なるにつれて標本偏差は大になつてゐる。このことは小さい石ほど水の抵抗を相対的に強よく受けて広く散らばり、大きい石はストーンと落ちて散らばりが小さいだろうという常識に反し一見理解しにくいようであるが、実は偏差の計算に当つて、粒径の大小にかかわらず 5mm という一定の級別分割をする所に原因があるので、あるいは粒径で除した、縦軸  $\sqrt{h/d}$ 、横軸  $S/d$  で示す方がわかりやすいかも知れない。その場合は粒径の大小によつて位置が入れ換るだけで全く同様な直線が得られる。

また本報告の主目的ではないが、重要なことと思うので実験平均値がはたして目標0点からどれくらい逸れるものかを念のため図示する。図-4 はそれであつて、0点からのずれは傾向的に粒径大なるものほどその絶対値は増大してゐる。しかし当然のことであるが0点に対しては(+), (-) いずれの側にも偏することなく、また水深によつても、ずれの大きさは影響を受けていない。

図-4

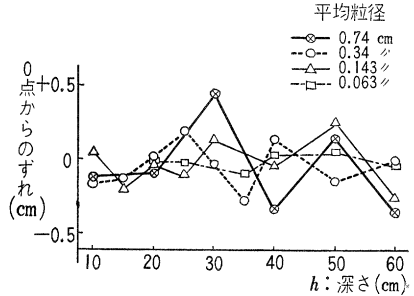
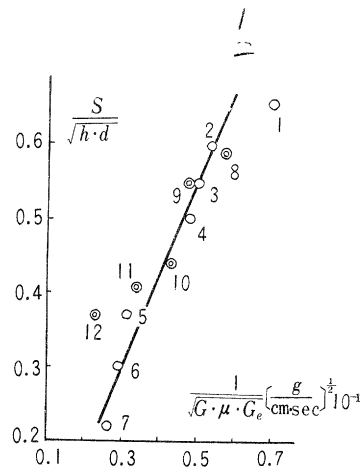


図-5



$C=1$  ではないこと、すなわち石の回転直径がその粒径よりも小さいこと、さらにまた著者の基本的な考え方が単純な幾何学的模型にすぎない所から生じているのであつて、 $C$  の中に物理的な要素を取り入れること、たとえば落下粒子の比重、液体の密度、および液体の粘性などを考慮すべきなのである。

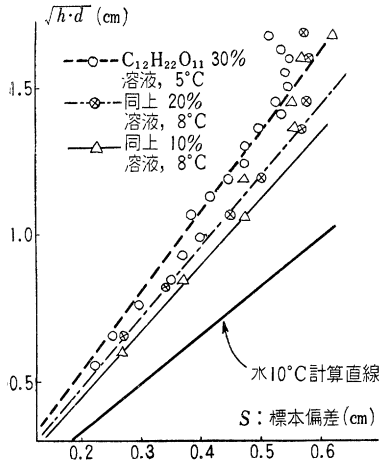
粒子の比重を 1.526~10.9、液体の比重 1.00~1.18、液体の粘性  $1.31 \sim 6.21 \text{ (g/cm} \cdot \text{sec)} \times 10^{-2}$  の範囲で変えた場合に、それぞれの  $\sqrt{h \cdot d} - S$  直線を求め、その直線の方向係数  $S/\sqrt{h \cdot d}$  と  $1/\sqrt{G \cdot \mu \cdot G_e}$  との関係を図示すると、図-5 のごとくであつて比較的良好な直線関係にある。これからほぼ次のような半理論式を得る。

$$S = \frac{1.2}{\sqrt{G \cdot \mu \cdot G_e}} \sqrt{h \cdot d} \dots \dots \dots (2)$$

ただし  $S$ : 標準偏差,  $G_e$ : 液体の比重,  $G$ : 落下粒子の比重,  $h$ : 水深 (cm)  
 $\mu$ : 液体の粘性 (g/cm·sec)  $\times 10^{-2}$ ,  $d$ : 平均粒径 (cm)

図-5 で引いた適合直線は主として砂および砂利、また常温の水に比較的合うように配慮したので多少主観的になつてゐる点は了承されたい。表-1 は前記(2) 式を求めるのに用いた落下粒子、液体の諸数値一覧表で図-

図-6



5 の番号を右端の欄に合わせてある。

また液体の粘性大となり、粒径が小さくなると図-6 の如く、 $S$  はある範囲まで  $\sqrt{h \cdot d}$  に比例するが、それ以上は散らばりが比例せず漸減する部分があらわれる。この点についてはさらに原因、および直線からの遊離点など追求したいと考えているが、一応安全側にあるのでここでは紹介程度に止めたい。

c) 前述の比重の異なる粒子については各種の粒径(たとえば鋼製ボール、ベアリング、平板状石炭など)を用いたので、ここで一応粒径の異なる場合の散らばりにについてもふれなければならぬであろう。フルイ分析したほぼ同一粒径と考えられる石を前述試料の項でふれたように三大別して、さらに混合粒径のものと比較したのが図-7 である。形について特別な考慮をほらわない一般混合石の場合より、丸形石で約 6% 散らばりは小さく、平形石、長細形石でそれぞれ 1%, 33% 大きく散らばることがわかる。従つて前項 b) で使用した粒子の形が、いずれも球形または平板状である限りは、自然の故意的な形をした石と散らばり方においてそれほど大きい差はないと考えてよい。

さて以上を観察的に述べると丸形石は小さな早い反転を行ない、平形石は扁平面の図心を運動中心として木の葉の落下に似た比較的ゆつくりした落ち方をし、また長細形は最大径の一端を運動中心にとる傾向が強くと、そのため大きく散らばるように見受けられた。この場合落し方にはあまり関係がない。たとえば扁平面を水面に平行にして落とすと上述のごとき散らばりになるが、石をかたむけ、扁平面と水面が直角にあたるようにして落とすと、落下に不安定(重心に関する回転モーメント大)なためか、散らばりが大きくなる。しかしその大部分は落下の初期に安定な方向に反転して本来の散らばりにもどる。なお実験に使用した一般自然砂の丸形、平形、長細形の混合割合は 10 回の平均、59%, 22%, 19% であつた。

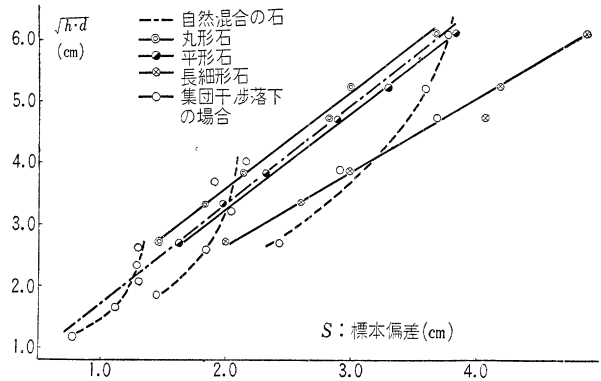
d) また実際の捨石大量投下の場合は底開き船、側開き船<sup>9)</sup>を使用し 1 時に集団で落下せしめることが多いので、個別投下との比較をするため 100 個 1 時に落下させる実験を行なつた。石は直径 16 mm のパイプに詰めて、パイプの先端を水面に接して蓋を開らく。従つて上部のものは水面に達する時多少加速されている。図-7 に見られるごとく標準偏差は同一粒径ならば水深大なる所で計算値よりやや小さく、浅い所では拡がり大きい。また一般に  $\sqrt{h \cdot d}$  大なるに従い、計算値より大きくなるような下に凸の曲線形となる。

これはパイプを使用して投下するため、目標がある拡がりを持つているにもかかわらず一点とした計算をして

表-1 落下粒子および液体の諸数値一覧表

粒子および液体の種類		平均粒径 (dmm)	粒子比重 (G)	液体粘性 ( $\mu$ ) [ $\frac{g}{cm \cdot sec} \times 10^{-2}$ ]	液体比重 (Ge)	番号
石 炭	水 10°C	1.43	1.526	1.31	1.00	①
		3.40	2.69	"	"	
砂 および 礫	水 10°C	1.43	"	1.31	1.00	②
		3.40	"	"	"	
		7.40	"	"	"	
金 剛 砂		1.43	3.09	1.31	1.00	③
鉄 滓	水 10°C	1.43	3.36	1.31	"	④
		3.40	"	"	"	
		7.40	"	"	"	
銅 球	水 10°C	1.60	7.89	1.31	1.00	⑤
鋼ボールベアリング	水 10°C	3.60	8.60	"	"	⑥
鉛 散 弾	水 10°C	3.23	10.9	"	"	⑦
砂	水 14°C	1.43	2.69	1.18	"	⑧
		3.40		1.69		
砂	水 2°C	"	"	"	"	⑨
砂	砂糖 10% 溶液 8°C	"	"	1.90	1.06	⑩
砂	砂糖 20% 溶液 8°C	"	"	2.96	1.12	⑪
砂	砂糖 30% 溶液 5°C	"	"	6.21	1.18	⑫

図-7



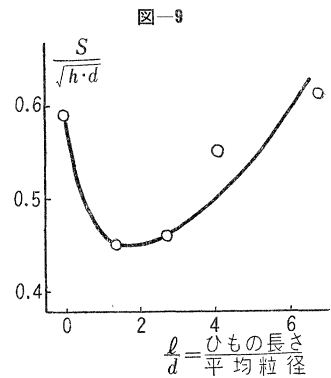
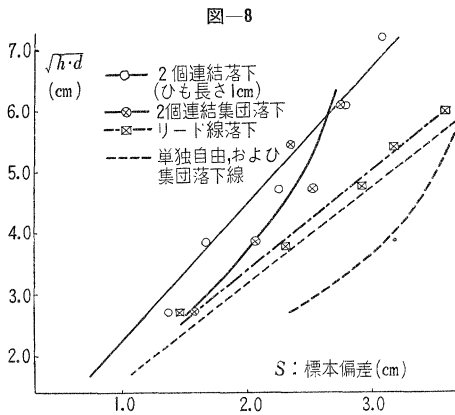
いること、水深が増すにつれてこの焦点のボケは相対的に小さくなり、かつ濃度も沈降の進むにつれて上下に拡散して、相互干渉の影響が小さくなってゆくことなどに原因があると推定される。

ここで上記のある拡がり(実はパイプの直径 16 mm)を持つた分布を考えると、二項分布と二項分布の複合分布関数<sup>9)</sup>に近似したものになるが、その標準偏差を求めることは困難である。ごく大雑把な勘定で 16 mm の両端にて 50 個ずつの二項分布をしたとしても、その補正値はたかだか 2~3% に過ぎない。

つぎに相互干渉の影響については、石および液体の両方が考えられるが、ここでは石のみを対象にする、平面的な単純な衝突を考える。簡単のために 2 個の石 A, B だけに限ると、A, B の衝突により反撥係数 1 であれば A の取るべき過程と、B の取るべき過程が入れ換わるだけでなんら分布に影響はないことになる。しかし普通は反撥係数  $< 1$  であるから、むしろ散らばりは減少し自由落下の場合の半理論値よりは小さくでるはずである。この考え方は粒径小なる水深大なる場合の実験値には比較的よくあてはまるが、粒径大なる所の説明には不十分である。以上の考え方はさらに水の乱れ、その他も加えなければ、よく集団落下の現象を説明できないのではなからうか。

e) つぎに落下時の散らばりを小ならしむるために、いくつかの工夫を試みた。まず第一に散らばりが大きくなるのを防ぐ障壁を設ければよいと考え、太いパイプまたは円筒形の金網の中を落下させること、しかし実際には波浪があるし取扱い上の問題も考慮して、4 本のリード線を水底まで下してガードを設定した。かなり多数の石が引掛るのであるが、水面の浮子、水底の重錘共に浮動し易いためか、期待するほどの効果はなくむしろ一度リード線の外にでたのが、内に入るのを妨げたりして結果は一般に思わしくない(図-8 参照)。

f) ついで 2 個の石を連結して散らばりを拘束した実験を行なった。当然結びヒモの長さが大きな要素である。両極端として 2 個の石を膠結して一体化する場合、および結びヒモを無限に長くする場合とか考えられる。膠結の場合は結局長細形に形が変わったことになり、また粒径も増すから



散らばりは大になる。またヒモを必要以上に長くすることは流れを乱し、従つてその間に適当な長さがあると考えられた。ヒモの長さ 1 cm, 2 cm, 3 cm, 5 cm および 2 個膠結の 5 通りでその散らばりを当つた。石は常に合計 100 個落とし、従つて 2 個連結では 50 個落下させたことになる。結果は 図-9 に示す。縦軸は  $\sqrt{h \cdot d} - S$  曲線の勾配、横軸はヒモの長さ と 粒径の比である。これから結びヒモの長さは平均粒径の約 0.5~2.0 倍位までが散らばりを最小にしている。なお 図-8 に示したのはヒモの長さ 1 cm の例であり、よく半理論直線上にのる。

また 2 個ずつ 1 cm 長のヒモで結びつけたものを集団投下した例を、同じく 図-8 にプロットしている。いずれも多少計算値よりは大きくでることが明らかとなつた。

#### 4. 結 語

以上を総合すると次のことが結論される。

(1) 砂および礫の静水中を落下して生ずる目標点まわりの分布確率は、おおよそ平均値を目標点とし、標準偏差は水深と粒径の積の平方根に比例する二項分布に従う。

(2) 上記の比例定数は落下粒子の比重、液体の粘性、および液体の比重によつて決まるものであることを実験によつて確かめ、半理論式を提示した。

(3) 石の集団投下の場合、理論的解明が困難であるが、砂のごとき粒径小なる場合はほぼ上記半理論式に近似する、多少それより大きい散らばりを示す。

(4) 石を結びつけて落下せしめることは、この散らばりを小ならしめるのに有効であり、 $k$  個の石を連結することにより約  $1/\sqrt{k}$  倍に減少せしめることが可能である。結びヒモの長さは粒径の約 0.5~2 倍くらいが適当である。

以上の研究に当つては、東京大学 最上武雄教授、中央大学 山口柏樹助教授の御教示、御討議をいただいたこと、ならびに実験の一部を応用地質調査事務所 菅原 弘氏に卒業研究として御協力願つたことを付記して、ここに深く感謝する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 横井増治：築港工学（前篇）昭 25 p. 68
- 2) これらの記号については、たとえば 国沢庸典 近代確率論 昭 27 p. 88
- 3) たとえば 土木学会 水理公式集 昭 32 p. 182
- 4) 前掲 (1) の p. 69
- 5) たとえば W. Feller An Introduction to Probability Theory and its Applications vol. I 2nd. Edition p 268~276

(原稿受付：昭. 34. 12. 23)

## 正 誤 訂 正 表

土木学会論文集第 67 号 (昭.35.3) 掲載  
 箭内寛治：減圧井戸の効率に関する実験的研究

ページ	行	誤	正
49	下・18・15	電氣的相似模型実験	電氣的相似模型実験
49・51・52	図-1, 4 (a) (b), 5, 6 (c)	徑	徑
54	下・9	最小限界上	最小限界土