

堰の堆砂に関する実験

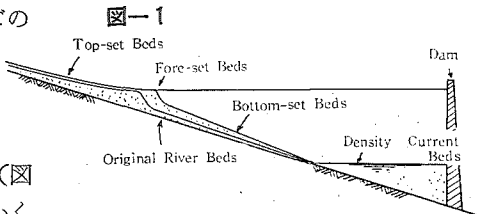
杉 尾 捨 三 郎*

(信州大学工学部土木教室)

要旨 矩形水路の途中に低い堰を設け、上流から水と共にほぼ均一粒径の砂をそれぞれ割合を変えて流し、その時の堆砂の進行状態と水面縦断形の変化を実測した。本文はまずその実験結果を記述し、かつそれらの結果に基づいて流量、流砂量、掃流力、砂面勾配等の間の関係を調べたものである。

1 緒 言

ダム背後の貯水池が流出土砂によつて埋没せられる問題は近年に到つて漸く重大視せられるようになった。ことに河川の流出土砂量の多い我国では、極めて短年月で貯水池が埋没せられるため、貯水量の減少によつて発生電力量の漸減を来し、貴重な水資源を無駄に放流する結果となるだけでなく、流入河川の河床を高めて洪水位を上昇せしめ、洪水時の冠水区域の拡大、排水不良、其の他種々の弊害を生じている例は枚挙にいとまのない程である。殊にダムの築造には莫大な工事費を要するから、一体流出土砂によつてダムの堆砂はどのように進行するか、上昇してゆく砂面勾配は終局的にある安定勾配に落ちつくものであろうか、また水位はどのように上昇するか等の解決は今後のダム築造計画をなす上にも極めて重要な事項であらう。



既設ダムの堆砂状態をしらべてみると(図一) 河川が貯水池に流入する部分はひかく(1) 的粒度の粗い砂礫があつまり、デルタ状をなして前進し、水中に浮遊する比較的細粒の土砂はデルタを越して貯水池底に堆積し、最も微粒の土粒子はいわゆる density current (1) の形となつて遠くダム附近にまで運ばれ湖底に沈澱することが知られている。またデルタより上流部は河床のやや平らな部分があり、これより上流部分の河床は次第に上昇し、末端は次第に上流へのびてゆく。水位もまたその部分では上昇してゆくと云われている。(2) 我国においても既設のダムについて年々堆砂量の調査が行われ、堆砂量と地質の関係(3) 堆砂量と流域面積、貯水池容量の関係(3) についての研究があるが、残念ながら堆砂が行われる際の流砂量、掃流力、流量、砂面勾配などの間の関係を水理学的に研究せられた例を聞かない。

さて上にのべたように、貯水池の堆砂問題を解決するには粗い砂礫即ち河床物質 (bed load) と浮遊物質 (suspended load) を同時に扱うことが必要であるが、それは現在の水理学の段階ではかなり困難な問題である。ゆえに筆者はまず河床物質だけによつて低い堰が埋没される現象を実験することにし、この時の堆砂面形状と水位の時間的変化

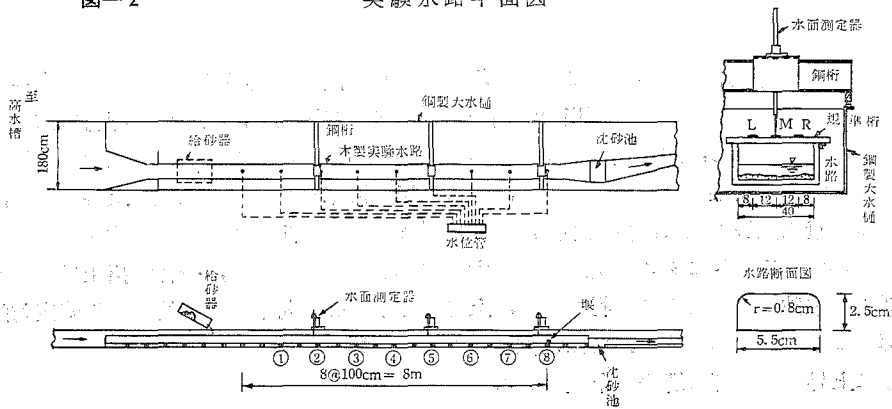
* 信州大学助教授

を詳細に実測することにより、上述の水理学的諸量の間の関係をしらべて見ることにした。ただし問題を努めて単純化するために、水路勾配が一定の矩形水路の下流端に堰をとりつけ、流量は一定に保ち、かつ上流からは平均粒径 $d_m = 0.885\text{mm}$ のほぼ均一粒径の砂を、給砂装置によつてほぼ一定速度で水路内に投入し、その時の堆砂面と水面の変化を30分ないし1時間ごとに実測した。その結果興味ある二三の事がら明らかになったのでここに報告する。

第1章 実験の経過

2 実験装置と実験方法

図-2 実験水路平面図



A) 実験装置 (図-2)

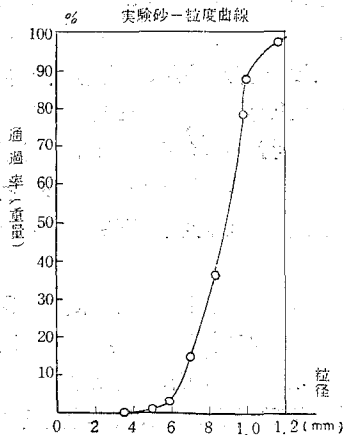
実験水路側面図

場所：京都大学工学研究所水理実験室

水路：巾40cm、有効長10mの檜製矩形鉤けずり水路

静圧管：径2mmの銅製ピトー管9個をゴム管にて水位管に連結する。

図-3



給砂器：京都大学で使用中的のもので、4個のgateを通して乾燥砂を投下する装置

gateの開度とmotorの回転速度を変えることにより給砂量を調節できる。

堰：檜材製、高さ2.5cm、天巾5.5cmの矩形断面

B) 測定方法

使用砂：木津川産の砂で、ほぼ一樣粒径のものを選別した。平均径 $d_m = 0.885\text{mm}$ 、比重は2.59、粒度曲線は図-3に示す。

水路床勾配：1/267, 1/100の2種

流量と給砂量の割合を変えて13組の実験を行ったが、その詳細は表-1の如くで水路床が、1/267

表 - 1

実験 No.	V	II	III	IV	VI	K	VII	X
記号	△	■	□	▲	○	⊖	⊕	⊗
流量 cc/s/cm	179	179	186	189	115	117	117.5	115
給砂量 gr/s/cm	0.350	0.267	0.190	0.130	0.267	0.2083	0.120	0.070
水路床勾配	1/267							

実験 No.	XII	XI	XIII	XV	XIV
記号	●	●	●	●	●
流量 cc/s/cm	109	108	77.6	73.0	72.6
給砂量 gr/s/cm	0.340	0.133	0.267	0.200	0.140
水路床勾配	1/100				

のときには流量2種、給砂量4種、計8組の実験を行い、1/100のときには流量2種、給砂量3種、計5組の組合せで実施した。

図-2の如く水路を横ぎり1m間隔に9個の測線を設けて上流端をNo.0とし、最下流端をNo.8と名づけ、その8cm下流に堰をとりつけた。堆砂面の標高をはかるために基準桁を水路の両壁に渡し、基準桁にとりつけた3個のB.Mはあらかじめ測量用のレベルで精確にlevelingを行つておいた。

実測は30分ないし1時間ごとに行つたが、その要領をのべると、まず3台のポイントゲージをNo.0, 3, 6において基準桁上のB.Mの読みをとり、次いで基準桁をとり除き、水面と堆砂面の標高を読む。6分後にポイントゲージを移動してNo.1, 4, 7を読み、同様にして次の6分後の読みをNo.2, 5, 8でとることとした。なお1つの測線上では中央および左右の3箇所の読みを平均をもつて実測標高とすることとした。(図-2)

3 実験結果

A) 底勾配 $i_b = 1/267$ のとき

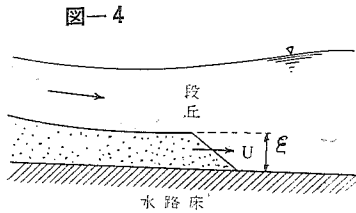
i) 概説：水路に水だけを流したとき、水面形はごくわずかながら逆勾配をなしていたが、これは水路床勾配に対する等流水深が限界水深よりやや小であつたためと思われる。

さて砂を投入しはじめると、水路の上流部分は一面に砂で覆われるようになり、やがて最前端に小さい砂堆の段丘ができた。段丘は時間のたつにつれて厚みを増しながら、かつ次第に前進速度を減じながら前進し、ついに堰にまで到達した。砂が堆積するに従つて、堆積部分の水面は順次上昇し、その部分のみ水面勾配は急になつたが、段丘より下流の堰に到るまでの区間の水面曲線は最初と全く不変であつた。ただ段丘がちかづくにつれてその部の水表面はかなり波立ちが現われ、これは給砂量が多いときに甚だしいように見られた。

段丘部のやや上流に水位の最低の位置が認められ、段丘の移動と共にその位置も移動

した。砂漣は全体的に少く、ただ給砂量が多いか、流量の大なるときには相当砂漣も大になり、ポイントゲージによる水位測定は不可能となつたので、このときはピトー管のみに頼ることにした。

ii) 砂堆段丘：段丘ができると流砂は砂堆面上を転動・滑動しながら最前端に到着し、段丘の肩から転落して水路床に落ちつくと、あとから落下するもの下敷きにされる。また小さい地すべりのように少量ずつまとまつて崩れることもあり、大体水中の安息角にちかい角度をなすようであつた。(図-4)



段丘の前面には流れ方向とは逆向きの渦ができ、水路床のこぼれ砂粒が段丘にひきよせられるのが認められた。図-5は給砂量と流量が異るときの段丘の位置-時間曲線を示している。給砂をはじ

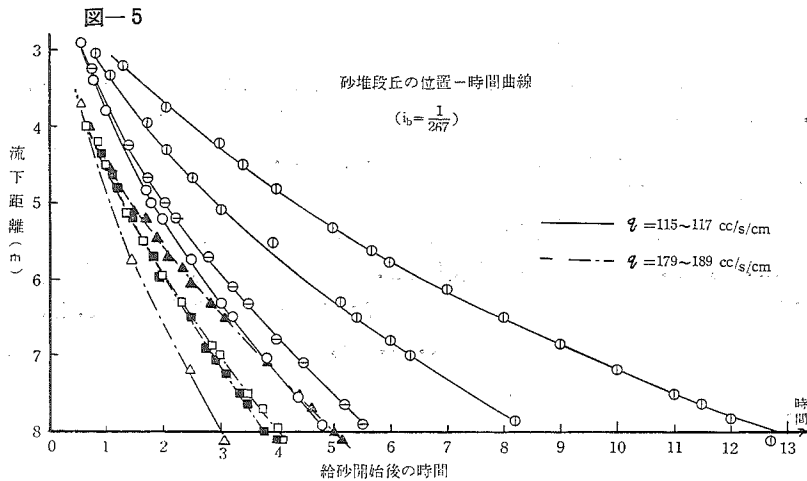
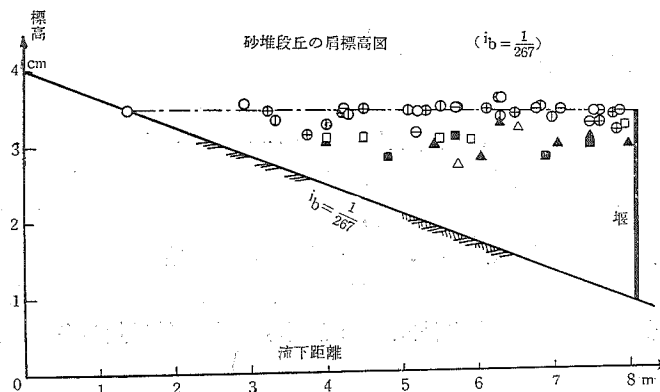


図-6



めてから段丘が堰に到着するに要した時間は、実験Ⅴが最小で約3時間を要し、最も長かつたのは実験Ⅹで約13時間かかった。

実験を通じて、給砂量 G_s および流量 Q が大になるほど段丘の前進速度はすみやかで、また段丘が堰にちかづくほど前進速度を減ずることが分つた。砂堆段丘の厚さを適時測定して、その肩の標高と段丘の位置の関係を点描したものが図一6である。これによると堰の上流大体4 m以内では、段丘の標高はほぼ堰の頂を通る水平面上にちかい位置を移動する傾向がみられ、流量の大きいときにはやや低い所を移動することが分る。

なお局部的にその面より低い段丘ができることもあつたが、そのときはすぐ上流に第2の小さい段丘が発生し、それが発達して最前線に追いつき、図に示すように厚さよとなることが観察された。

iii) 流砂の堆砂状況：図一7は実験Ⅶについて、各測線ごとの堆砂面標高が時間とともに上昇する有様を示している。いずれの測線でも、砂の堆積の上昇速度は時間とともに幾分減少し、また堆砂面勾配は下流ほどゆるやかとなつた。給砂量 G_s が大なる実験では砂面勾配は急となり、 G_s が小なるときは砂面勾配はゆるく、上昇速度も小であつた。図一8は Q がひとしくて G_s が異なるときの4種の実験において、段丘が丁度 $x=5.22m$ の位置に到着したときの砂面形をひろい出してplotしたものである。

なお堆砂厚が増加する割合は、同時刻についてくらべると上流も下流も大した差異はなく、一般には下流がわの方がやや薄いことが認められた。

iv) 水面形の変化：実験Ⅶについて各測線ごとの水位変化を点描したのが図一9である。上流部の測線 No. 0, 1, 2 等では給砂開始とともにただちに水位が上昇したが、No. 3 より下流では一たん水位は下つてから上昇しはじめる。また水位の最もひくい位置が段丘の移動とともに移動するありさまも知ることができる。この水位曲線と図一7の堆砂面標高曲線を各測線ごとに同一座標で平行移動してみると、かなりうまく一致することが分る。そこでこのような矩形水路では、堆砂面が上昇すればそれに応じて水位もほぼ同じだけ上昇する傾向があることが実証せられた。

以上の図を用い、堆砂面と水位の1時間ごとの変化を画いたprofileの一例が図一10である。

図一7

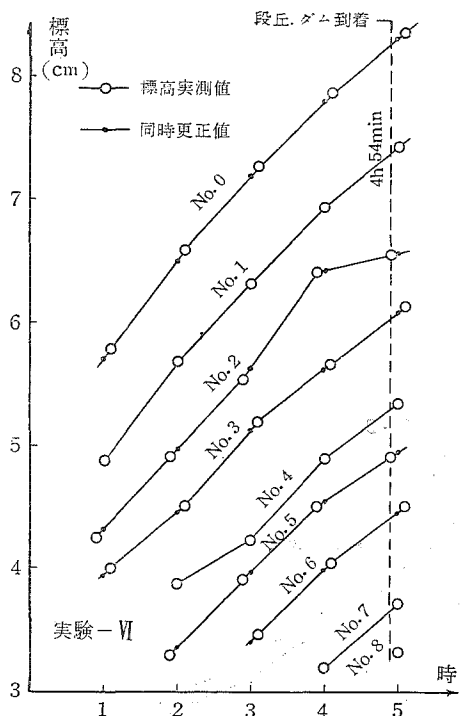


図-8

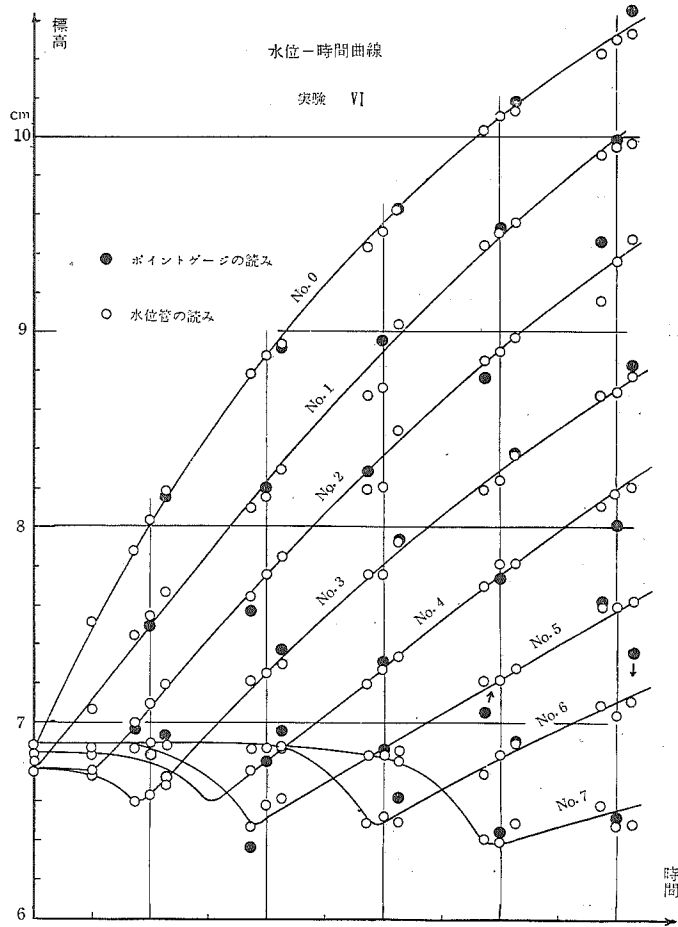
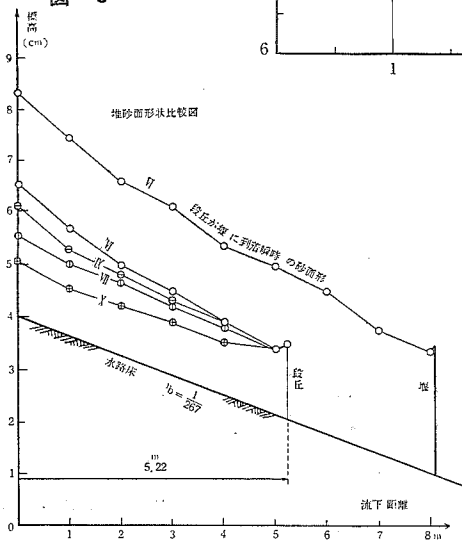
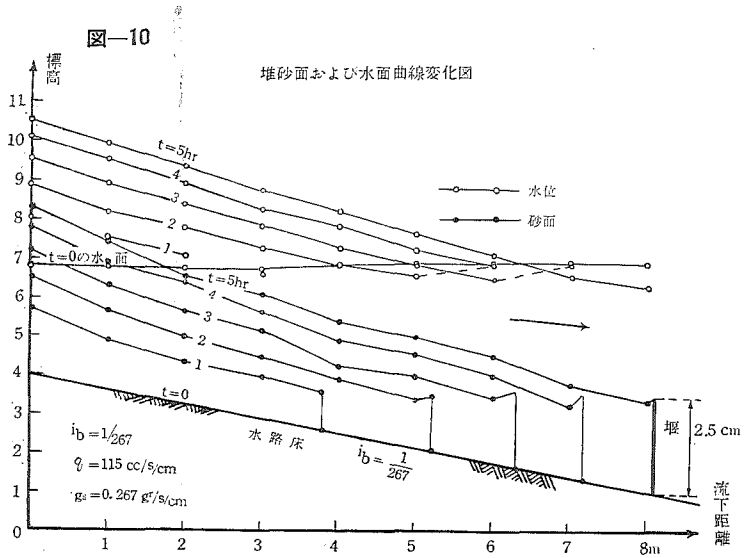


図-9





一般に流量がひとしくても給砂量 G_s が大きいと上流に厚くたまり、 G_s が小さいと下流に厚くたまる傾向がみられた。なお図-10の段丘部の砂面が鉛直にちかく図示しているのは、図の縦横縮尺の異なるためであつて、実際の段丘は図-4のごとく傾斜面をなしていることを附記しておく。

B) 底勾配 $i_b = 1/100$ の場合

i) 概説:

水路に水だけを流したときの水面形は図-13に示すように、射流の途中を限界水深より高い水深にまで堰き上げたときに生ずる形となつた。砂を流しはじめると砂粒はまず、大体堰の頂を通る水平面が水路床を切る位置附近に堆積しはじめ、その位置を中心として前後に堆砂面はひろがつてゆく。その前端は砂堆段丘をなし、水面形は堆砂面上のみ上昇し、堆砂面の後端が後退するとともに水面形の変化も上流に移動した。

ii) 堆砂の進行状態:

給砂をはじめると、砂粒は射流部を転動・滑動しながら水路をくだり、堰の頂を通る水平面が水路をきる位置附近に一応堆積して一つの堆砂丘をなす。最初に堆砂がはじまる位置をM点とし、M点に最初の堆砂丘ができると、上流側から流されて来た砂粒は堆砂丘の上流斜面におちつき、その部分の砂とともに順次砂丘面をすべり上り、下流斜面から転落するから、砂丘ははじめのうちはかなり速やかに下流方向に移動する。砂丘が次第に大きさを増してその高さがある限界に達すると、あたかもその部分が堰きとめられた形となり、その部分の水位がみるみる上昇して、砂丘の上流約11~14cmの所に第2の小砂丘ができる。

このようにして砂丘の数は次第に増加するが、砂丘と砂丘の間にも次第に砂がたまりはじめ、一つ一つの砂丘の区別が不明瞭になり、ついには $i_b = 1/267$ の勾配のときの実験にみられると同様な堆砂面縦断形を呈するにいたる。砂堆段丘の前進する模様は図一

図-11

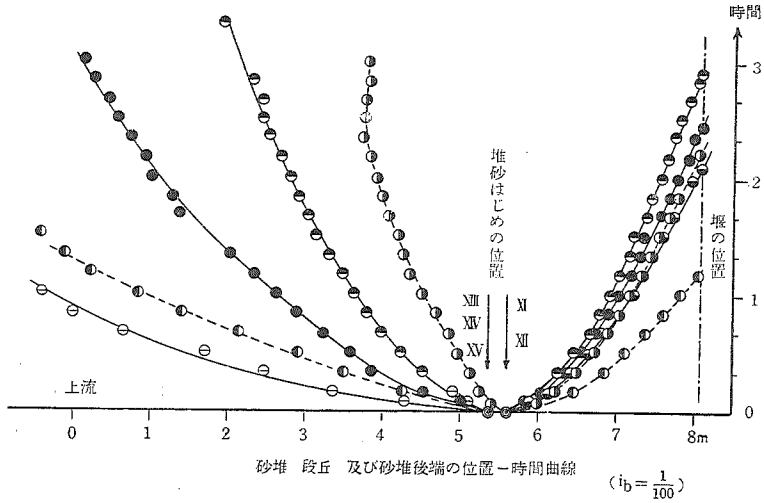
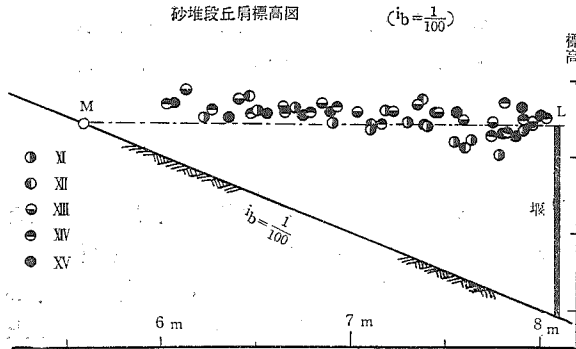


図-12



11の右半分に示すごとくであり、砂堆段丘の肩の標高を点描したものは図-12である。段丘の前進速度はGsおよびQの大なるほど大であることは $i_b = 1/267$ のときと同様であつた。図-11の左半分は堆砂面の後端を点描したもので、この後退速度はGsの大なるほど、またQの小なるほど大であつた。図中Ⅹの実験

は後退速度のもつとも小なるもので、4.20mの位置より上流へは砂は堆積しなかつた。Ⅺ, Ⅻの実験では堆砂後端はかなり速やかに給砂器のある位置まで到達したから、仮りに給砂器をもつと上流に設置するだけ充分実験水路が長かつたとするならば、砂堆の後退はさらに上流までのびるものと予想せられた。

なお最初に堆積のおこる位置M点は、流量の大小に左右される傾向があり、図-11に示したごとく、流量大なるときはM点はやや下流に移動する傾向があつた。

同様な傾向はまへの $i_b = 1/267$ の場合についても推察されることで、図-5の段丘の位置-時間曲線をみると流量に応じて大体2種のgroupに分類できる。そして流量大なる4組の実験は明かに下流側から段丘が発生することを認めうる。

iii) 水面形

水だけを流したときの水面形は、限界勾配以上の水路にみうけられる典型的な水面形を呈した。砂を流してM点を中心に前後に砂がたまりはじめると、砂の堆積した部分の

水面区間のみが上昇し、その上、下流の水面形状には余り変化がなかつた。また段丘部附近に水位の最低の箇所があらわれること、および段丘が堰に到着すると堰附近の水位が急に低下することは $i_b = 1/267$ の場合と共通の現象であつた。なお最初かなりなめらかな水面形をなしていても、砂堆段丘が堰にちかづくころには水面には波形が生じ、それに伴つて砂漣もひどくなり、測定を困難にした。

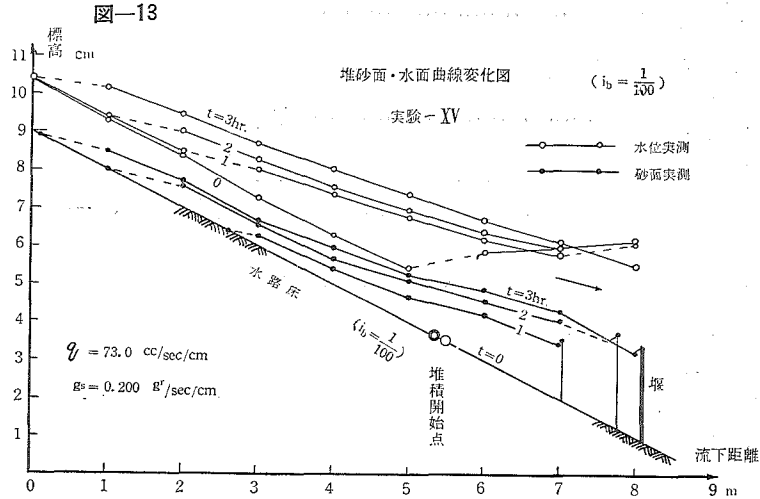


図-13は実験 XV についての砂面形と水面形の時間的变化を点描したものである。なお最上流部のほぼ等流をなすと考えられる区間の流れの状態は、『滑底面を土砂が流れるときの薄層流の実験』の結果と類似の流砂現象を呈することが観察された。

第2章 堆砂現象の一般的考察

本章においては堰による堆砂現象だけでなく、一般的に流砂を伴う水路において成立すべき水理学的条件について考察を試みることにする。

4 堆砂現象の一般的考察

流砂を伴う水路の途中に堰を設けたときの流れは水理学的には不定流 (Unsteady Flow) と考えられる。このような移動床上の流れ方向に x を、それと直角方向に水深 h をとつたとき、運動方程式として次式が得られる。

$$\cos\theta \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + a \frac{\partial (v^2)}{\partial x} = \sin\theta - \frac{\tau}{\rho g R}$$

ここに θ : 床面の傾斜角

h : 水深

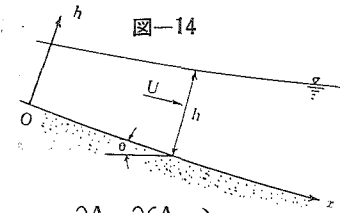
a : 係数

τ : 移動床上の単位面積あたりに働くまさつ力

ρ : 流水のみつど

R : 径深

(図-14)



傾斜角 θ はきわめて小さい場合を考えると、
 $\cos \theta \doteq 1$ ，又砂面勾配を i とすれば上式は

$$-i + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau}{\rho g R} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \dots\dots(1)$$

連続式としては、流積を A とすると

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (A \cdot v)}{\partial x} = 0 \dots\dots(2)$$

であるが、特に矩形断面水路では $A = bh$ より

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h \cdot v)}{\partial x} = 0 \dots\dots(2')$$

次に流砂量については従来多数の学者によつて種々の公式が提案せられているが、いずれも等流 (Uniform Flow) の場合について求められた実験式が多く、一般につきの形で表わされる。

$$G = F(\tau, \tau_c, J, d_m, \rho_s, \beta) \dots\dots(3)$$

ここに G : 単位巾あたり単位時間の流砂量

τ_c : 限界掃流力

J : 水面勾配

d_m : 砂粒の平均径

ρ_s : 砂粒の比重

β : 砂粒の配合状態を示す係数

流砂量公式については後に詳細にのべる。次に流砂量に関する連続式を求めてみよう。

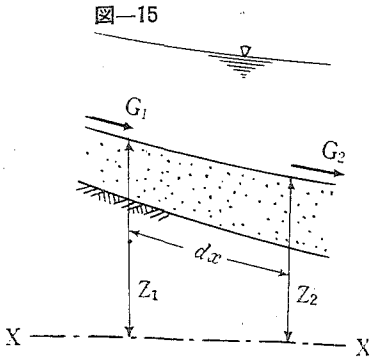


図-15において、流れ方向に dx だけ離れた 2 断面を考え、上流面からは単位巾単位時間あたり流入する流砂量を G_1 とし、下流断面から流出する量を G_2 とすれば

$$G_2 = G_1 + \frac{\partial G}{\partial x} dx$$

である。いま砂面の標高をある datum からかけて Z とすれば、単位時間に単位巾あたりの出入する流砂量の差は 2 断面間の堆砂厚さの増加となつて現れるはずであるから次式が得られる。

$$-\frac{\partial G}{\partial x} = \frac{\partial Z}{\partial t} \dots\dots(4)$$

(4)式は流砂量に関する連続式とも言ふべきもので、各辺が共に正值ならば堆積となり、逆に共に負値ならば洗掘を、また共に零にひとしければ堆積も洗掘も起らない平衡状態にあることを示す。

さらに幾何学的条件より

$$-i = \frac{\partial Z}{\partial x} \dots\dots(5)$$

$$i - \frac{\partial h}{\partial x} = J \dots\dots\dots(6)$$

最後に流砂ある移動床にはたらくまさつ力 τ と、流れの平均流速 v の関係を示す式が必要で、これは抵抗法則とよばれるものである。今このような不定流の移動床の場合の抵抗法則も、等流状態における抵抗法則と同様な形で表わされるものと考えたと

$$\frac{\tau}{\rho g R} = \frac{v^2}{C^2 R} \dots\dots\dots(7)$$

ここに C はChézy係数であつて、実験によつて求める以外にない常数である。

さて移動床として用いる砂粒を、ある一定のものを使うことにすれば、 d_m , ρ_s , β は常数と考えて差支えなく、 τ_c もまた一般に常数となるから結局未知数としては

$$i, h, v, G, \tau, Z, J,$$

の7個となる。一方方程式としては(1), (2'), (3), (4), (5), (6), (7)の7個あるから理論的には解けるはずなのであるが、實際上、7方程式を連立して一般的な場合を解くことはかなり困難である。しかも不定流にまで適用されうる流砂量公式はどこにもないし、さらに流砂を伴う流れに関する抵抗法則は未だ十分明かでなく、移動床上の C の値を理論的に求めることは現在の段階では困難な状態にある。

しかしこうした理論的扱いは他日にゆずることにし、本論文では主として堆砂現象を実験結果から眺めることにより、流砂量、掃流力、堆砂面勾配、流量および給砂量など間にはいかなる関連性があるかをしらべることにしたい。

第3章 実験結果に対する水理学的考察

本章においては、上述した実験結果を用いた場合、堰による堆砂現象においては流砂量、掃流力、砂面勾配、流量、等水理学的量の間にはいかなる関係があるかを調べたものである。

5 砂堆段丘部における流砂量

A. Schoklitsch は取水用堰堤の堆砂状態をしらべる目的で模型実験を行つた際、砂堆段丘が前進する事実を認め、また段丘部での砂粒径の鉛直分布を測定して興味ぶかい報告をしている⁽⁸⁾。さて砂堆段丘の前進する現象は、砂丘上を風が吹くときに生ずる砂丘の移動ときわめてよく似ていると思われる。そこで砂丘の移動について研究したF. M. Exnerの表示⁽⁹⁾に従うならば、段丘部における流砂量 G_F は近似的に次式で示すことができよう。

$$G_F = \xi \cdot u \dots\dots\dots(8)$$

ここに ξ : 段丘の厚さ (cm)

u : 段丘の前進速度 (cm/s) (図-4)

さて ξ の値は実験中に適時測定して図-12に描点してあるように、段丘の肩は堰頂を通る水平面にはほぼ平行に移動することが観測せられている。また u の値は段丘の位置-時間曲線(例えば図-5)に切線をひくことにより、容易に実測値を求めることができる。たとえば実験VIについてみれば、段丘の位置 x (上流端No. 0を原点として下流向けに x をとる)と経過時間 t (分)との関係を見るとほぼ拋物線にちかひので、

$$t = 5.07 \times 10^{-4} x^2 - 3.55 \times 10^{-2} x + 0.38$$

で表わすことにすれば微分して

$$u = 10^4 / (10.14x - 355) \times 60 \quad \text{cm/sec}$$

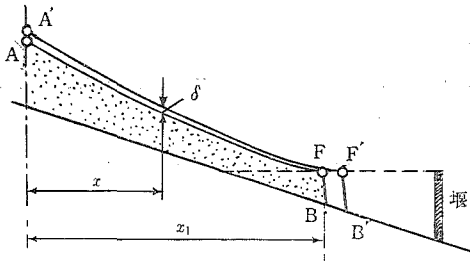
(8)式を用いて

$$G_F = (x - 144) / 1.6(10.14x - 335) \quad \text{cm}^3/\text{s/cm}$$

となる。段丘が前進するにつれて G_F はいかに変化するかといえば、図—17における \widehat{FW} 曲線で表わされる。この場合、段丘がすすむにつれて G_F はわずかながら増加する傾向がみとめられた。しかし $i_b = 1/100$ のときには余り変化はないように見うけられた。

6 流れ方向の流砂量分布

図—16



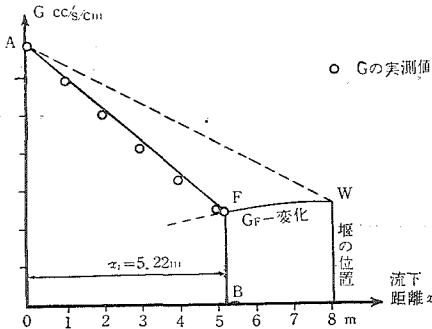
段丘が未だ堰に到着しないある時刻における堆砂面を考えよう。図—16において、砂堆段丘が x_1 の位置にあるとき、堆砂面縦断面を \widehat{AFB} とし、単位時間後の堆砂面形は $\widehat{A'F'B'}$ となつたものとする。さて A 点へは上流から常に一定量の給砂量 G_S があたえられ、また

段丘部 F では (8) 式で計算されるような流砂量 G_F が存在する。上流端より x なる距離にある横断面で、単位時間当りの堆砂厚さの増加を δ とすれば、その断面において単位時間に通過する流砂量 G は

$$G = G_F + \int_x^{x_1} \delta dx \dots\dots\dots (9)$$

(2) 式の右辺第 2 項は各実験の堆砂縦断面変化図から実測値をもとめることが可能である。本実験の範囲では、 δ の値は上流も下流も大して厚さの変化は少く、やや下流がうすく

図—17



堆積することが認められた。図—17において、描点は実測厚さと(8)式をつかつて G を計算してあり、実線 AF は δ が上下流とも一様であると仮定して画いた流れ方向の G 一分布である。以下本文では計算を簡略にするため、ある時刻においては δ は上下流一様と考え、すなわち流れ方向の流砂量分布はほぼ直線的に減少するとみなして計算を行つてみることにした。

7 掃流力の計算

いま問題を簡単にするために、流れの一瞬間の状態に着目するならば、流れは瞬間的には不等流 (Non-uniform Flow) であるとみなされるから、流れに関する運動方程式 (1) および連続式 (2') において

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

また本実験では、各実験ごとに流量を一定に保つたのであるから(2')式において

$$v \cdot h = q$$

とおけば、 q は単位巾あたりの流量となる。

これを(1)式に代入すれば

$$-i + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau}{\rho g R} + \frac{aq^2}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{h^2} \right) = 0 \dots\dots\dots(10)$$

τ はまた水路床の単位面積にはたらく流水の掃流力とも考えられるから(1)式を變形して

$$\tau = \rho g R \left[\left(i - \frac{dh}{dx} \right) + \frac{aq^2}{gh^3} \frac{dh}{dx} \right] \dots\dots\dots(11)$$

上式は不等流における掃流力を求める式であつて、特に広巾水路と考えられるときは

$$\tau = w_0 h \left[\left(i - \frac{dh}{dx} \right) + \frac{aq^2}{gh^3} \frac{dh}{dx} \right] \dots\dots\dots(12)$$

ただし w_0 : 水の単位重量とする。

特に、 $dh/dx = 0$ なるときは $\tau = w_0 h i$ となる。さて(12)式を本実験結果に適用する方法をのべると、

図-18において、ある時刻において Δx だけ離れた水流の2断面をとり、その水深をそれぞれ h_1, h_2 ; 砂面標高を z_1, z_2 とする。本実験においては、流れ方向 1 m ごとの水深と砂面標高を実測したので、 $\Delta x = 1$ m にとれば h_1, h_2 ; z_1, z_2 は既知である。よつて平均水深 $h_m = (h_1 + h_2)/2$ 、砂面勾配 $i = (z_1 - z_2)/\Delta x$ 、 $\Delta h/\Delta x = (h_2 - h_1)/\Delta x$ とおくことにより、(12)式を變形した。

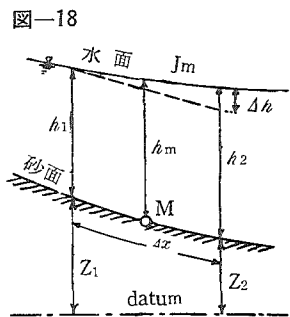


図-18

$$\tau_m = w_0 h_m \left[\left(i - \frac{\Delta h}{\Delta x} \right) + \frac{aq^2}{gh_m^3} \frac{\Delta h}{\Delta x} \right] \dots\dots\dots(13)$$

に代入して得られた τ_m を、2断面の中央位置における掃流力とみなして計算することにしたのである。

8 流砂量と掃流力

掃流物質の流砂量と掃流力の関係については従来数多の実験公式が提案せられているが、いずれも等流状態において求められたもので一般に(3)式で示される。このうち代表的なものを二三のべると、O'Brien and Rindlaub は Du Boys の表示を改良して

$$G = \Psi' (\tau - \tau_c)^m \dots\dots\dots(14)$$

を発表した。 Ψ' 、 m は常数

Einstein は別の観点に立つて、河床附近での速度変化の割合によつて流砂量を表わさんとし、それには水の揚力が砂粒の重さにうちかつ確率を計算し、次の様な無次元の量 ϕ と Ψ から成る関係式を得た。

$$\phi = f(\Psi) \dots\dots\dots(15)$$

ただし、 ϕ は流砂量、粒径、落下速度等を含む函数で、 Ψ は粒子の特性と底面まさつに關係する項である。

其の他無次元で表示されたものではShields, A. A. Kalinske, 椿, 式があり、Kalinskeの行つた表示は⁽¹²⁾

$$\frac{G}{\sqrt{\tau/\rho} \cdot pd} = 7.3\phi\left(\frac{\tau_c}{\tau}\right) \dots\dots\dots(16)$$

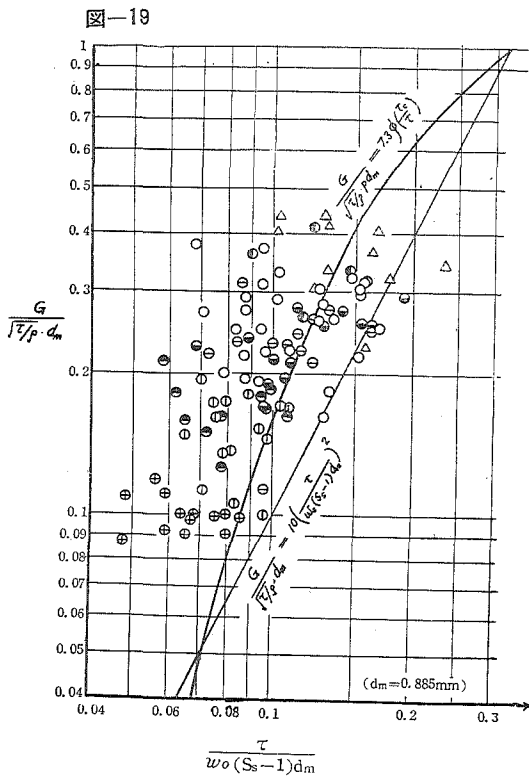
ここに p : 砂粒の配合程度を示す係数

Kalinske の表示は乱流理論に立脚した、しかも無次元表示の式で、Gilbert, Einstein, W. E. S., Meyer-Peter, などの等流状態の実験式とかなりうまく適合すると言われている。彼はまた式を簡単にするため次式をあげている。⁽¹³⁾

$$\frac{G}{u_* \cdot d_m} = 10\left(\frac{\tau}{w_o (\rho_s - 1) d_m}\right)^2 \dots\dots\dots(17)$$

ここに $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ = まさつ速度

(16), (17)式は図-19に示してある。さて本実験結果を試みに Kalinske の示す無次元座標



に従つて点描したものを図-19に併記した。これによれば描点はKalinske の示す式と大体類似の傾向をもつことが分るが、描点は相当散乱しており、このような移動床の不定流の実測はあまり精度がよくないことが分る。元來等流状態において実測した実験式でさえも、同じfieldの状態での他の観測者がつかつてみれば1000%以上の差ができることがあるとさえ云われている位、流砂量とそれを規定する要素を量的に結びつけることは困難なのである。

特に不定流の状態では水位や堆砂面の観測をなすに当り、時間をかけて正確によみとることが許されないし、また砂面に砂澁ができて測定を一層困難にする。また砂粒は一部堆積しながら掃流されるため、条件ははなはだ複雑となる

ことも一原因であらう。

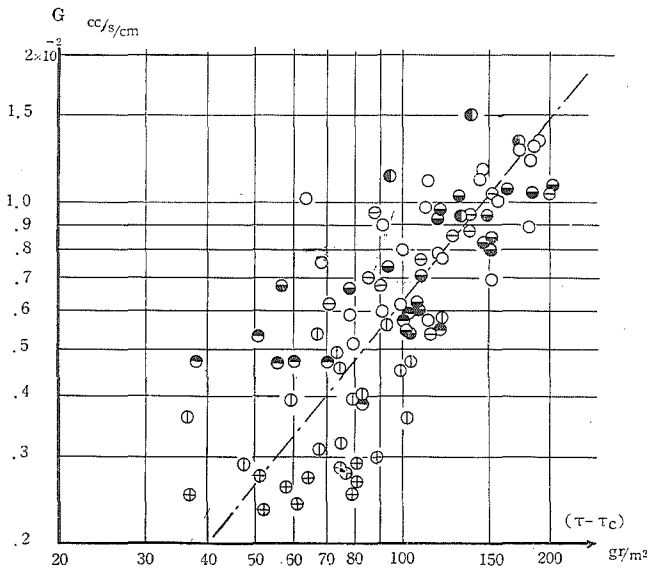
次にShield⁽¹⁴⁾の示した無次元表示に従つて描点を試みたが、系統的な結果は得られなかつた。

どの実験でも常に上流部分ほど掃流力 τ が大であり、かつ流砂量も大であつたから、無次元表示でない式、たとえば(14)式が成立するものと仮定し、(14)式の常数 ψ と m を実験値から求めてみた。本実験では砂粒の限界掃流力を求めるため水路勾配を4種類に変えてほぼ等流状態で実験を行つた結果、H. Kramerの公式

$$\tau_c = \frac{100 (\rho_1 - \rho) d_m}{6 M} \dots\dots\dots(18)$$

はずでこの種の砂粒の実験に適合すると言われており、本実験でも大体このことが実証せられたので、 $d_m=0.885\text{mm}$ 、 $\rho_1=2.59$ として $\tau_c=30.6\text{gr/m}^2$ を得た。この値を用いて G と $(\tau-\tau_c)$ の関係を対数方眼紙に点描すれば、図-20となる。ここでも描点

図-20



は甚だしく散乱して大体の傾向を示す程度であるが、試みに描点のほぼ中間を通る直線をひけば(14)式における $m=1.23$ 、 $\psi=1/46.5$ となつた。

以上のごとく砂漣の発生などによる水面の波立ち、その他の原因によつて満足すべき精度は得られなかつたが、堰の堆砂現象のような不定流の場合でも、掃流力と流砂量の計算法を適当に選ぶことにより、等流状態で求めた流砂量公式が、若干の修正によりあてはまるのではないかと予想せられるのである。しかし今後はさらに、粒径を変え、水路勾配も種々に変えることにより広範な実験を行う予定であり、それにより次第に明かになつてくることを期待している。

9 堆砂面勾配

段丘が堰に到達せぬ期間においては、どの地点でも堆砂面の勾配はわずかず増加するようであるが、流れ方向の堆砂面の縦断形はあまり形を変えることなく次第に厚さを増してゆく傾向があることは図-10によつても明かである。さて任意の位置における堆砂面勾配 θ は、(19)式から計算せられた τ とどのような関係があるかを点描したものが

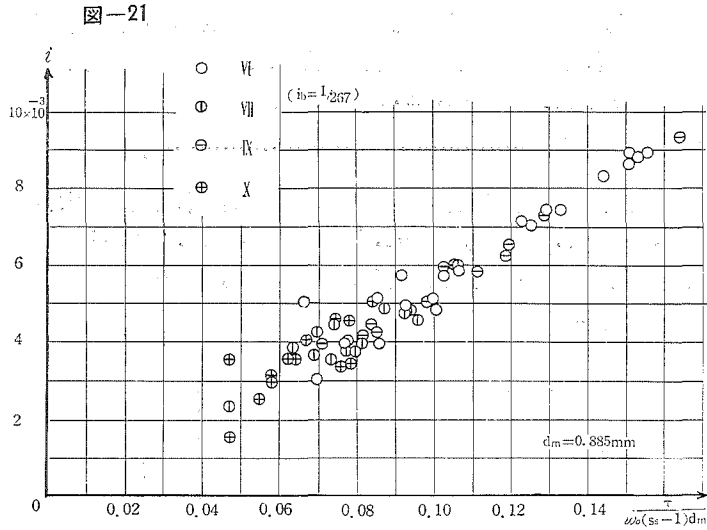
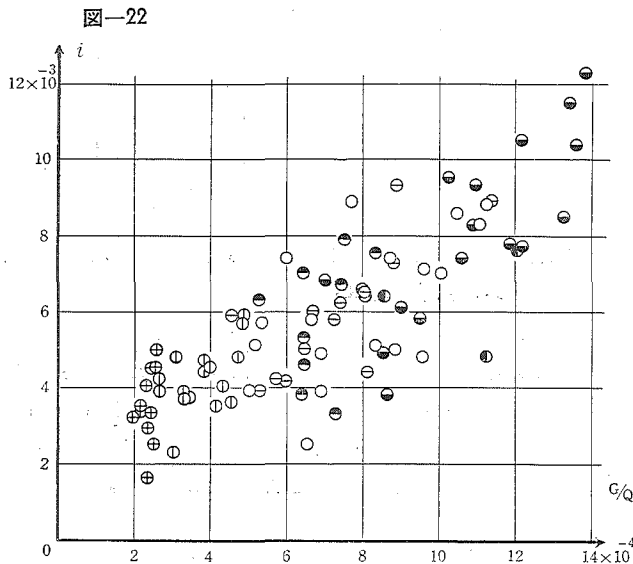


図-21である。この図は水路勾配が1/267の場合の実験、4種を点描したが、流量、給砂量の如何にかかわらず、かなりよく一つの曲線にのるかのように見えるのは興味深い。ただし水路床勾配が異れば描点はそれとは別の曲線にのる傾向があつた。



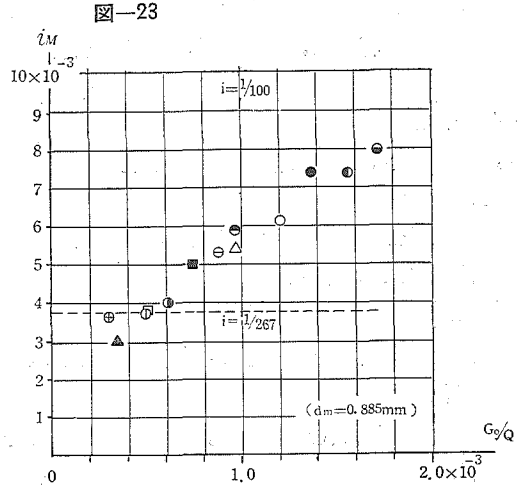
次に i と (G/Q) の関係をくらべてみると、図-22になつた。 i は (G/Q) の増加と共にほぼ linear に変化する傾向がみられた。このことはまた『流量にくらべて流砂量のひかく的大きい場合は堆砂面は急勾配となる』ことを示すものである。

次に砂堆段丘が堰にまで到着した場合の全堆砂面の平均勾配を i_m とし、 i_m と 給砂量

G_s との関係を点描したのが図-23である。これをみても描点はほぼ linear に変化する傾向がみられる。いま水路床勾配を i_b とし、 $i_b > i_M$ となる場合を図-23 から調べてみると、

$i_b = 1/267$ のときは実験 X のみが

$i_b = 1/100$ のときは全部が下流に厚く堆積していることが分る。すなわちこれは常識的に、『流量が同一でも給砂量大ならば上流に厚くたまり、給砂量同一なら流量の小なるものほど上流に厚く堆積する』と言うことができる。



以上の実験は砂堆段丘が堰に到着するまでの現象をのべたのであるが、それ以後は堆砂面形はどのように変化するかについて述べてみよう。段丘が堰に到着したときには一般に $G_s > G_F$ であつて、その差額だけは堆砂面上昇に費される。一方水とともに堰から溢流する流砂量は次第に増加してゆき、ついには G_s にひとしくなろうとし、また水路の堆砂面の縦断形は、そのときの流量、給砂量に相応する一つの平衡的な勾配に向つてちかづいて行くのではないかと推察せられるが、これも今後実験によつて確かめるつもりである。

10 水面形の変化に対する考察

段丘部附近における水面形はかなり複雑で、これは水深にくらべて高さの低い段落ち箇所⁽¹⁶⁾に現われる水理現象がおこるものと推察せられるが、段落ちが時間的に移動することと砂粒のまさつ抵抗の変化する等の点で、さらに研究すべき事項が多いと思われる。

つぎに段丘が堰にちかづくや前までは堰附近の水位はほぼ一定の水位を維持するが、段丘が堰に到着するとその附近の水位は急に低下する。H. Rouse の行つた堰の nappe の実験においても同様のことが示されている。このことはダム貯水池が埋没した後の溢流量を、ダム附近の量水標ではかる場合、埋没の前後では大きい差を生ずることを示唆するものであつて、水工学上重要な問題であると考えられる。

11 結 言

本実験の範囲内で明らかにされた事項は次の通りである。

- 1) 堰の pool 内では堆砂の下流端は必ず砂堆段丘をなす。
- 2) 段丘の肩の標高は、つねに crest の標高にちかい点を通るある水平面上を大体移動するようである。ただし $i_b = 1/100$ のときには水平よりやや下流むけにわずかのゆるい傾斜がみられた。
- 3) 段丘は堰にちかづくほどその厚さを増してゆくが、前進する速度は次第におそくなる。前進速度はまた流量および給砂量の大なるほど速かである。

- 4) $i_b = 1/267$ のときには砂を流しはじめるとほぼ pool の末端より上流の区間にまず上流より堆砂が行われ、それに応じてその部分の水面勾配は急となるが、下流の水位には影響しない。
- 5) $i_b = 1/100$ のときには砂をながしはじめるとほぼ pool の末端附近に一列の砂丘ができ、それを中心として前後に堆砂が行われる。堆砂末端の後退速度は給砂量の小なるほど、また流量の大なるほど小である。
- 6) 砂堆段丘部では水面形は急変し、段丘部のやや後方に水位の最低の位置があらわれその位置は段丘の移動とともに移動する。
- 7) 堰附近の水位は堰が堆砂で埋没されるころ急に低下してしまう。
- 8) 給砂量が過度でないかぎり、堆砂厚の単位時間あたりの増加する割合は上下流を通じて変化は少い。
- 9) 給砂量多ければ上流に厚く、給砂量少ければ下流に厚く堆積する傾向がある。
- 10) 給砂開始してのち、はじめて堆砂のおこる位置は流量の大小に応じて異なり、流量大ならば下流に移動する。

次に水理学的検討を行った結果、明かにされた事項をのべると

- 11) 流れ方向の流砂量分布は上流から下流に向い、ほぼ直線的に減少する。
- 12) 掃流力は上流ほど大で、下流の砂堆段丘にちかづくにつれて減少する。
- 13) 堆砂面勾配 i は、その部分にはたらく掃流力と密接な関係があり、かつ水路床勾配 i_b がひとしいものは一つの曲線にのるようである。
- 14) 堆砂面勾配 i は (G/Q) とともに増減する。従つて給砂量 G_s と流量の比 (G_s/Q) の値に応じて、堆砂面勾配はあるきまつた縦断形を呈する。
- 15) 流砂量 G と掃流力 τ の関係については、等流状態について A. Kalinske ののべた無次元表示法を本実験結果につかってみると、描点はかなり散開がひどいが、大体類似の傾向をもつことが分つた。

以上は砂堆段丘が堰に到着するまでの期間にみられる現象であるが、段丘が堰に到着以後は、砂粒は堰を越えて溢流しはじめ、一方堰上流の堆砂面はその粒径の砂に応じたある平衡的な勾配に向つて上昇をつづけるものと推察される。

この実験は粒径のほぼ一様な砂を一定速度で補給し、また流量、水路巾、底勾配を一定に保つて実施したものであり、給砂量が過度でない場合についてのきわめて基礎的な実験であるから、諸条件の異なる実際の河川やダムの場合にそのまま適用すべきでないことを附言する。

堰の堆砂現象を完全に理解するためには、4節でのべた、水流の運動方程式、連続式、さらに流砂量公式、および流砂量の連続式、抵抗法則等を用いて解析的に究明しなければならないが、ここではその問題は今後の研究にゆずり、専ら堆砂現象の観測と、それらの結果から計算せられた流砂量、掃流力、堆砂面勾配、流量などの間の関連性をしらべるのに止めた次第である。

本研究は昭和28年度文部省試験研究費により、信州大学工学部がとりあげた『流砂多き河川の上中流部の水理学的研究』の成果の一部をなすもので、京都大学工学研究所に

おいて行つた実験結果をとりまとめたものである。

終始御鞭撻をいただいた信州大学工学部長、結城朝恭博士、直接御指導と御支援をいただいた京都大学工学部、石原藤次郎博士、岩垣助教授、石原安雄講師、実験に御協力いただいた東京電力、石原寿氏、京大特別研究生末石富太郎氏、徳島県土木部、清家卓二氏、京大大学院、中村勇次郎氏に謹んで謝意を表する次第である。

文 献

- 1) E. W. Lane : Sediment Engineering as a Quantitative Science, Proceedings of the Federal Inter-agency Sedimentation Conference. P. 68.
- 2) 山田順治 : 貯水池の土砂堆積に就て ; 土木学会誌31巻1号, 昭21.
- 3) 田中治雄 : 貯水池の堆砂量と集水区域の地形及び地質との関係について ; 土木学会誌36巻4号, 1951.
- 4) 鶴見一之 : 貯水池堆砂量の一算法 ; 土木学会誌39巻3号, 1954.
- 5) 杉尾捨三郎 : 堰上流の堆砂現象に関する実験 ; 土木学会誌38巻11号, 1953.
- 6) 岩垣・石原(安)・石原(寿) : 滑底面上を土砂が流れる場合の薄層流の実験 ; 関西工学連合講演会, 1951.
- 7) 岩垣雄一 : 開水路水流の理論 ; 水工学最近の進歩, 土木学会編, 1952. P. 7.
- 8) A. Schoklitsch : Geschiebepbewegung in Flüssen und an Stauwerken ; 1926. S. 8.
- 9) 河村竜馬 : 風による砂の運動 ; 科学, 昭23年11号, P. 500.
- 10) H. Rouse : Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers ; 1938. P. 336.
- 11) H. A. Einstein : Formulas for the Transportation of Bed Load ; Proc. A. S. C. E, March 1941, PP. 351~367.
- 12) H. Rouse : Engineering Hydraulics ; 1949. PP. 798~799.
- 13) 同 上 : 同 上 ; P. 795.
- 14) 石原藤次郎 : 橋脚による河床洗掘に関する実験的研究 ; 土木学会誌24巻1号
- 15) 大坪喜久太郎 : 底面激変箇所における流体運動 ; 土木学会誌, 25巻12号.
- 16) H. Rouse : Model Research on Spillway Crest ; Civ. Eng., vol. 5, 1935. P. 10.

以 上

Summary**EXPERIMENTS ON THE SEDIMENTATION ABOVE A WEIR**

Sutesaburo SUGIO*

(Institute of Civil Engineering, Faculty of Engineering)

Fastening a low weir across a rectangular experimental flume and supplying unigranular sand and water from upstream, the author observed the process of sedimentation and the variation in flow profile above the weir.

In this paper, the results of experiments and the relations among the rate of transportation, tractive force, slope of sand bed, water discharge, and the quantity of supplied sand are described.

* Assistant Professor of Shinshu University.