

助教授に御助言をいただいたことを附記し、深く謝意を表する。

文 献

1) T. Terada : Colloids and Seismology, 地震研究所彙報, No.13 (昭.10) p.562~568.
 2) 森田徳義・千谷利三 : 大阪市築港附近における土質の膠質学的研究 (第1報), 日本化学会誌, Vol.60, No.9 (昭.14.9) p.826-830.
 3) H. Freundlich : Thixotropy (1935) p.12-14.
 4) 山内豊聰 : いわゆるへドロの特性について, 九州大学工学集報, Vol. 26, No.1.

5) 山内・田中信也 : 特種試験によるへドロの研究, 土と基礎に発表予定。
 6) E. Buckingham : Proc. Amer. Soc. Test. Mat., 21, 1154 (1921), M.Reiner : Koll. Z., 39, 80 (1926).
 7) K.B. Hirashima : Highway Experience with Thixotropic Volcanic Clay, Highway Research Board Proc. of the 28 Annual Meeting (1948) p.488.
 8) 前出 3) p.26.

(昭.28.7.6)

堰上流の堆砂現象に関する実験¹⁾

正 員 杉尾捨三郎*

EXPERIMENTS ON THE SEDIMENTATION ABOVE A WEIR

(JSCE Nov. 1953)

Sutesaburō Sugio, C.E. Member

Synopsis Fastening a low weir across a rectangular experimental flume and supplying ungranular sand and water from upstream, the author observed the process of sedimentation and the variations in profile of water surface. In this paper the results of the experiments are described chiefly.

要旨 矩形水路の途中に低い堰を設け、上流から水と均一粒径の砂とを流して、堆砂の進行状況と水形縦断面の変化を実測した。本文は主としてその実験結果を記述したものである。

1. 緒 言

土砂の流出量の多いわが国の河川では、土砂による堰堤の埋没はきわめて重大な問題であるにもかかわらず、従来土砂の堆積現象を水理学的に検討した例をあまり見ない。本研究はこの問題をもつとも基礎的に検討するため、浮遊土砂のない、掃流物質 (bed load) のみによつて堰が埋没される場合について、次のような努めて単純な条件のもとで実験を行つた。すなわち、水路床勾配が一定の矩形断面水路を用い、流量を一定にして上流から粒径がほぼ一様な砂をほぼ一定速度で補給したときの砂の堆積状況と水面変化を 30 分ないし 1 時間ごとに測定した。その結果、二、三のいちじるしい堆砂の特色を明らかにすることができた。

2. 実験装置と実験方法

[A] 実験装置 (図-1)

場所 : 京都大学工学研究所水理実験室

水路 : 巾 40 cm, 有効長 10 m の檜製矩形鉋げづり水路

静圧管 : 径 2 mm の銅製ピトー管 9 箇所

水面測定器 : 1/10 mm よみのポイントゲージ 3 台

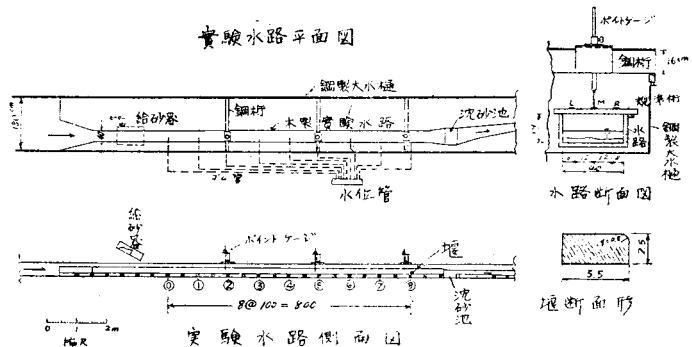
給砂器 : 京都大学で使用中的のもので、4 箇の gate を通して乾燥砂を投下する装置。gate の開度と motor の回転速度を変えることにより給砂量を調節できる。

堰 : 木製, 高さ 2.5 cm, 天巾 5.5 cm

[B] 測定方法

使用砂 : 木津川産の砂で、ほぼ一様粒径のものを選

図-1



*信州大学助教授, 工学部土木教室

別した。平均径 $d_m = 0.885 \text{ mm}$ ，比重 2.59，粒度曲線を図示したが省略する。

水路床勾配：1/267，1/100 の 2 種

流量および給砂量の組合せは表-1 のごとくで、水路床勾配が 1/267 のときには流量 2 種，給砂量 4 種，計 8 種の組み合わせで実験し，1/100 の勾配のときには流

表-1

実験 NO	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
流量 $Q \text{ l/s}$	179	179	186	189	115	117	117.5
給砂量 $G_s \text{ g/s}$	0.350	0.267	0.190	0.130	0.267	0.203	0.120
水路勾配	1/267						

実験 NO	XII	XIII	XIV	XV
流量 $Q \text{ l/s}$	109	108	77.6	79.0
給砂量 $G_s \text{ g/s}$	0.360	0.133	0.267	0.200
水路勾配	1/100			

量 2 種，給砂量 3 種，計 5 種の組合せについて実験を行った。

水路を横ぎり 1 m 間隔に 9 箇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 8 cm 下流に堰をとりつけた。堆砂の標高を測るための基準桁を水路の壁の上に渡し，基準桁にとりつけた 3 箇の B.M. はあらかじめ測量用レベルで精確に 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づポイントゲージを No.0, 3, 6 において水位と堆砂面の読みをとり，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 6 分後の読みを No. 2, 5, 8 においてとつた。一つの測線上では，中央および左右の 3 箇所の読みを平均して実測標高とした。

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深よりの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前進したが，次第に前進速度を減じながら堰に到達した。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，下流に影響を及ぼすことはなかつた。段丘のやや上流に水面の最低の位置が認められ，段丘の前進とともにその位置も移動した。砂澁は全体的に少なかつたが，給砂量が多いか，流量の大なるときには相当砂澁も大になり，ポイントゲージによる水位測定は不可能となつたので，このときはピトー静圧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上を転

動，滑動しながら最前部に到着し，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の下敷きにされる。また小さい地すべりのように少量づ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-2）。段丘の前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-3 は給砂量と流量が異なるときの段丘の位置-時間曲線を示している。

図-2 砂堆段丘略図

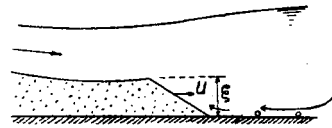
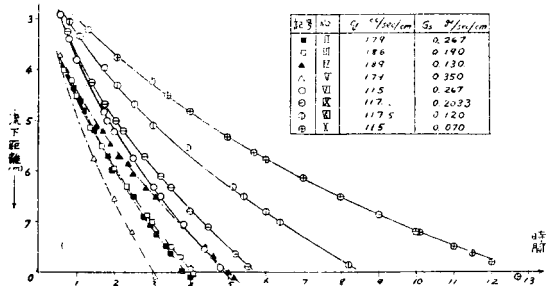


図-3 砂堆段丘の位置-時間曲線 ($i_b = \frac{1}{267}$)



すなわち，給砂量 G_s および流量 Q が大なるほど段丘の前進速度はすみやかで，さらに一般に段丘が堰にちかづくほど前進速度を減ずることがわかる。

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-4 である。これによると堰の上流大体 4 m 以内では，段丘の肩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それよりやや低い所を移動することがわかる。

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

図-4 砂堆段丘標高図 ($i_b = \frac{1}{267}$)

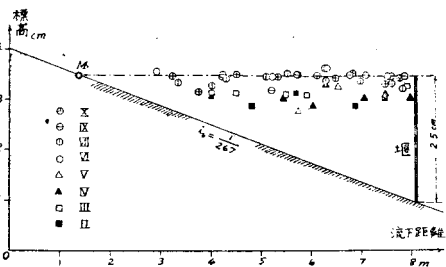
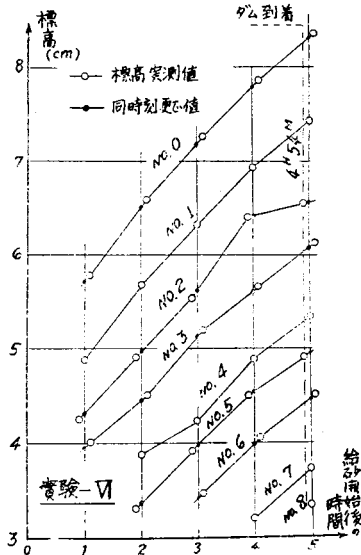


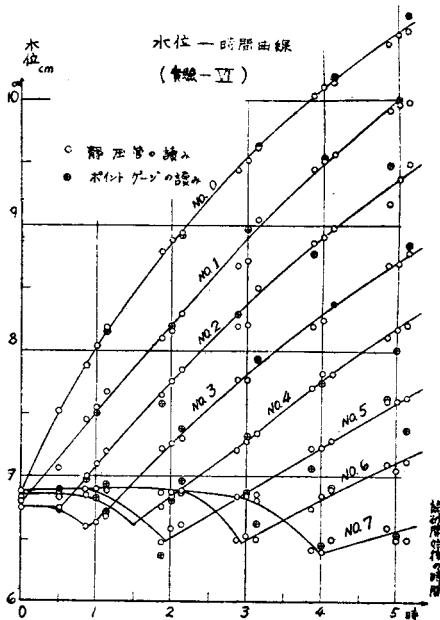
図-5 堆砂面標高上昇曲線



生し、それが発達して最前線に追いつき、図に示すような厚さとなることが観察された。

(iii) 流砂の堆積状況：図-5は実験 VI 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関係を示している。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った。給砂量 G_s が大なるときは砂面勾配は急になり、 G_s が小なるときは砂面勾配はゆるく、上昇度も小であった。

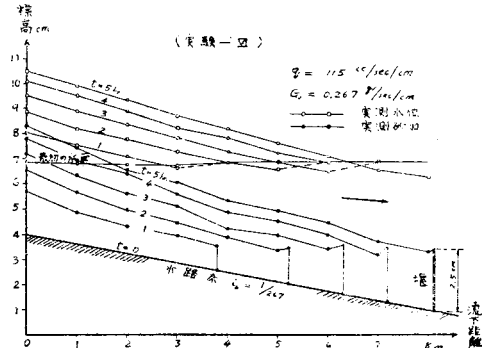
図-6



(iv) 水面形の変化：実験 VI について各測線ごとの水位変化を点描したのが図-6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。

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-7である。一般に流量

図-7 堆砂面・水面曲線変化図 ($i_b = \frac{1}{267}$)



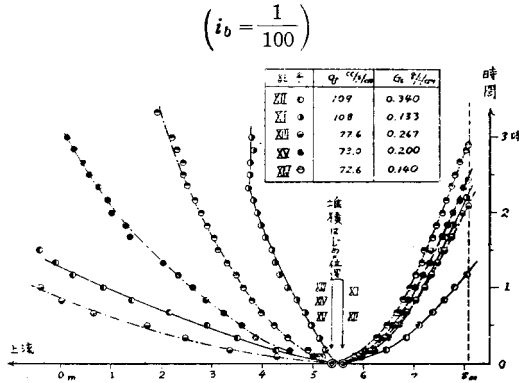
がひとしくても給砂量 G_s が大きいと上流部に厚くたまり、 G_s が小さいと下流に厚くたまる傾向が見られた。また図-7 に示すように、単位時間に堆積厚さの増加する割合は上下流を通じて大差ないようで、この点はなほだ興味ぶかいことと思われた。

[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-9 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大体堰の頂を通る水平面が水路をきる位置附近にまず堆積しはじめ、その位置を中心として前後に堆砂面がひろがつてゆく。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：最初に堆砂開始の位置 M 点に一つの堆砂丘ができる。上流側から流れてきた砂粒は砂丘の上流面の砂粒とともに順次砂丘面をすべり上り、下流側の斜面へ転落するから、砂丘ははじめのうちはかなり速かに下流方向に移動する。砂丘断面積が次第に増大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増大して砂丘の上流約 11 ないし 14 cm 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

図-8 砂堆段丘および砂堆末端の位置-時間図



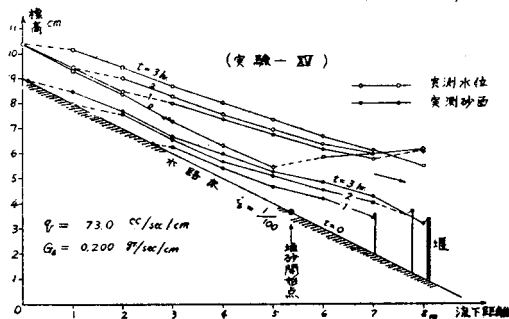
に砂がたまりはじめ、一つ一つの砂丘の区別が不明瞭となり、ついには $i_b = 1/267$ の勾配に対する実験のときに見られると同様な堆砂面縦断形を呈するにいたる。

砂堆段丘の前進する模様は図-8の右半分に示すごとくであり、砂堆の後端の位置を10分ごとに測定した結果を図-8の左半分に点描した。また段丘の肩の標高を点描したら $i_b = 1/267$ のときと類似の現象がみられた。段丘の前進速度は G_s および Q の大なるほど大であるが、砂堆後端の後退速度は G_s の大なるほど、また Q の小なるほど大であつた。

(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見うける典型的な形を示した。砂を流して M 点を中心に堆砂が前後にすすむと、その部分のみ水位が上昇した。段丘部附近に水位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。

図-9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。なお最上流部の等流をなすと考えられる区間では、『滑底面上を土砂が流れるときの薄層流の実験²⁾』の結果と類似の流砂現象を呈することが観察された。

図-9 堆砂面・水面曲線変化図 ($i_b = \frac{1}{100}$)



4. 実験結果に対する考察

[A] 砂堆段丘に対する考察 A. Schoklitsch³⁾は取水用堰堤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みとめ、また段丘部で砂粒径の鉛直分布を測定して興味ある報告をしている。さて砂堆段丘の前進する現象は砂丘上に風が吹いたときに生ずる砂丘の移動ときわめてよくにていると思われる。そこで砂丘の移動砂量について研究した F.M.Exner⁴⁾の表示に従うならば、段丘部の流砂量 G_F (cm³/sec/cm) は近似的に次式で示すことができよう。

$$G_F = \xi \cdot U \dots \dots \dots (1)$$

ここに ξ : 段丘の厚さ (cm)

U : 段丘の前進速度 (cm/sec) (図-2)

図-3または図-8によれば、 U は段丘の位置の函数として実測値から求めることができ、 ξ もまた図-4の実測値から拾うことができる。従つて今後は(1)式を利用して段丘部流砂量 G_F を検討し、さらに各断面の流砂量分布や掃流力の研究を行いたいと考えている。

[B] 堆砂面上昇に関する考察 図-7をみると単位時間あたりの土砂の堆積厚さは幾分下流が薄いが、上下流ともかなり均一に砂が敷きならされている。これらの点から考えると、ある時刻における堰砂面上の流砂量分布は直線分布にかなり近いことが考えられる。給砂量 G_s が多く流量 Q が小ならば上流に厚く堆積し、 G_s が小で逆に Q が大なるときは下流に厚く堆積することも明らかとなつた。砂堆段丘のやや後方では堆積面がやや掘られる傾向がみとめられたが、これは堰の堆砂現象における一つの性質とも言えるかも知れない。最後に重要な現象は、堆砂面はそのときの水路床勾配、流量、給砂量、に応じてきまるほぼ一様な縦断形を保ちつつ次第に上昇してゆくが、砂堆段丘が堰に到着して後は縦断形はやや急になり、その粒径、流量、給砂量に応じた安定勾配に近づくようであつた。これは堰附近では砂面は上昇不可能であるのに対し、上流部分は砂面がやはり上昇しつづけるためであると思われる。

[C] 水面形の変化に対する考察 段丘部附近の水面形は、かなり複雑で、水深にくらべて高さの低い段落ち箇所において現われる水理現象⁵⁾がおこるものと推察せられた。水面形の上昇は段丘より上流へ次第におよんでゆくことは現実のダムの場合を考え合わせて興味ぶかい。

5. 結言

本実験の範囲で明らかにされた事項を列挙すれば次のごとくである。

(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、つねに堰の crest の標高にちかい点を通るある水平面上を移動するようである。

(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異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影響はしない。

(5) $i_b=1/100$ のときには砂を流しはじめるとほぼ pool の末端附近に 1 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、給砂量の異なるほど、また流量の異なるほど小である。

(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⁶⁾。

(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ない。

(9) 給砂量多ければ上流に厚く、給砂量少なければ下流に厚く堆積する傾向がある。

なお前述したごとく、この実験では粒径ほぼ一様な砂を一定速度で補給し、流量、水路巾、底勾配を一定に保つて行つたものであるから、実際河川のように砂

礫径、流量、底勾配、流積が各断面で異なり、しかも浮遊土砂の多い場合にそのまま適用するべきでないことを附言したい。

本研究は京都大学工学研究所水理実験室で行つた実験の現象的部分の結果をとりまとめたもので、文部省科学試験研究として信州大学工学部のとりあげた『流砂多き河川の上中流部における水理学的研究』の成果の一部をなすものである。終始御激励を賜つた工学部長結城博士、直接御指導と御支援をあたえられた京都大学工学部土木教室教官各位、実験に協力せられた石原安雄、石原 寿の両氏、京大学生末石富太郎、清家卓二、中村勇次郎の諸氏に対し深甚の謝意を表する。

文 献

- 1) 杉尾捨三郎：堰の堆砂について；土木学会第 9 回年次講演会，昭 28 (1-17)。
- 2) 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(昭.27)。
- 3) A. Schoklitsch: Geschiebebewegung in Flüssen und an Stauwerken; 1926, s.8.
- 4) 河村竜馬：風による砂の運動；科学，昭 23. 11. p.500。
- 5) 大坪喜久太郎：底面激変個所における流体運動；土木学会誌，25 卷 12 号。
- 6) H. Rouse: Engineering Hydraulics; 1949. p.529.

(昭.28.7.6)

38 卷 9 号 “工学材料の模型解析” 正誤表

ページ	行	誤	正
6	図-1	図-1 Hook の模型	図-1 Hooke の模型
7	左 4	Voigt	Kelvin
8	右 3	20%	最大 20%
"	右 4	成立した。	強度が推定できた。
9	右 6	ダッシュ ボット	ピストン
10	左 11	1953	1935

38 卷 10 号 “既設鋼道路橋の振動減衰について” 正誤表

ページ	行	誤	正
19	右 9	(a) 粘土，クローソン……	(a) 粘性，クローソン……
20	式(6) 最右辺	$= \frac{F_c T}{4 \pi \beta}$	$= \frac{F_c T}{2 \pi \beta}$
"	右 3	有効方法	有効な方法
21	左 9	粘土性摩擦	粘性摩擦
"	右 12	* $\kappa = 0.05 \sim 0.5 \text{ sec}^{-1}$	$\kappa T = 0.05 \sim 0.5$
"	" 13	* $\kappa = 0.02 \sim 0.2 \text{ sec}^{-1}$	$\kappa T = 0.02 \sim 0.2$
22	左 22	0.6~3.7	0.6~3.7 sec ⁻¹

* 印は著者の誤りであり、この点鉄道技術研究所 橋本香一氏より御指摘をいただいたことを附記いたします。