

砂の集団投下および波を受けるときの 平面的な散らばりについて*

正員 筒内 寛治**

ON THE PLANE SCATTERING OF SANDS, IN A CASE OF THEIR GROUP FALLING AND OF WAVING EFFECT

By Kanji Yanai, C.E. Member

Synopsis: When the sands and gravells go down one by one in waving water, their plane scattering differ from that in quiescent water. The author knew that their variance was about 10~30% larger than that in quiescent water and the mean dropping points fell from the expected point to the coming side of waves. And in order to reduce their vari-

要旨 波のある場合、砂および礫を単独で投下すると、その平面的散乱分布は静水中における分布といかに異なるかを検討し、一般に散らばりは静水の時より10~30% 増加するのみであること、および石の落下平均値はその投下目標点に対し、波の進む方向と逆の方向に偏って落ちるものであることを確かめた。散乱を防止するために石を連結して落すことは波のある場合にも有効である。

また、静水中における集団落下の散乱は複合ポアソン分布になることを指摘し、放射状散布図を利用すれば、その散らばりは合理的に求まることを示した。波のある場合の集団落下も静水中より一般に大きく散らばるが、その集団個数を十分増加することによって、波を静めることが可能であり、その意味で上記静水の場合にふくまれることが明らかになった。

1. 緒 言

前報文¹⁾で静水中を自然落下する砂および礫（以下石と略称する）の散乱状況が、その形の不規則性のために多くの反転運動をくり返した結果、つぎのごとき二項分布になることを指摘した。すなわち、

$$B\left(\frac{n+k}{2} : n, p\right) = \binom{n}{\frac{n+k}{2}} p^{\frac{n+k}{2}} \cdot q^{\frac{n-k}{2}} \dots (1)$$

また、その期待値、標本偏差はそれぞれ、

$$E(x) = 0, \quad \sigma = C \sqrt{h \cdot d}$$

ただし、 p, q ；それぞれ砂粒子が右、左へ反転する確率でいずれも $1/2$

n ；反転回数 ($= h/c_1 d$)， h ；水深 (cm)， C_1 ；($= C^2$)

d ；砂の平均粒径(cm)， C ；砂、液体の比重、粘性など

ance, the tying up the stone are effective in waving water, too.

Furthermore, he suggested that the plane scattering of the group falling in quiescent water was expressed the superposition of the Compound Poisson's distribution, and by its aid, he could get the expectation and the variance of the group falling.

できる定数

しかし実際の各種水中工事においては、静水の場合はまれであって、大抵は多少なりとも波のあることを予想しなければならない。いまたとえば捨石防波堤の例を取り上げてみると、捨石の散乱は波によってのみ左右され、かつ波のある時の捨石の散乱程度はその波高によって決まると考えるのが一般的な定説のようである²⁾。そこで著者は波のある場合の石の動きに注目しつつ石の散乱分布について研究を行なった。

波のある場合、石を1個ずつ自由落下させると、波のために狙った目標点まわりには分布せず、それよりは偏よった点のまわりに分布するであろうこと、その分散も波のために静水の時よりは大きめになるであろうことが推察される。またこの分散を小さくするために石を連結して落すと、その自由度が拘束されるので静水の場合と同じく、散らばりを小さくすることができると考えられた。以上の観点から波高および波長を変化させて、その影響について検討を加えた。

また実際の施工にあたっては石を集団で落すことが少なくない。集団落下させると、初期における石の衝突のために1個ずつ自由落下する場合よりは多少大きな散らばりを示す。しかし波のある場合は集団個数を十分多くとると、むしろ波を静める働きが期待され、その散らばりは静水時のそれに近似する。そこで主として静水の集団落下の散乱分布に問題をしづらりつつ、それを合理的に推定すること、同時に石の波静め効果についてもいろいろと検討をこころみた。

2. 波のある場合の散乱分布、および

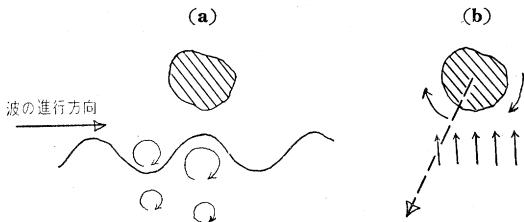
集団落下の散乱分布

(1) 前述の二項分布(1)式は、静水時の石の散らば

* 昭和35年度土質工学会秋期講演会にて一部発表

** 山梨大学助教授、工学部土木工学教室

図-1



りに適用するさいは、常に投入直前は水が全く静止しているという仮定のもとで $p=q=1/2$ を用いて計算した。しかし波のある時は流体粒子が図-1(a)のごとく回転を行なっているのであるから、石が水面に接触した時、当然時計まわりのローリングを生じ、水中を沈降する時の石は図-1(b)のような流体の抵抗を受けることになる。その結果(b)で石の左側は右側よりも、速度大であり圧力は小となる。よってこのような回転を行なう石の確率運動は左右の選択確率が相等しいものとは考えにくい。これらの運動を行なう石の散らばり分布は、(1)式を参照して、つぎのごとき期待値、標準偏差を持つものと考えられる。

$$E(x) = nc_2d(p-q) = h(p-q) \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma = \sqrt{V(x)} = \sqrt{4c_2^2d^2npq} = 2\sqrt{c_2}\sqrt{hdpq} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $n=h/c_2d$ 、また石は波による回転が付加されるため一段階に要する沈降速度は静水の場合より早く $c_2 > c_1$ とする。

(2) 式、および(3)式から推定されることは、

(a) 波の強さ一定なら、 p, q は一定となり期待値 $E(x)$ は水深 h に比例し、粒径の大小には関係がない。標準偏差 σ は $\sqrt{\text{水深}} \times (\text{平均粒径})$ に比例する。

(b) 水深一定であれば、 $E(x)$ は $(p-q)$ に比例し粒径の大小には関係がない。また水深、粒径が一定なら σ は \sqrt{pq} 、すなわち波の強さに關係する。

(2) つぎに、これらの散らばりをできるだけ小さくする投下方法として、石を k 個ずつ結びつけて合計 100 個 (100/k 組) 落す場合について考えよう。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考えれば、この散らばりは、

$$E\left(\frac{x_1'}{k} + \frac{x_2'}{k} + \dots + \frac{x_k'}{k}\right) = \frac{c'h}{k}(p-q) \dots \dots \dots (4)$$

$$V\left(\frac{x_1'}{k} + \frac{x_2'}{k} + \dots + \frac{x_k'}{k}\right) = \frac{4c_1c'dh}{k}p \cdot q = \frac{1}{k}V(x)$$

$$\therefore \sigma' = \frac{\sigma}{\sqrt{k}} = \frac{2\sqrt{c_1c'} \cdot \sqrt{hdpq}}{\sqrt{k}} \dots \dots \dots (5)$$

ただし、相関係数 $r_{i,j}=1$ とする。

以上の諸結果から、上記(1)の(a), (b)で成立することが同じくここでも成立し、同時に期待値、標準偏差はそれぞれ石の連結個数の $1/k$, $1/\sqrt{k}$ によって減少せめられることが推定される。

(3) 静水中で石がある個数同時に落下させる場合の散乱分布については前報文¹⁾でも簡単に述べた。ここではそれをやや解析的に考えてみたい。石は終始本来の不規則回転運動をしながら落下するものとする。一方、一括してある集団として落とすために、落下のごく初期(たとえば著者の実験した場合では約 1~3 秒くらい)には石相互の間の衝突がある。すなわち石の拡がる範囲が相当に広ろく、石の個数がきわめて多数でない限り、石の散乱分布(=二項分布)に、石相互間の衝突分布(=ポアソン分布)が複合されてできる複合ポアソン分布と考えてよい。従って、上記二項分布、ポアソン分布をそれぞれ、

$$\left(\frac{n}{j}\right)p^j \cdot q^{n-j}, \quad e^{-\lambda} \frac{\lambda^n}{n!}$$

とすれば、この分布関数は一般に

$$P(x=j) = e^{-\lambda p} \frac{(\lambda p)^j}{j!} \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 λ ; もとのポアソン分布のパラメーター、 p ; もとの二項分布の確率、 j ; 任意の整数、 $x=x_1+x_2+\dots+x_n$, x_1, x_2, \dots, x_n ; 衝突しながら落ちる時にとる複合確率変数

で表わされる。しかしたとえば、ある太さのパイプから同時に投下するような集団落下の場合には、ある方向にばかり平均値が偏る複合ポアソン分布ではなく、目標点を中心として放射状に偏りを生ずるものと考えられる。すなわち、(6)式を図-2(a)のような分布とすれば、パイプからの集団投下は(6)式の重ね合わせで構成される円環型の分布をするのであって、これを仮りにある軸に沿って切断すると、図-2(b)のような逆 W 字型になるとを考えられる。

図-2 (a)

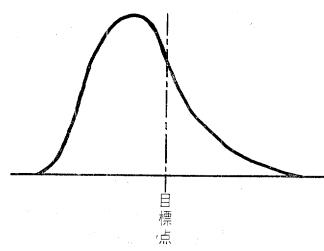
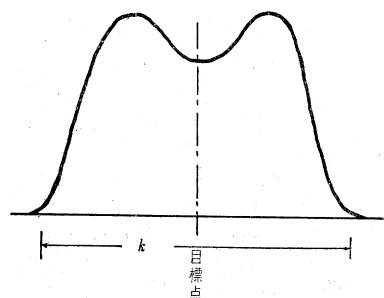


図-2 (b)



この分布の期待値、分散を求めてみると、

$$E(x) = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^k \left\{ e^{-\lambda p} \frac{(\lambda p)^j}{j!} j + e^{-\lambda p} \frac{(\lambda p)^{k-j}}{(k-j)!} \cdot j \right\} = \frac{k}{2} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V(x) &= E(x^2) - E^2(x) = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^k \left\{ e^{-\lambda p} \frac{(\lambda p)^j}{j!} j^2 \right. \\ &\quad \left. + e^{-\lambda p} \frac{(\lambda p)^{k-j}}{(k-j)!} \cdot j^2 \right\} - \left(\frac{k}{2} \right)^2 = \left(\lambda p - \frac{k}{2} \right)^2 + \lambda p \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 k は実用上差し支えない有限項までの整数とする。

(7) 式、および (8) 式から静水における集団落下分布の期待値は目標点に一致し、分散は複合ポアソン分布のパラメーター λp 、および散乱円の半径 $k/2$ で近似的に示されることがわかった。

3. 実験、結果およびその考察

(1) 試 料

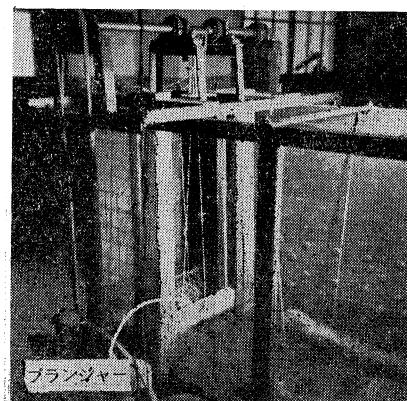
山梨県釜無川より採取せる川砂をフリイにより、0.85 mm~2.0 mm, 2.0 mm~4.8 mm, 4.8 mm~10 mm の 3 種に分類して使用した。平均粒径 α としてはフリイの上限と下限の算術平均をもって表わし、それぞれ 1.43 mm, 3.40 mm, 7.40 mm とする。粒径が比較的大きいので、水理学的には Stokes の範囲からはずれて、ほとんど Allen の領域において運動することになる。自然状態の川砂であるし、実験の目的からも形状はできるだけ random になるように混合した。

水は全実験にわたって水道水を用い、必要に応じて波高計の感度を良好にするため、0.018% 塩化ナトリウム溶液も併用した。またその際の粘性変化は小さいので無視した。

(2) 実験装置

長さ 200 cm, 巾 50 cm, 深さ 80 cm の水槽に所要の水深になるよう水をたたえる。水底には 5 mm 間隔の線を引き油浸した 50×50 cm のセクションペーパーを置く。石は水面からわずか離した位置で、目標 0 点を狙って落す。

写真-1 造波装置



波はプランジャー型造波機⁵⁾（写真-1 参照）を用いて起こした。プランジャーの長さ 40 cm, 巾 3 cm, 高さ 7 cm, 刃先き角度 60 度で、その水浸容積、および上下速度を変化せしめることにより、波高、波長を所要のものに調節する。波の測定装置としては原則的に小型波高計を用いた。小型波高計（極棒）を塩化ナトリウム溶液中にそう入し、その電気抵抗の変化を wheatstone bridge にとり、これを直読または電磁オシロに拡大して測定した。波長が小さくなると機械的な遅れを生じ、測定困難となるので、ポイントゲージおよび速写記録を併用して測定した。波高、波長には約 ±10% 程度のゆらぎがあったが、水槽の側壁および両端部の波反射（蛇籠に木屑をつめて吸収した）、プランジャーの吊りヒモたるみなどを考慮するとやむを得ないものであった。

(3) 実験結果および考察

(a) 波のある場合の各粒子単独落下 図-3 に波高 2.9 mm, 波長 102 mm, 水深 30 cm, 粒径 2.0~0.85 mm の落下散布図の一例を示す。便宜上 図-3 のごとく波の進行方向を x 軸 (+)，これと直角に y 軸、上方を (+) にとる。静水落下の場合とは異なった散布状態、すなわち波の進むとは逆の方向に平均値が偏り、散らばりは一般に y 軸方向よりも x 軸方向に大きくなる。その有様を同一波高、同一波長で水深および粒径を変えた場合について、図-4 (a), (b), (c) に示す。平均値のずれは x 軸方向、 y 軸方向の 2 つに分けて図示する。縦軸は落下平均値であって、横軸に水深をとる。平均値の符号 (+)(-) は前述のごとく 図-3 による。これをみると y 軸方向の落下平均値の 0 点からのずれは、ほとんど静水の場合と同じであり、目標点 0 のまわりに全く確率的に散らばっている。また粒径の大なるものほど、大きなゆらぎを見せていているのも前報文¹⁾ に報告したと同様である。ただ水深が増すと各粒径とともにゆらぎは大きくなり、表面波の僅かな力でも水深の増加によって拡大されることがうかがわれる。これに反し x 軸方向に対しては、

図-3 $h=30$ cm, $d=1.43$ mm, $L=10.2$ cm
 $H=2.9$ mm, $t=21^\circ\text{C}$

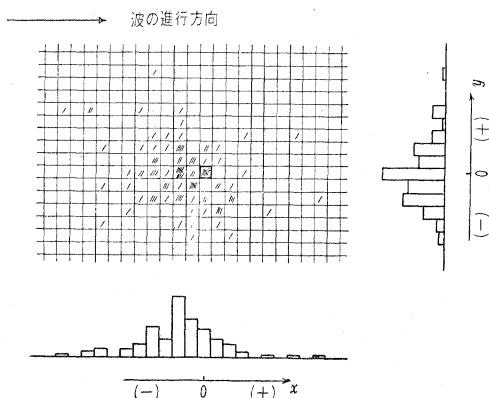
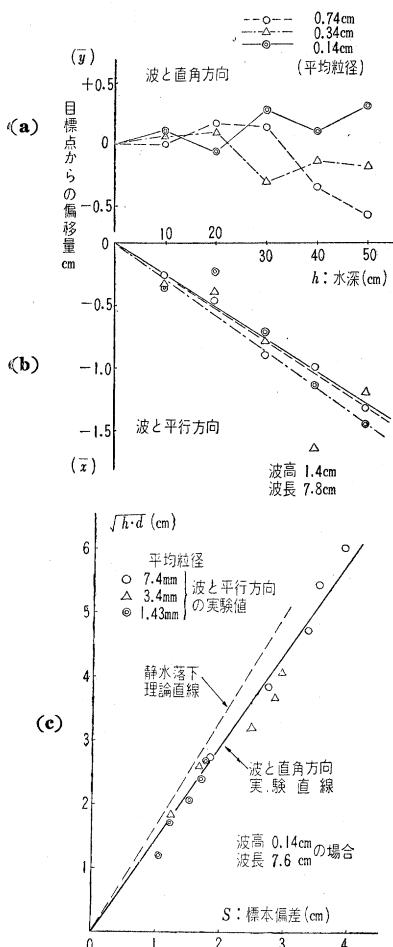


図-4



その平均値は水深が増すに従ってほぼ一次的に(-)側に増加している。しかし粒径の大小は、著者の実験した範囲では、その偏移量に影響を与える、従って前述の解析結果によく符合するごとくである。一方物理的に考えても、粒径大なる石はその確率的ゆらぎは大きいけれど、波による影響は少なく、粒径の大小は、落下平均値の0点からの偏移に関係のないことがうなづかれる。

つぎに標本偏差も x 軸方向、 y 軸方向の2つに分けて検討すると、両者ともに静水の場合よりは10~30%大きい散らばりを示し、依然として $\sqrt{hd} - S$ 線は一次的な関係を保持している。これもまた(3)式による定性的な結果とよく一致する。ただ y 軸方向の標本偏差も静水の場合より大きくなる(x 軸方向よりやや小さ目)ことは、石の形が不規則であるため、 x 軸方向の波を受けることで x 軸方向のみならず、 y 軸方向にもその分力の影響があらわれてくるのであろう。このさいの S_x 、 S_y (それぞれ x 、 y 軸方向の標本偏差)は互いに正相関をしており、 S_x の大きいものは S_y も大きくなる。静水の場合の S_x 、 S_y が互いに独立であること^{6), 11)}と考え合

わせると、これは上述の考え方をより一層、つよく裏づけるものである。

上記の単独落下のデータを各種の波高、波長などについて整理したのが図-5、図-6である。図-5(a)、(b)は平均値の偏移量—水深直線の方向係数(\bar{x}/h 、 \bar{y}/h)と、波高比(H/L =波高/波長)との関係を図示したもので、それぞれ波と直角方向(y 軸方向)、波の進行方向(x 軸方向)についてまとめてある。 y 軸方向では波高比に関係なく、ほぼ(+)(-)両側の方向係数を持っている。その値も全く確率的である。すなわち波高比がどのようであっても、水深の増加にともなう目標0点からの偏移量が定性的に変化するとはいえない。さて x 軸方向では、すべて(-)側のしかも相当大きい方向係数(y 軸方向の数値の約1.5~5倍)を示し、一般に波高比の増加に従って(\bar{x}/h)は大きくなるが、ある波高比($H/L > 5 \times 10^{-2}$)を越すと一応飽和状態に達する。2-(1)-(b)に指摘したごとく($p-q$)は $H/L = 5 \times 10^{-2}$ までは大体比例して増加するが、それを越えるとほとんど変化せず、波の強さによる($p-q$)もある限界が存在するとも考えられる。また波長の大きいものは(\bar{x}/h)がかなり散らばるが、波長の小さいものほど比較的値がまとまっている。波長の大きい波は石に与える回転がにぶく、不規則になり、(\bar{x}/h)の傾向がまちまちになるのであろうか。図-5では x 軸、 y 軸方向ともにある波高比における、3種類の粒径の実験結果を算術平均してプロットしてあるか

図-5 単独落下

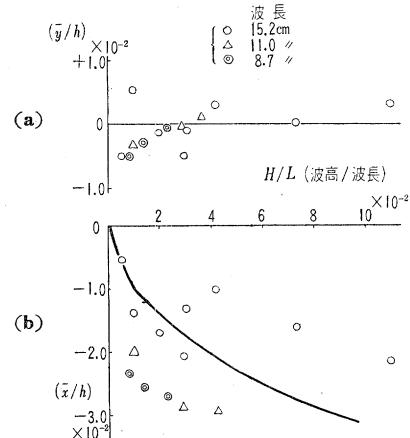
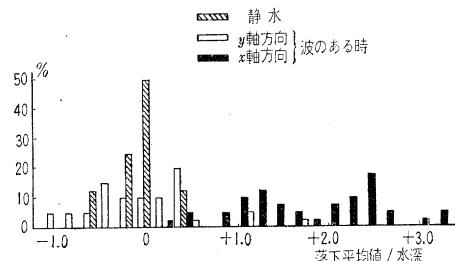


図-6



ら、実際にはもっと図に見るよりは散らばりが大きい。

いまそれらを静水時の方向係数(落下平均値/水深)と比較すると、 y 軸方向すらも静水の場合よりは、かなり大きいので、その有様を図-6に柱状図にして示す。静水時の散らばりが一番小さく、しかも目標 0 点まわりに密集している。すなわち水深が相当深くなても目標に近く落ち、そのゆらぎも比較的小さい。しかし波があれば y 軸方向で約2.8倍、 x 軸方向では約3.6倍と標本偏差が大きくなること、さらに x 軸方向では目標点ではないある値のまわりに散らばることがわかる¹⁾。 x 軸方向のものには山型が少なくとも2つあることから、ある波長はある方向係数(\bar{x}/h)を持つ傾向があるが、そのゆらぎはかなり大きいものであることを示している。

波高および波長を考慮した、波のエネルギー式として

$$E = \frac{1}{2} \rho g H^2 L$$

ただし、 E : 波のエネルギー、 ρ : 水の密度、 g : 重力の加速度、 H : 波高、 L : 波長

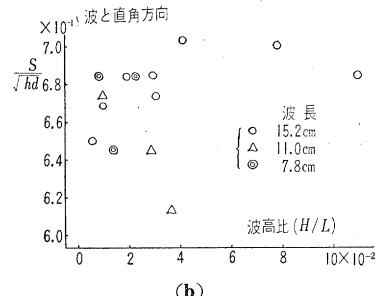
がある。著者の場合は石もともに浮動するのであるから、本質的に異なるけれども、おおよそ、

$$\bar{x} = h(H/L)^{1/2}$$

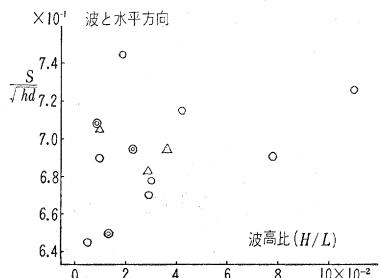
ただし、 \bar{x} : 目標 0 点からの偏移量(cm)、 h : 水深(cm)なる式に近似する。

図-7(a), (b) は $\sqrt{hd} - S$ 直線の勾配(S/\sqrt{hd})と波高比との関係を、同じく波の進行方向、波と直角方向の2つに整理して示したものである。いずれも静水の場合($S/\sqrt{hd} = 0.6$, $H/L = 0$)にくらべて勾配は大きく、とくに x 軸方向では波高比の増すにつれて S/\sqrt{hd} 増加の傾向が強い。 y 軸方向についてもほぼ同様であるが、全体的に x 軸方向の場合より不規則で S/\sqrt{hd} が6~7%小さくなる。すなわち静水時の平均勾配に比較すると、

図-7 単独落下(a)



(b)



x 軸方向で最大25%, y 軸方向で最大16%, 主として10~20%, 7~15% 方それぞれ大きい。従って水中落下をする時の散乱は、従来信ぜられていたように、波によって生ずるものであるという説は十分にその事情を明らかにしているといいがたく、むしろ石の形の不規則性によって散らばりが生じ、それにある程度の波による分散増加が付加される(著者の実験した範囲では、算術平均しない、なまの値で約10~30%の増加)というべきである。また x , y 軸とともに0.85 mm~10 mmの粒径の範囲では、波高比 4.0×10^{-2} に達すると、ほぼ一定となり一応散らばりは飽和状態になるようである。

(b) 波のある時の2個連結落下 落下するさいの散らばりを小さくするために石を結びつけて落すことは容易に考えつくことである。そのもっとも簡単な例としてrandomに選んだ石を2個結びつけ、一組ずつ合計100個(50組)落した結果を検討してみる。細工の関係で粒径は4.8~10 mmの石のみに限った。図-8, 図-9に

図-8 2個連結落下の場合

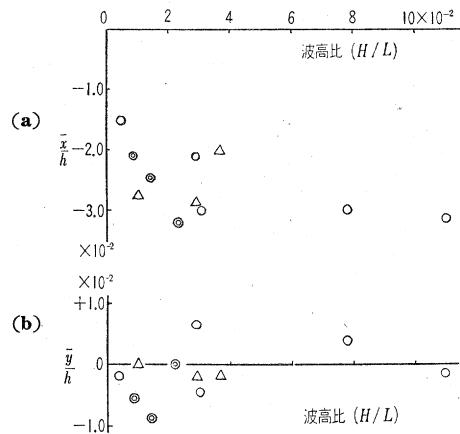
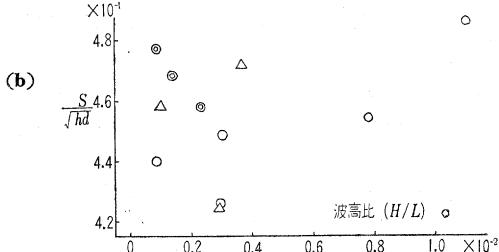
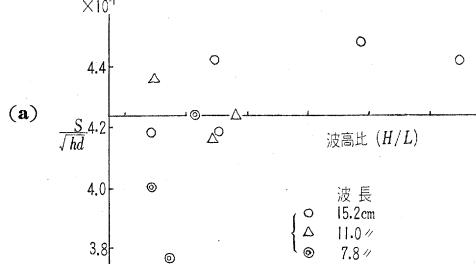


図-9 2個連結落下の場合



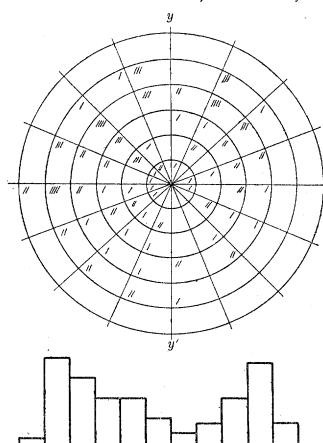
(平均値)/(水深)と波高比の関係、および S/\sqrt{hd} と波高比との関係を図示する。石を連結しているために回転が困難となり、波のエネルギーがそのまま石にかかるためか、 x 、 y 軸ともに (平均値)/(水深) が石を連結しているわりには大きく出る。すなわち y 軸方向では $y/h=0$ のまわりの散らばりは単独落下の時より約 50% 大きく。 x 軸方向でも約 20% の増加がみられる。また単独落下の場合と同じく、波高比の増すに従い \bar{x}/h は増加している。

これを $\sqrt{hd} - S$ 直線について検討すると、標本偏差は y 軸方向で静水時の解析結果 $c\sqrt{hd}/\sqrt{2}$ の勾配 ($S/\sqrt{hd} = 4.23 \times 10^{-1}$) に比較的よく合うが、x 軸方向では大きく出ており、波高比の増加とともに S/\sqrt{hd} も増加する傾向にある。また波のあふりを大きく受けるためか、平均値も標本偏差もゆらぎの大きいのが特長的である。波のあふりを受けて落下平均値の目標点からはずれが単独落下の場合より大きくなるのが問題であるが、実際の捨石は水深が比較的浅いから（たとえば（水深）/（平均粒径） = 10~20）、割合にこの偏移量は影響が少ないと考えられる。よって一般に波がある時にも、石を連結して落すことは散らばりを小さくするのに有効である。

(c) 静水中の集団落下 2.(3) で述べたように集団落下の散乱分布は、断面逆W字型の円環分布になることが予想されるから、従来のような直角座標による資料整理の方法では不適当である。よって 図-10 に示すような放射状分布図に記録し、これをたとえば $y-y'$ 軸(図-10 参照) で切断し、左右同じ半径の帶中にある落下個数を累加して頻度分布を図示するのが便利である。比較的よく円環分布および逆 W 字型分布に近似することがわかる。

さてこの散乱分布の平均値は、目標点に一致すること(7)式に明らかであるが、円環分布をなすために目標点よりもその周囲に多数累積して、分散を知ることが非常に重要となってくる。分散は(8)式から、 ρ_P , k がわかれば容易に算出できるはずである。著者の実験した範囲

図-10 $d=10.0\sim4.8$ mm, $h=10$ cm, $t=27^\circ\text{C}$



义-11

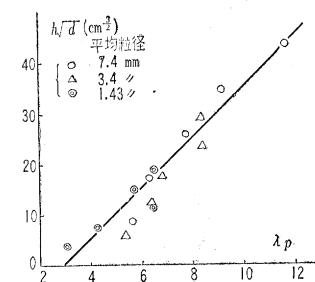
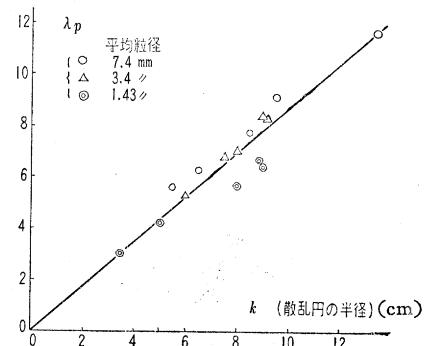


图-12



で、いろいろと検討を試みた結果、 λp は $h\sqrt{d}$ とほぼ直線関係にあり(図-11 参照)、また k は λp と高い相関関係にあることがわかったから(図-12 参照)、これらの関係を利用して静水中における集団落下の平均値、および分散を求めることができる。すなわち、

$$k=1.15 \lambda p = 3.45 + 0.23 h \sqrt{d} \dots \dots \dots (10)$$

(9) 式, (10) 式を (8) 式に代入して, 分散は,

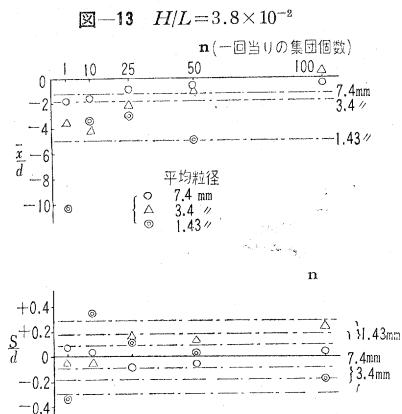
$$V(x) = \left(\lambda P - \frac{k}{2} \right)^2 + \lambda P$$

$$= 4.63 - 0.017 h \sqrt{d} + 0.0072 h^2 d \dots \quad (11)$$

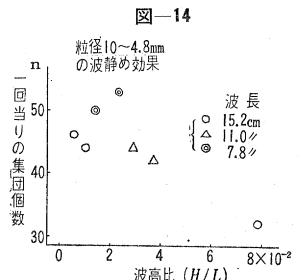
で表わされる。この式から容易にわかるように、 $V(x)$ は $h\sqrt{d} = 1.18$ の時、最小値 = 4.53 を持つから、標本偏差 S の最小値は 2.05 になる。同じ h, d のもとで単独落下の理論値は $S = 1.92$ となることを示し、集団落下の場合は常に単独落下よりも大きい散らばりを持つこと、および (11) 式の $V(x)$ が非常に増減のにぶいことから、単独落下の理論直線によく近似する、やや大きめの値をとることがうかがわれる。

(d) 波のある場合の集団落下 波のある水中に十分な個数の集団で落下させると、その散乱分布は静水中の集団落下に比較的よく類似する。落下平均値は波の進行方向、波と直角方向とともに目標 0 点のまわりに左右対称にプロットされ、集団の石が波を静める役割を果たしているように看取された。標本偏差 S も大体、静水中の集団落下の場合とほとんど同じ大きさを示している。

よって集団落下の 1 回の落下個数をそれぞれ 1, 10



25, 50, 100 個に変え、合計は 100 個落としその波静め効果をしらべるために、落下平均値、標本偏差の個数と対照した管理図を作って検討した。図-13 に書込んである鎖線は、それぞれ静水における 100 個集団落下の場合の落下平均値の目標 0 点からの偏移量、標本偏差のゆらぎから求めた \bar{x}/d , S/d の管理線 ($\pm 2\sigma$) である。この $\pm 2\sigma$ の中に入っているれば、これらの値は正規分布をするものと仮定して、5 % の危険率で波静め効果ありと判定できはしないだろうか。しかし実際にはそう簡単なものではなく、落下平均値、標本偏差の管理され方はまことに不規則であり、一方が管理線内に入り、他方でははずれることがしばしば起こる。仮りに両方とも合格していれば、波静め効果はあったものとすると、粒径 10 mm ~ 4.8 mm で 50 個 (約 4.0 g) でそれが現われ、他の粒径では何もいえないことになる。落下平均値の管理図は(-)側にのみ落ちるから、比較的の傾向がはっきりしているが、粒径 2.0 mm ~ 0.85 mm の石のみは、ゆらぎが大きく不安定である。この粒径では 200 個、300 個、500 個、1,000 個 (約 4.0 g) の同時落下を行なったが、 $\bar{x}/d = -3 \sim -6$ の間に落ち、0 に収斂する気配はなかった。しかし 10 mm ~ 4.8 mm の石については、波長、波高を変えた場合について同様手法を試み、波静め効果をもたらす集団個数を求めたところ、一応 図-14 のごとき結果が得られた。実際に波を静めているのかどうか、という本質的な問題については、今後さらに研究を続けたいと思うが、少なくとも著者の実験範囲内では、これ



らの個数が落下平均値のそれも、標本偏差のゆらぎも静水の場合と区別できない程度まで波を静めているのである。

4. 結 語

以上波の影響および集団落下の場合について、石の散布状態は、解析および実験結果を総合検討した結果つまることが明らかになった。

(1) 石の分散はその形の不規則性に原因するものが大部分を占め、波のために散らばる量は予想されているものより少ない。またそれは波の進行方向、および波と直角方向とともに静水の場合より大きい散らばりを示し、とくに前者で波の影響はいちじるしい。

(2) 波があると石はその落下目標点よりも、波の進むと逆の方向に偏って落下し、波の強さが一定ならその偏移量は水深に比例し、粒径の大小には関係しない。また平均落下地点は統計的に $\bar{x} = h(H/L)^{1/2}$ で表わされることがわかった。

(3) 石を連結して落下させるのは、波のある場合にも有効であるけれど、連結しているために波のあふりを強く受け、平均落下地点が単独落下する場合より大きく偏る傾向がある。

(4) 静水中を集団落下する場合の散乱分布は、複合ポアソン分布の重ね合わせになること、およびその分布は目標点を平均値として、分散はパラメーター λp 、散乱円半径 $k/2$ で表わされることを確かめ、その算出法も示した。

(5) 波のある場合の集団落下は、一回の落下集団個数を充分ふやすことによって、波を静めることができると期待できる。その場合の石の散乱分布は静水の時の集団落下とほとんど変わらない。

終りに、本研究は昭和 35 年度文部省科学研究費による研究の一部であり、また終始変らぬ御教示、御討議をいただいた東大教授 最上武雄工博、ならびに実験に協力された本学土質実験室 五味貞夫氏に厚く御礼申上げる次第である。

参考文献および注

- 1) 篠内寛治: 砂および礫の水中落下の散らばりに関する研究; 土木学会論文集、第 69 号 (昭和 35 年 7 月)
- 2) 永井莊七郎: 港湾工学; オーム社 (昭和 35 年), p. 63
- 3) 藤本武助: 流体力学; 築賀堂 (昭和 35 年), p. 156
- 4) この式の説明には、たとえば、国沢清典: 近代確率論; 岩波書店 (昭和 30 年), p. 72~73
- 5) 鶴田・久田: 大型造波水路の設計について; 運輸技術研究所報告、第 7 卷、第 11 号 (1957 年 11 月)
- 6) 林 賢: 応用数学概論 (上); コロナ社 (昭和 35 年), p. 111
- 7) 波のある場合の x 軸方向では、すべて平均値まわりの標本偏差を算出しているので、目標 0 点に関する標本偏差はこれより大きくなることに注意されたい。この場合であると 0 に関する S は静水の場合の約 8.4 倍になる。
- 8) 文献 2) p. 16

(原稿受付: 1960.7.25)