

# 矩形水路内の堰による堆砂現象の実用的一解法

杉尾 捨三郎\*

(昭和34年11月24日受理)

## 梗 概

矩形水路の上流から、水と砂をおのおの一定の割合で連続的に補給しておき、かつ水路の下流を低い堰でしめきつたときの堆砂の進行状態を求めるための、実用的な一計算方法を提案した。またこの方法による計算を、合成樹脂製水路を用いて行なつた実験結果と比較した。

## 第1節 緒 言

著者はさきに移動床矩形水路を低い矩形堰で堰きとめたときに起こる堆砂の変化を解析的に求めようとし、岩垣博士が提案した特性曲線法<sup>(1)</sup>を利用することによつて、段丘が発生し、発達する機構を明らかにした。この方法は矩形水路の場合に限らず、断面形が場所によつて異なる自然河川の場合にも応用することが可能であると思われ、堆砂現象を研究するための基礎的な方法であるといふことができる。しかし実用的な面から見ると、以下述べるように若干の欠点もあるようである。まずこの方法は  $t=0$  の状態から計算を開始し、 $\Delta t$  時間ごとの堆砂の変化を順次積み重ねることによつて堆砂形と水面形の時間的変化を求めるのであるから、長時間後の現象を求めるときには計算の労力は相当大きいばかりでなく、積み重ねによる誤差も累積する恐れもある。さらに流れの上・下流にわたつて、マンニングの粗度係数  $n$  が一定とみなしうるときにはこの方法は便利であるが、流れ方向に  $n$  が変化する場合に使用すると、段丘部流砂量か最上流部の流砂量と水位のいずれかが現実と若干相異なる結果となる。 $n$  が変化するものとして扱ふと  $\varphi(h)$  の形が複雑になり過ぎて、実用の面からは一層不便になる恐れがある。

本文において述べようとする実用的な解法は、前論文で示したような流れの運動方程式、連続式、流砂量公式、流砂に関する連続式など6箇の方程式を基礎とするものであるが、次元解析から得られた若干の関係式を利用することによつて式の扱いを簡単化し、任意時刻の堆砂形と水面形をかなり少ない労力で定めようとする試みである。これを実証するために合成樹脂製の矩形水路による若干の堆砂実験を行なつたのであるが、計算結果は実験結果とかなりよく一致した。

\* 土木工学教室，助教授

第2節 実用的解法

[A] プール内の水面形

水路を堰きとめることによつてできるプール内の水面形の算定においては、従来マンニングの粗度係数  $n$  の値として 0.01 程度がとられている。その理由は、水路床に砂が敷かれているときにはプール内の砂は静止しているから、その砂粒を表面にもつ固定床と同一の粗度を示すものと考えられ、またプール内に砂が全然なくて直接水路床が露出しているときには、当然水路床そのものの粗度を考えればよいという考えに基づいているようである。

さて漸変流れをもつプール内に任意2断面をとり、水深、床面標高をそれぞれ  $h_1, h_2$  ;  $z_1, z_2$  ; 床勾配を  $S_0$ 、単位巾当りの流量を  $q$  とすれば (図-1)、次式が得られる。

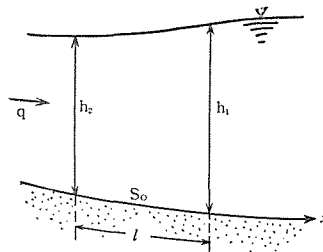


図-1 流れの縦断略図

$$h_1 - h_2 = S_0 l + \frac{\alpha q^2}{2g} \left( \frac{1}{h_2^2} - \frac{1}{h_1^2} \right) - I_f l \dots\dots\dots(1)$$

ここに  $l$  : 2断面間の距離

$\alpha$  : 流速分布に関する補正係数

$I_f$  : 2断面間のまさつ損失水頭

さて著者が射流状態で行なつた各種実験によれば、プール内のまさつ勾配  $I_f$  の値は、段丘のすぐ下流付近を除いてはきわめて小さく、場合によつては計算値が負の値となることもあり、実験上の誤差の程度から見れば、 $I_f$  をほぼ零とみなしうる程度であつた。これらの事実から推察すると、プール内の流れのように上層と下層で流れの方向が逆になるような場合には、一般の等流状態の開水路とみなして前記のような値の  $n$  を用いることはやや無理と思われるので、ここでは  $I_f$  を零とみなして計算を行なつてみよう。不等流における運動方程式

$$-S_0 + \frac{dh}{dx} + I_f + \alpha \frac{d}{dx} \left( \frac{v^2}{2g} \right) = 0 \dots\dots\dots(2)$$

において  $I_f = 0$  とおけば

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_0 h^3}{h^3 - h_c^3} \dots\dots\dots(3)$$

なる関係式が得られる。ここに  $h_c$  は限界水深で、 $h_c = (\alpha q^2/g)^{1/3}$  である。上式を積分し、かつ  $x = 0$  において  $H = H_s$  とおけば、

$$S_0 x' = \left( H_s + \frac{h_c^3}{2H_s^2} \right) - \left( h + \frac{h_c^3}{2h^2} \right) \dots\dots\dots(4)$$

となる。ただしダムから上流向けに測つた距離を  $x'$  とする。上式は  $I_f$  を無視したときの背水公式である。さらに段丘部下流に発生する渦による損失が無視できるならば、 $h = h_c$  となる位置  $x_c'$  は次式

$$x_c' = \frac{1}{S_0} \left( H_s + \frac{h_c^3}{2H_s^2} - \frac{3}{2} h_c \right) \dots\dots\dots(5)$$

により概略値を定めることができる。

〔B〕 段丘始点の決定

矩形水路における実験によれば、堆砂開始点と段丘始点とは必ずしも一致しない。前者は実験から直接定めることができるが、後者は実験結果から段丘の肩の移動する軌跡をたどることによつて求められる。著者がこれまで実施した数多くの実験によれば、段丘始点  $F$  とダムまでの距離  $L_f$  は図-2 に示すように、

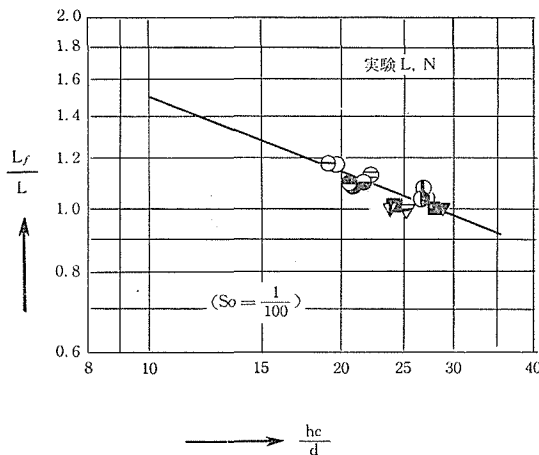


図-2  $L_f/L$  と  $h_c/d$  との関係

$$\frac{L_f S_0}{W} = 3.768 \left( \frac{h_c}{d} \right)^{-0.4} \dots\dots\dots(6)$$

で表わされることが次元解析の結果から知っている。ただし  $W$  はダムの高さ、 $d$  は砂粒の平均粒径であり、また上式の適用範囲は  $S_0 = 1/100 \sim 1/267$ 、 $h_c/d = 19 \sim 30$ 、かつ  $d = 0.756 \sim 0.89\text{mm}$  程度である。そこで(6)式において  $q$ 、 $d$ 、 $W$ 、 $S_0$  が与えられると  $L_f$  が決定される。

〔C〕 移動限界水深



つて計算される。さて限界掃流力に対応する  $n$  の値  $n_K$  を算定するには、 $v^*=v_c^*$  とおいて得られる  $\Psi$  の値  $\Psi_c$  を(8)式に代入すればよい。こうして  $n_K$  が定まるから、 $d, \sigma/\rho$ , および  $q$  が与えられるならば (9) 式の右辺が定まり、移動限界水深  $h_K$  が計算できる。後述するように  $h_K=h_F$  となるから、段丘肩における水深も定まる。

[D] 段丘部流砂量

段丘の肩を越えて段丘前面に堆積する流砂量を  $q_{sf}$  とすれば、 $q_{sf}$  は流砂量公式から算定することができる。堆砂実験に適する式として著者が提案した次式

$$\frac{q_s}{v_R^* d} = 5.6 (\Psi - \Psi_c)^{1.25} \dots\dots\dots(12)$$

を利用することにしよう。ここに  $v_R^*$  は移動する砂面上のまさつ速度であるから、 $q_s = q_{sf}$  とおき、 $v_R^*$  は段丘先端付近のまさつ速度を採用すればよいことになる。従つて流れの連続式とマンニング式より次式

$$v_R^* = n_f q \sqrt{g} / h_K R K^{1/6} \dots\dots\dots(13)$$

が得られる。 $n_f$  は段丘流砂面上の  $n$  である。 $h_K, q, n_f$  が定められれば上式より  $v_R^*$  が確定し、(12)式より  $q_{sf}$  を計算することができる。

[E] 段丘位置

任意時刻における段丘の位置は、つぎのようにして求めることができる。給砂開始後  $t$  秒における堆砂形状は大略 図一4 に示すような形となるはずで、図中の  $\Delta FPQ$  は段丘流砂量のみによつて堆積した流砂の水中の見掛けの容積である。そこでこの容積を単位巾当りに直すとその断面積  $A_F$  は次式で表わされる。

$$A_F = \frac{t \cdot q_{sf}}{(1-\lambda)} \dots\dots\dots(14)$$

ここに  $\lambda$  は砂の空けき率である。図中の  $F$  点は前述の段丘始点であるから、 $\overline{FD}$  直線上に  $P$  点を取り、(14)式を満足するように  $P$  点を決定すれば段丘位置は確定する。

[F] 堆砂面形と水面形

図一4 における  $\Delta NPQ$  の面積は、 $t$  秒間に上流から補給された砂の水中容積に相当するものと考えられるから、この断面積  $A$  は次式から計算してもよい。

$$A = \frac{t \cdot q_{so'}}{(1-\lambda)} \dots\dots\dots(15)$$

ここに  $q_{so'}$  は単位時間、単位巾当りに補給される給砂量で、見掛けの砂の容積である。

さてここに注意すべきことは、 $\overline{PN}$  は直線ではないがかなり直線に近い曲線であつて、その形状は不等流の運動方程式、連続式、流砂量公式、流砂に関する連続式、抵抗法則を連立して求めるべきである。まず不等流に対する運動方程式(2)において

$$I_f = v_R^{*2} / gR \dots\dots\dots(16)$$

とおけば次式が得られる。

$$i_s = \frac{v_R^{*2}}{gR} + \frac{dh}{dx} \left( 1 - \frac{h_c^3}{h^3} \right) \dots\dots\dots(17)$$

ここに  $i_s$  は砂面勾配である。また任意堆砂面上では式

$$hR^{1/6} = nq\sqrt{g}/v_R^* \dots\dots\dots(18)$$

が成立するが、上式における  $v_R^*$  を知るためには任意断面における流砂量  $q_s$  を定めねばならない。これまで行なつた堆砂実験の結果によれば、

$$q_s = q_{sf} + (1-\lambda) \int_x^{x_F} \delta dx \dots\dots\dots(19)$$

とおいたときの堆砂厚さ  $\delta$  は、 $q_{so}/q$  が過大でない限りは上下流を通じてほぼ一様とみなすことができる。すなわち 図-4 における堆砂面  $\overline{NP}$  上では、 $q_s$  は下流にむかい直線的に減少するものとみなせば、次式

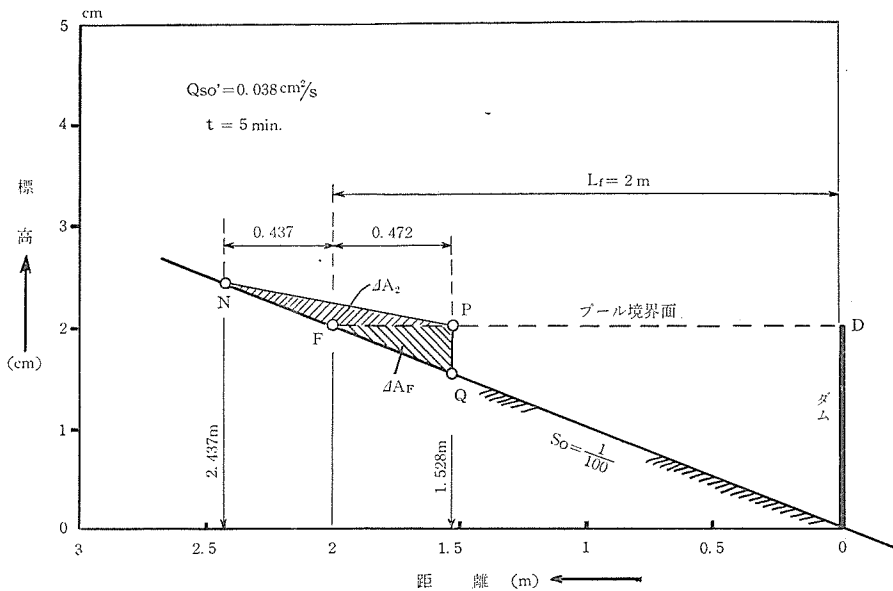


図-4 給砂開始5分後における堆砂形の概形

$$q_s = q_{sf} + \frac{X'}{l_s} (q_{so} - q_{sf}) \dots\dots\dots(20)$$

によつて  $q_s$  の値を定めることができる。ここに  $l_s$  は堆砂面の長さであり、 $X'$  は段丘を起点として上流向けに測つた距離である。こうして  $q_s$  が求められると(12)式より  $v_R^*$  が定まり、(17)式により任意断面の砂面勾配  $i_s$  が決定され、

$$Z = Z_s + \int_0^{X'} i_s dX' \dots\dots\dots(21)$$

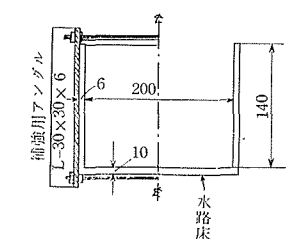
によつて各断面の標高が定められる。さらに水深  $h$  をこの上に付加することによつて水面形も求めることができる。

### 第3節 実 験

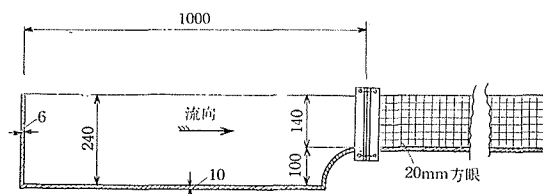
従来実施した木製矩形水路による実験では、段丘部付近の水利現象、ことに段丘部肩における水深の時間的变化や段丘のすぐ下流の水面形を観測するのに不便を感じるが多かつた。すなわち段丘は時間の経過とともに移動するので、堆砂面標高と水位を各測線ごとにポイントゲージで読みとる方法は、段丘付近の局部的形状を測定するには不十分であつた。また水位管を多数、一か所に密集して配置することは、流れを不当に乱す恐れがあるのでやはり適当でない。そこで新しく設備した合成樹脂製の矩形水路を利用して堆砂実験を行ない、側壁方向から堆砂現象を写真に撮影することにした。

#### 〔A〕 実験装置

実験水路は巾20cm、深さ14cm、長さ5.50m、有効長4.40mの亚克力製の矩形水路で、側壁および底板の厚みはそれぞれ6mm、10mmである。なお側壁内面には2cm方眼の目盛りが付けてある(図一5)。給砂器は従来使用したものに若干の改良を加え、一たんゲートから排出された砂をさらに第2のゲートで調節し、余分の砂は回収することによつて給砂量がかかなり正確にできるようになつた。その他の揚水装置、計量装置などは従来の実験と同様であるから省略する。



単位 mm



図一5 実験水路構造図(実験N)

#### 〔B〕 実験方法

水路の上流から水と砂とをそれぞれ一定の割合で流し、下流にとりつけた高さ2cmの矩形断面の堰の上流に堆積する砂の面と水面の標高を写真撮影によつて測定した。使用砂は犀川産のものから篩分けによつて、0.6~1.20mmの範囲のもののみを集めた。その平均粒径は $d_m=0.844\text{mm}$ 、比重 $\sigma/\rho_l$ は2.63であつた。流量 $q$ と給砂量 $q_{so}$ の組み合わせは表一1に示すように8組であつた。水路床勾配 $S_0$ はすべて1/100であつたから、水だけを流したときはすべて射流を堰きとめた場合の水面形状が得られた。

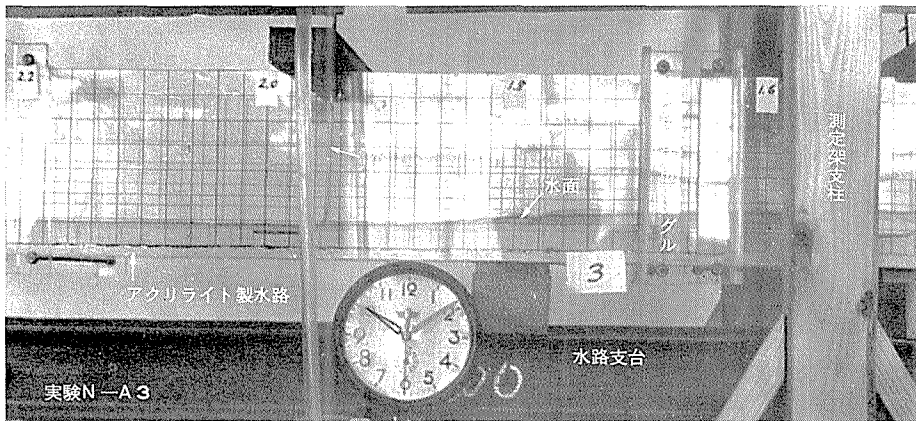
水路の側方、約1.5mはなれた位置から写真撮影を一定の時間ごとに行ない、段丘位置は5分ごと、堆砂面全体については20分ごとに測定した。なお念のため、水路の流れ方向に50cmごとに配置した水位管による測定も一部併用した。図一6はN-A3の写真で、水のみを流しているときのプール末端付近の水面形を示している。図一7は実験

N—B1 で、段丘が前進している状態を示している。

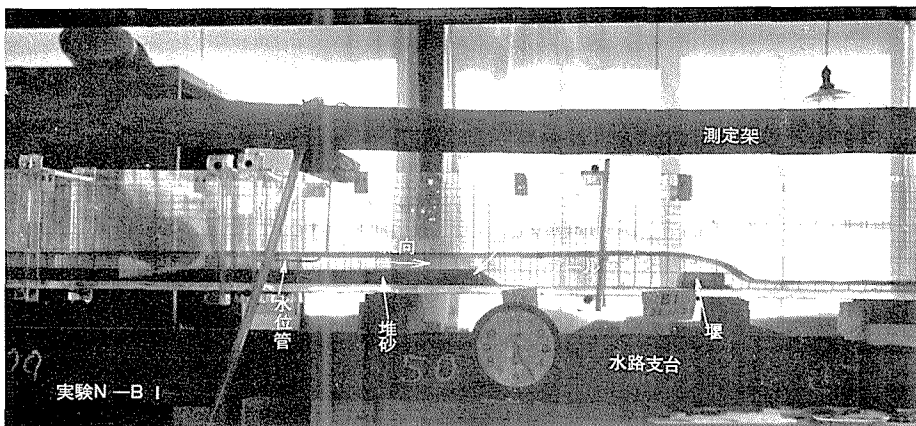
### 〔C〕 実験結果と考察

撮影した写真をキャビネ大の印画紙に引き伸し、水路側壁に目盛られた 2 cm 方眼の間隔を印画紙上で測定して、比例によつて各部の堆砂面標高と水位を計算した。表—2 は実験 N—A 3 についての測定結果をまとめたもので、表—3 は堆砂面の土流端と段丘の先端が時間の経過とともに移動する状態を示している。また 図—8 と 図—9 は、堆砂形と水面形の変化を示している。

さて写真から求めた段丘上の水深  $h_F$  は、時間が経過しても大体一定値をとる傾向がある。表—4 は実験 N—B 1 と N—A 4, N—A 3 についての  $h_F$  の変化状態を

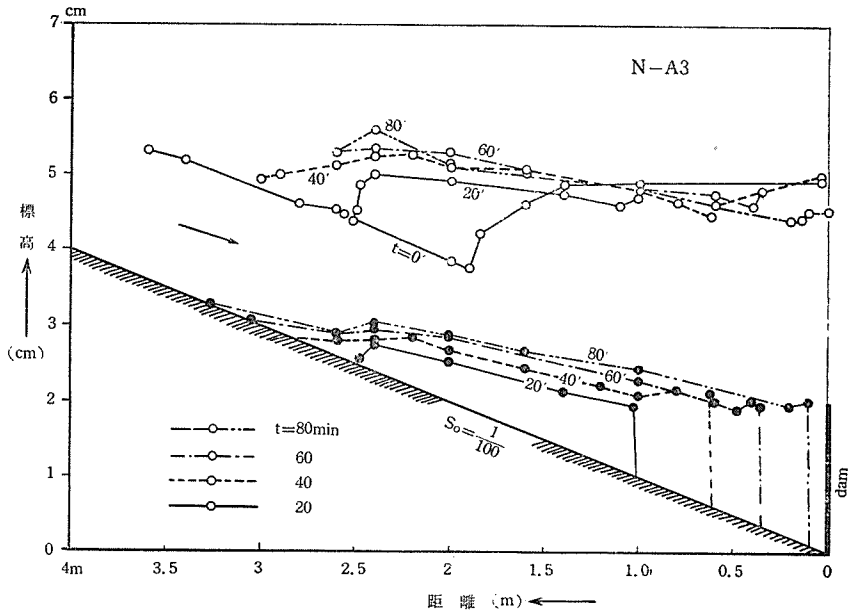


図—6 給砂を始める以前の背水曲線形（実験N—A3）

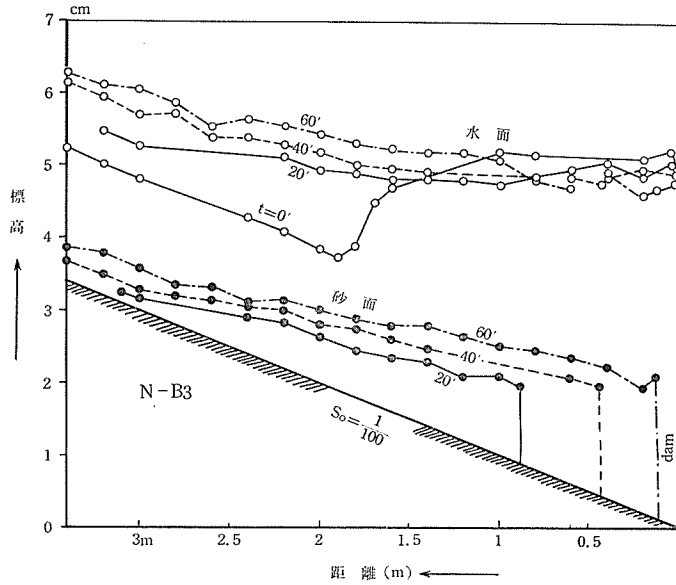


図—7 前進中の段丘と水面形（実験N—B1）

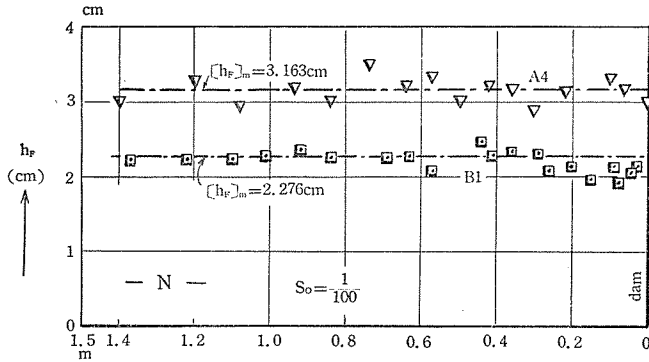




図一八 水面形と堆砂形の時間的変化 (実験N-A3)



図一九 水面形と堆砂形の時間的変化 (実験N-B3)



図—10 段丘部水深  $h_F$  と段丘位置との関係 (実験N)

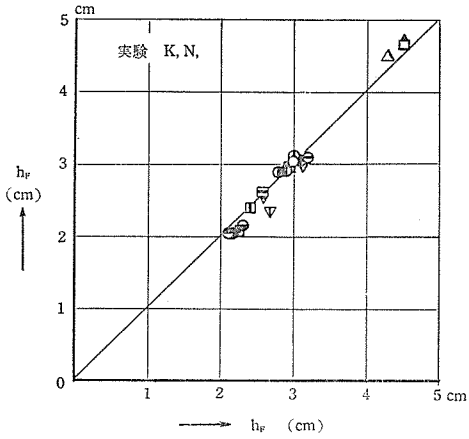
示したもので、図—10 はこれを図示したものである。こうして得られた平均の  $h_F$  の値は表—5 の最右の欄に記入してある。同表には実験 K の場合の  $h_F$  も併記している。

つぎに移動限界水深  $h_K$  を(9), (10), (11) 式から計算してみよう。再実験とも砂粒径は 0.8~0.9mm 程度であるから、 $v_c^*$  の計算は(10)式の第3番目の式

$$v_c^{*2} = 0.034(\sigma/\rho - 1)gd \dots\dots\dots(10')$$

を用いればよい。この式を用いて  $v_c^*$  を計算すると、表—5 のようになる。また(11)式において  $v_R^* = v_c^*$  とし、かつそれぞれの粒径について無次元量  $N_s$  を計算すると、 $N_s$  の値はほぼ 0.101 程度となる。この値を用いて(9)式から  $h_K$  を計算したのが表—5

の最後の欄に示してある。試みに  $h_K$  を縦軸に、 $h_F$  を横軸にとつて実験 K および実験 N の結果を図示すれば 図—11 が得られる。描点は原点を通つて水平と45度の傾斜をなす直線上に集中することが明らかで、この理由から段丘部水深  $h_F$  は解析的に算出された移動限界水深の  $h_K$  にひとしいことが証明されたのである。なお一実験中では流量  $q$  が一定に保たれているから、(9)式の右辺は一定で、結局  $h_K$  は一定となる。従つて実験中は段丘部水深  $h_F$  がほぼ一定である理由も説明できる。



図—11 移動限界水深  $h_K$  と段丘部水深  $h_F$  との関係

## 第4節 解析の実例

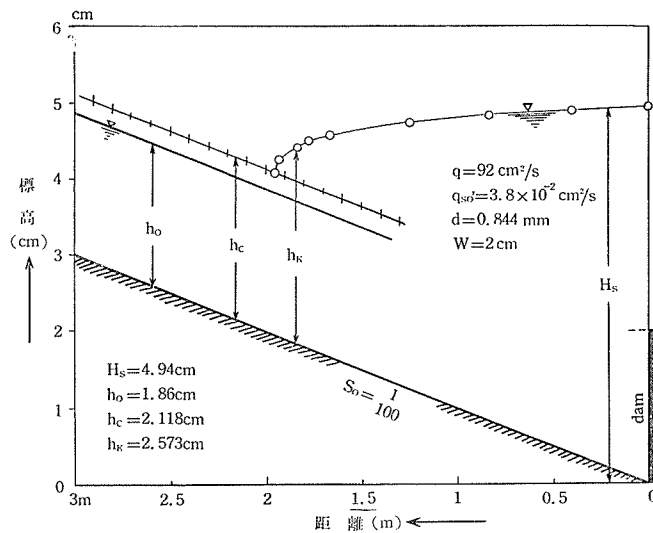
前節に詳述した方法を用い、実験 N—A 3 を例にとつて堆砂現象を計算し、最後に実測結果と比較してみることにする。計算に先立つてつぎの諸元が与えられるものとする。

$Q=1.84$ l/sec	$d=0.844$ mm
$B=20$ cm	$\sigma/\rho=2.63$
$q_{so}=0.038$ cm <sup>2</sup> /sec	$\lambda=0.47$
$S_0=1/100$	$H_S=4.94$ cm
$W=2$ cm	

そこで給砂開始後5分および40分における堆砂形と水面形を計算してみよう。

## 〔A〕 給砂前の水理現象

プール内部の水面形は(4)式で示したように、まさつ損失を無視して計算することにした。簡単のため限界水深となる位置まで(5)式が成立するものとするれば、 $h_c=2.118$ cmであるから、 $x_c'=201.8$ cmと算定される。 $x_c'$ より上流部分は射流状態でほぼ等流をなすと見られる区間であり、実験N—A 3の実験結果の図—9を参照することによつて、この部分の粗度係数 $n$ は0.01267となつた。このようにして水だけを流したときの水面形は図—12のようになった。



図—12 給砂開始前における水面形

## 〔B〕 段丘水深

移動限界水深  $h_K$  は(9)式から計算された。まず岩垣公式 (10') によつて  $v_c^*$  を算定するのであるが、 $d_m=0.844\text{mm}$ 、 $\sigma/\rho=2.63$ とおき  $v_c^*=2.141\text{cm/s}$ を得た。また  $\Psi_c=0.034$  に対応する  $N_S$  は(11)式より 0.1044 であり、従つて  $n_K=0.01025$  が得られ、この程度の粒径に対する段丘下流の粗度係数  $n_K$  は 0.01 程度であることを示している。そこでいま  $q=92 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ 、 $n_K=0.01$  とすれば(9)式を満たす  $h_K$  は 2.573cm となる。この値を用い、前記の水面曲線上で水深  $h$  が  $h_K$  にひとしくなる位置  $x_K'$  を (4)式から逆算すると  $x_K'=1.844\text{m}$  となつた。そこで  $x > x_K'$  の区間では砂粒は移動し、 $x < x_K'$  の範囲では砂は静止していることになる。

## 〔C〕 段丘始点

段丘始点 **F** は堆砂開始点と必ずしも一致するものでなく、段丘の肩が通過する軌跡と水路床との交点であると見なすことにすると段丘流砂量の計算には都合がよい。さて(6)式より  $L_f$  を計算すると  $L_f/L=1.038$  となり、ほとんどプールの長さ  $L$  にひとしいので、計算の簡単のためここでは  $L_f \approx L$  とみなして計算をすることにしよう。この場合には段丘肩は、堰のクレストを通過する水平面上を移動することになる。

## 〔D〕 段丘流砂量

流砂量公式(12)を

$$q_s = \beta v^* (v^{*2} - v_c^{*2})^{1.25} \dots\dots\dots (22)$$

の形に変形すれば係数  $\beta$  は

$$\beta = \frac{5.6d}{[(\sigma/\rho - 1)gd]^{1.25}} \dots\dots\dots (23)$$

であるから、 $d=0.844\text{mm}$ 、 $\sigma/\rho=2.63$  を代入することにより(22)式はつぎの式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} q_s &= 1.028 \times 10^{-3} v_R^* (v_R^{*2} - v_c^{*2})^{1.25} && \text{cm}^2/\text{s} \\ v_c^{*2} &= 4.585 && \text{cm}^2/\text{sec}^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

任意の  $v_R^*$  に対する  $q_s$  を迅速に求めるためにあらかじめ表を作製した。つぎに段丘流砂量  $q_{sf}$  をやはり (24) 式から計算するのであるが、このときの流砂面上の粗度係数  $n_f$  は(11)式から計算するのが最も合理的ではあるが、実験  $N$  の描点は(11)式の示す曲線よりもやや大になる傾向があり、そのまま  $N$  実験に対して上式を用いるのはやや不満足ではあるが、移動床の上の抵抗法則として完全なものが現存しない状態においては、止むを得ず同式によることにしたい。そこで上式を参考とすることにより実験  $N-A 3$  に対しては  $n=0.041$  として以下の計算を進めよう。 $n_f=0.0141$ 、 $h_K=2.573\text{cm}$ 、 $R_K=2.046\text{cm}$  を(23)式に代入すれば、 $v_R^*=3.00\text{cm/s}$  が得られる。この  $v_R^*$  を (24) 式に代入することにより段丘流砂量  $q_{sf}=0.01974\text{cm}^2/\text{s}$  が得られる。

## 〔E〕 堆砂面上の流砂量分布

いま給砂を開始して後5分を経過したときの堆砂面の拡がり求めてみよう。(14)式において  $q_{sj}=0.01974\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $t=300\text{sec}$ ,  $\lambda=0.47$  とおけば  $A_F=11.15\text{cm}^2$  を得る。また同一時間内に水路内に堆積する砂の水中容積は、(15)式において  $q_{so'}=0.038\text{cm}^2/\text{sec}$ , とおくことにより  $A=22.49\text{cm}^2/\text{sec}$  が得られる。

さて段丘の肩がプール境界平面上にあり、かつ  $A_F=11.15\text{cm}^2$  となるためには  $P$  点はダムから1.528m上流の位置に存在せねばならない。同様にして  $A=22.49\text{cm}^2$  となるためには、図-4における堆砂上流端  $N$  点はダムから2.437mの上流に存在することが必要である。図-4はこのように定められた堆砂面形の略図である。ただしこの図では  $\overline{NP}$  を仮りに直線とみなしているのであつて、正確な堆砂形状はつぎの[F]項において詳細に検討する。

つぎに堆砂面上の流砂量分布はつぎのようにして定めることができる。 $N$  点においては  $q_{so'}=0.038\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $P$  点においては  $q_{sj}=0.01974\text{cm}^2/\text{s}$  であるから、(20)式において  $l_s=90.9\text{cm}$  とおけば各測点の  $q_s$  が計算できる。そのため  $\overline{NP}$  の間に20cmごとの測線を設け、それぞれ  $q_s$  を計算すると表-6の第2欄が得られた。図-13は、 $t=5$ 分、40分における堆砂面上の  $q_s$  の分布を示したものである。

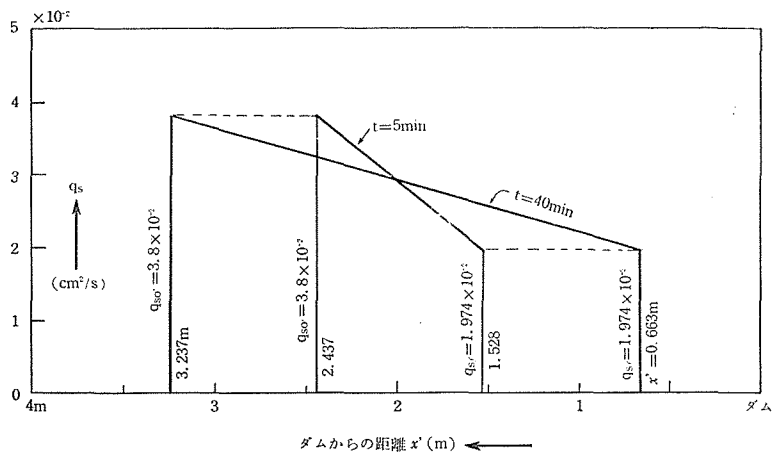
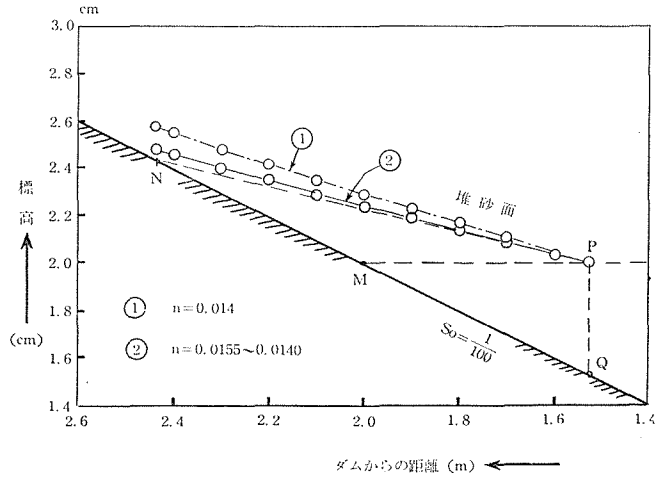


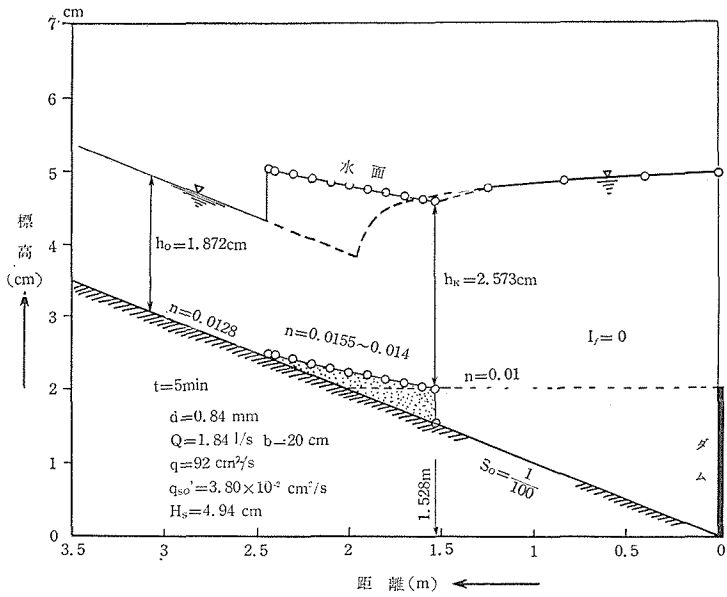
図-13  $t=5$ 分、40分における堆砂面上の流砂量分布

#### [F] 堆砂面形と水面形の算定

各測線上の  $q_s$  が求められたから(24)式に代入して、 $v_R^*$  を逆算し、つぎに(18)式の右辺に代入することにより、この式を満足する  $h$  を計算した。この場合あらかじめ  $h$  と  $hR^{1/6}$  の関係を示す計算表を作製しておき、内挿によつて  $h$  を求めた。つぎに  $dh/dx$  を求め、(17)式によつて各測線上の砂面勾配  $i_s$  を算出して図示したのが 図-14 における curve



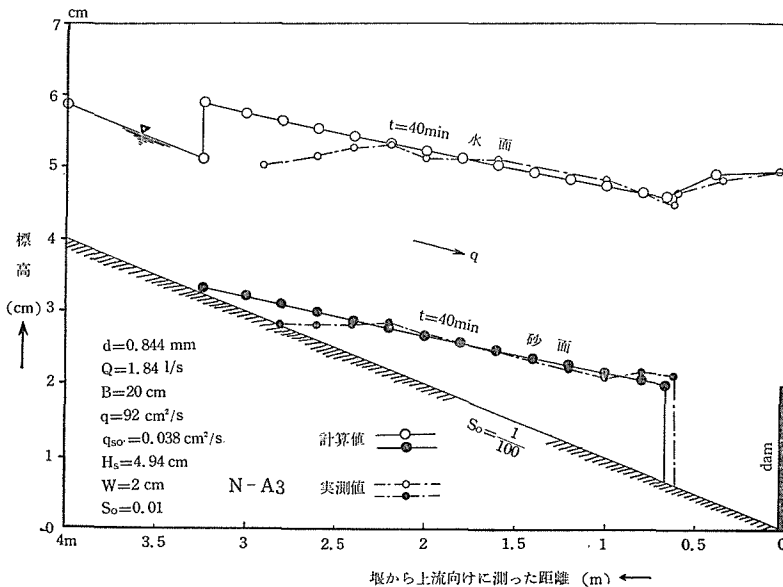
図一14 n の変化にもとづく堆砂形の変化



図一15 t = 5 分における水面形と堆砂形状

①である。図をみると  $N$  点に相当する堆砂面の標高が床面よりもかなり上方に存在することになり、最初に仮定した堆砂形と一致しない。この原因の一つは、上下流を通じて  $n$  を一定と仮定した点にあると思われるので、いま(11)式を参考とすることにより  $n$  を 0.0140 から 0.0155 にまで漸変するものと仮定して、再び同様の計算を行なつてみた。この際簡単に  $n$  は  $\Psi$  とともに直線的に変化するものとするれば、 $\sigma/\rho$ 、 $d$  など是一定であるから  $n$  は  $v_R^{*2}$  に比例するものとして  $n$  の値を定めてみた。これによつて堆砂形と水面形を計算した結果はまとめて表一7 に示してある。またこれを図示すると、図一14 における curve ② となる。計算された堆砂形は最初に仮定した  $\overline{NP}$  面にきわめて近く、 $N$  点を通る測線上の両者の差は 0.466mm に過ぎない。使用した砂の平均粒径が 0.844mm であることを考えれば、この程度の差は許しうる範囲であるとみなすことができる。堆砂面上に  $h$  を付加することにより、水位を求めることができる。図一15は以上をまとめて描いた図である。

同様の計算を  $t=40$ 分 の場合について行なつた計算結果は表一7 にまとめられ、これを図示したのが図一16 である。



図一16 t = 40分における水面形と堆砂形状

### 第5節 解析結果と実験結果の比較

前節に述べた解析法は、滑面矩形水路を 1/100 の勾配に維持しておき、上流から水と砂をおのおの一定の割合で流したときの堰上流の堆砂状態を理論的に計算したものであるが、これを実験N-A3の結果と比較することによつてその妥当性を確かめることが

できる。以下兩者について若干比較を行なつてみよう。

(1) 堆砂開始点の位置

実験では  $x_K' = 1.81\text{m}$  であつたが、計算では  $x_K' = 1.844\text{m}$  となり、かなり好結果を得た。

(2) 段丘部水深

実験では  $h_K = 2.60\text{cm}$  であり、計算では  $2.573\text{cm}$  となり、大体近い値を得た。

(3) 段丘前進速度

段丘流砂量  $q_{sf}$  は時間の経過にかかわらず一定であるから、理論的には次式が成立する。

$$UxS_0 = q_{sf}(1-\lambda) \dots\dots\dots(25)$$

ここに  $x$  : プールの上流端から下流むけに測つた段丘までの距離

$U$  : 段丘の前進速度

さて  $t = 5$  分ならば  $x = 200 - 152.8 = 47.2\text{cm}$  であるから、上式から計算すると  $U = 4.73\text{cm/min.}$  が得られるが、一方実測結果は表一3 から  $5.3\text{cm/min.}$  である。また  $t = 40$  分ならば  $x = 133.7\text{cm}$  で  $U = 1.67\text{cm/min.}$  となるが、実測値は同表から  $1.8\text{cm/min.}$  となり、両者はかなりよく一致している。

(4) 堆砂面形

計算された堆砂面勾配は大体一定傾斜をもつ平面に近い形をもち、上流部は下流部よりもやや急となつた。平均勾配は  $t = 5$  分のときは大体  $5.4 \times 10^{-3}$ 、 $t = 40$  分の場合には  $5.18 \times 10^{-3}$  であつた。さて実測値の方は図一8 の  $t = 20, 40, 60$  分の場合、 $5.28 \sim 5.30 \times 10^{-3}$  程度であることをみれば、堆砂形状についても計算結果は大体実測値に近いことがわかる。

(5) 水面形状

$t = 0$  における水面形のうち上流の射流部では、 $n = 0.0128$  とおくことによつて実測値と計算値をほぼ一致させることができた。プール部分の水面形状の計算は、まさつ損失を無視することによつてきわめて簡単になつたのであるが、実測値と比較してもいちじるしい差異は認められなかつた。 $t = 40$  分における水面形は  $x < 2.50\text{m}$  の区間ではかなりよく実測値と一致しているが、それより上流区域では実測値の方が急に低くなつている。これは恐らく実験中に、何かの原因で給砂量がへつたために、一時的に上流部の砂面が洗掘され、それにとまつて水位も低下したのであらうと推察される。

## 第6節 結 言

以上を総合してみればこの計算方法は実測値とかなりうまく一致することがわかり、かつ計算も容易である点からみて、矩形水路内の堆砂現象に対する実用的な一解法であるといふことができる。合成樹脂製の実験水路を用いることによつて、従来やや不明確であつた段丘部水深と移動限界水深の関係を理論的に明らかにすることができたが、このことは矩形水路に限らず、一般の貯水池における堆積現象にも重要な関係をもつもの



である。

なお計算の過程において、移動床上の抵抗法則に関し若干の仮定が使用されたのであるが、この方面の研究が進歩したならば一層この解析法は正解な結果を生ずるであろう。さらに段丘のすぐ下流に発生する渦のため、水位がこの部分で下流にむかい若干もり上る部分が存在するのであるが、今後はこの点を考慮に入れた解析が望まれる。

本文を草するに当り、終始御指導いただいた、京都大学石原藤次郎博士、有益な助言を寄せられた岩垣雄一博士に対し衷心より感謝する。また実験に対し熱心に協力された信州大学助手、草間孝志教官、当時学生の三木勲（大成建設 K. K 勤務）、宮島和夫（長野県土木部勤務）、吉池章（中部電力 K. K 勤務）の各氏の御努力に深謝する。

### 引用文献

- (1) Iwagaki, Y. : On the analysis of mechanism of river-bed variation by characteristics; *Memoirs of the Faculty of Eng., Kyoto Univ.*, Vol. 18, No. 3, 163—171, (1956).
- (2) 杉尾捨三郎：堰上流の堆砂に関する解析的研究；土木学会論文集，第32号，18—25，(1956)。
- (3) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究；土木学会論文集，第41号，1—21，(1956)。
- (4) Sugio, S. : On the equilibrium bed slope in a steady nonuniform flow; *The Journal of the Faculty of Eng., Shinshu Univ.*, No. 7, 31—43, (1957).
- (5) 杉尾捨三郎：堰の堆砂に関する実験（第3報）；信州大学工学部研究報告，No. 5, 119—137, (1955)。

表-1 実験 N の 諸 元

実験番号	N-A 1	A 2	A 3	A 4	B 1	B 2	B 3	B 4
$q$ (cm <sup>2</sup> /s)	73.5	84.5	92.0	110.5	72	86	93.5	108.5
$q_{so'}$ (cm <sup>2</sup> /s)	$3.8 \times 10^{-2}$	3.27	3.8	3.8	4.1	5.7	5.7	6.09
記号	▽	▽	▽	▽	□	□	□	■

表-2 堆砂面・水位の標高(実験N-A 3)

$t$ 時分	測線	水位	砂面	床面	水深	$t$ 時分	測線	水位	砂面	床面	水深
0	0	4.66	0	0	4.66	42	1.20	4.90	2.21	1.20	2.71
0	0.04	4.94	0	0.04	4.90	43	1.60	5.08	2.45	1.60	2.63
0	1.0	4.92	0	1.0	3.92	43.5	2.0	5.08	2.67	2.0	2.41
0	1.4	4.88	0	1.4	3.48	43.5	2.2	5.28	2.84	2.2	2.44
0	1.6	4.63	0	1.6	3.03	45	2.4	5.23	2.79	2.4	2.44
0	1.84	4.22	0	1.84	2.38	45	2.6	5.12	2.79	2.6	2.33
0	1.90	3.77	0	1.90	1.87	45	2.9	5.02	0	2.9	2.12
0	2.0	3.87	0	2.0	1.87	45	3.0	4.93	0	3.0	1.93
0	2.6	4.53	0	2.6	1.93	1 00	0.24	4.70	0	0.24	4.46
0	2.8	4.62	0	2.8	1.82	00	0.36	4.69	1.92	0.36	2.77
0	3.4	5.23	0	3.4	1.83	00	0.40	4.62	1.96	0.40	2.66
0	3.6	5.32	0	3.6	1.72	00	0.48	4.70	1.86	0.48	2.84
20	1.0	4.81	0	1.0	3.81	1.5	0.60	4.74	1.98	0.60	2.76
20	1.02	4.69	1.974	1.02	2.72	2.0	1.0	4.83	2.33	1.0	2.50
20	1.12	4.60	—	—	—	3	2.0	5.3	2.86	2.0	2.44
21	1.40	4.76	2.135	1.40	2.63	4	2.4	5.34	2.94	2.4	2.40
21	2.0	4.92	2.52	2.0	2.40	4	2.6	5.28	2.90	2.6	2.38
22	2.4	4.99	2.74	2.4	2.19	1 20	0	4.54	0	0	4.54
22	2.48	4.85	2.74	2.48	2.11	20	0.10	4.53	2.03	0.10	2.50
22	2.52	4.38	0	2.52	1.86	20	0.14	4.46	1.96	0.14	2.50
22	2.60	4.46	0	2.60	1.86	20.7	1.0	4.88	2.45	1.0	2.43
40	0	4.70	0	0	4.70	21.5	1.6	5.06	2.60	1.60	2.46
40	0.04	5.01	0	0.04	4.97	21.5	1.8	5.15	2.80	1.8	2.35
41	0.62	4.531	2.151	0.62	2.38	22	2.4	5.6	3.04	2.4	2.56
42	1.00	4.70	2.80	1.0	2.62	22	2.6	5.3	2.90	2.6	2.40

表-3 堆砂面の範囲(実験N-A 3)

時刻 時分	前 端 m	後 端 m	時刻 時分	前 端 m	後 端 m
11 00	1.80	1.80	12 00	0.34	3.05
05	1.42	2.13	05	0.26	3.09
10	1.27	2.30	10	0.21	3.15
15	1.12	2.38	15	0.14	3.10
20	1.01	2.41	20	0.09	3.04
25	0.90	2.54	22	0.05	3.04
30	0.80	2.62	23	0.04	3.04
35	0.71	2.74	24	0.02	—
40	0.62	2.80	25	0.	—
45	0.53	2.88	26	0.	3.10
50	0.48	2.94			
55	0.41	2.96			

表-4 段 丘 部 水 深

実 験 N-B 1			実 験 N-A 3			実 験 N-A 4		
時 間 時 分	$x$ m	$h_F$ cm	時 間 時 分	$x$ m	$h_F$ cm	時 間 時 分	$x$ m	$h_F$ cm
10	1.37	2.23	6	1.40	2.49	5	1.40	3.03
15	1.22	2.23	10	1.28	—	10	1.20	3.29
20	1.10	2.25	15	1.14	2.92	15	1.08	2.95
25	1.01	2.29	20	1.02	2.72	20	0.94	3.20
30	0.92	2.37	25	0.92	2.54	25	0.84	3.03
35	0.84	2.27	30	0.82	2.50	30	0.74	3.50
45	0.69	2.26	41	0.62	2.34	35	0.64	3.23
50	0.63	2.27	50	0.50	2.66	40	0.57	3.34
55	0.57	2.09	55	0.42	2.63	45	0.50	3.03
1 00	0.48	2.29	1 00	0.36	2.77	50	0.42	3.24
1 06	0.44	2.46	1 10	0.24	2.54	55	0.36	3.19
1 10	0.41	2.29				1 00	0.30	2.90
1 15	0.36	2.34				1 05	0.22	3.15
1 20	0.29	2.30				1 16	0.10	3.33
1 25	0.26	2.09				1 18	0.06	3.18
1 30	0.20	2.13				1 20	0.02	3.00
1 35	0.15	1.96						
1 39	0.09	2.13						
1 40	0.08	1.92						
1 42	0.03	2.12						
$(h_F)_m$	2.276cm		2.600 cm			3.163 cm		

表-5 移 動 限 界 水 深

実験番号	砂粒径	$v_c^*$ (m/s)	$q$ ( $m^2/s$ )	$h_K R_K^{1/6}$	$h_K$ (cm)	実 測 $h_F$ (cm)
K-III			$186 \times 10^{-4}$	$2.690 \times 10^{-2}$	4.645	4.50
IV			189	2.733	4.710	4.50
V	mm		179	2.588	4.489	4.30
VI	$d=0.885$	$2.165 \times 10^{-2}$	115	1.663	3.046	3.00
VII			117.5	1.699	3.105	3.00
IX	$\sigma/\rho=2.59$		117	1.692	3.095	3.20
X	$d^{1/6}$		115	1.663	3.046	3.10
XI	$=0.3099$		108	1.562	2.885	2.80
XII			109	1.576	2.905	2.90
XIII			77.6	1.122	2.162	2.30
XIV			72.6	1.050	2.045	2.10
XV			73.0	1.055	2.050	2.20
N-A 2	mm		$84.5 \times 10^{-4}$	$1.225 \times 10^{-2}$	2.368	2.69
A 3	$d=0.844$		92.0	1.334	2.554	2.60
A 4			110.5	1.602	3.00	3.16
B 1	$\sigma/\rho=2.63$	$2.141 \times 10^{-2}$	72.0	1.044	2.059	2.28
B 2			86.0	1.247	2.405	2.40
B 3	$d^{1/6}$		93.0	1.356	2.592	2.61
B 4	$=0.3074$		108.5	1.573	2.955	2.94

表一六 堆砂形・水面形の計算

(t=5 min.)

$x$ (m)	$q_s$ (cm <sup>2</sup> /s)	$v^*$ (cm/s)	$n$	$h$ (cm)	$R$ (cm)	$v^{*2}/gR$	$\frac{dh}{dx}\left(1-\frac{hc^3}{h^3}\right)$	$i_s$	$Z$ (cm)	水位 (cm)
1.528	$1.974 \times 10^{-2}$	3.000	$1.400 \times 10^{-5}$	2.573	2.046	$4.488 \times 10^{-3}$	$0.442 \times 10^{-3}$	$4.930 \times 10^{-3}$	2.000	4.573
1.600	2.119	3.035	1.413	2.566	2.042	4.602	0.335	4.937	2.036	4.602
1.700	2.320	3.082	1.432	2.561	2.039	4.755	0.239	4.993	2.085	4.646
1.800	2.520	3.127	1.449	2.555	2.035	4.903	0.205	5.108	2.136	4.691
1.900	2.721	3.170	1.466	2.551	2.033	5.045	0.169	5.214	2.187	4.738
2.000	2.922	3.210	1.483	2.548	2.030	5.179	0.145	5.324	2.240	4.788
2.100	3.123	3.250	1.499	2.544	2.028	5.314	0.123	5.437	2.294	4.838
2.200	3.324	3.288	1.515	2.542	2.027	5.443	0.099	5.547	2.349	4.891
2.300	3.525	3.324	1.530	2.540	2.025	5.567	0.086	5.653	2.405	4.945
2.400	3.726	3.360	1.545	2.538	2.024	5.692	0.075	5.767	2.462	5.000
2.437	3.800	3.372	1.550	2.537	2.024	5.734	0.072	5.806	2.483	5.020
摘要	$n=0.0140\sim 0.015$ $t=5\text{ min.}$									

表一七 堆砂形・水面形の計算

(t=40min.)

$x$ (cm)	$q_s$ (cm <sup>2</sup> /s)	$v^*$ (cm/s)	$n$	$h$ (cm)	$R$ (cm)	$v^{*2}/gR$	$\frac{dh}{dx}\left(1-\frac{hc^3}{h^3}\right)$	$i_s$	$Z$ (cm)	水位 (cm)
66.3	$1.974 \times 10^{-2}$	3.000	$1.40 \times 10^{-5}$	2.573	2.045	$4.491 \times 10^{-3}$	$0.112 \times 10^{-3}$	$4.603 \times 10^{-3}$	2.000	4.573
80	2.071	3.024	1.409	2.567	2.043	4.567	0.101	4.668	2.064	4.631
100	2.213	3.058	1.422	2.563	2.040	4.677	0.090	4.767	2.158	4.721
120	2.355	3.092	1.435	2.559	2.037	4.783	0.079	4.862	2.254	4.813
140	2.497	3.122	1.447	2.555	2.035	4.886	0.070	4.956	2.352	4.907
160	2.639	3.153	1.459	2.552	2.033	4.988	0.064	5.052	2.452	5.004
180	2.781	3.182	1.471	2.549	2.031	5.085	0.058	5.143	2.554	5.103
200	2.923	3.211	1.483	2.547	2.030	5.182	0.051	5.233	2.658	5.205
220	3.064	3.238	1.494	2.544	2.028	5.276	0.047	5.323	2.763	5.307
240	3.206	3.266	1.505	2.542	2.027	5.368	0.039	5.487	2.871	5.413
260	3.349	3.292	1.517	2.541	2.026	5.460	0.036	5.496	2.980	5.521
280	3.490	3.318	1.527	2.539	2.025	5.548	0.034	5.582	3.091	5.630
300	3.632	3.343	1.538	2.538	2.024	5.635	0.023	5.658	3.203	5.741
323.7	3.800	3.372	1.550	2.536	2.023	5.736	0.016	5.752	3.338	5.874
摘要	$n=0.014\sim 0.0155$ $t=40\text{ min.}$									

## Summary

**One Practical Calculation to Determine the  
Sedimentation Behind  
a Weir in a Rectangular Flume**

Sutesaburo SUGIO

(Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering)

This paper describes one practical calculating method to determine the variation of sedimentation which takes place with time behind a low dam in a rectangular flume when water discharge and granular sand are constantly and continuously supplied from upstream at a certain rate. Several experiments are practiced in a laboratory flume made of acrilite, calculated results being compared with those ones obtained by the experiments.