

断面変化部における河床変動に関する研究(Ⅱ)

— 断面急拡部の砂堆の運動 —

芦田 和男・宮井 宏

STUDY ON THE SEDIMENTATION IN AN ABRUPT EXPANSION

by *Dr. Eng. Kazuo ASHIDA*
and
Hiroshi MIYAI

Synopsis

In the rivers, there are many abrupt expansions of cross section near the structures or at the mouth of the river. So, it is very important from the standpoint of river engineering to study the mechanism in the change of the river bed at the abrupt expansions.

We have studied this problem having our attentions to the hydraulic behavior of water due to the deltas which are formed in an abrupt expansion.

The shape of the wakes has a great influence on the movement of the delta. In this paper, the non-dimensional parameter which controls the length of the wakes is found theoretically and verified experimentally in some extent. As for the energy loss at the abrupt expansion before the equilibrium state, we tried some investigations but this problem requires further examination.

1. 緒 言

河道に人工構造物を設ける場合、これは大なり小なり河床の変動を誘起する。また、湖水や海に流入する河川の河口においては、断面の急拡、潮流、潮位などにより河床は複雑に変動する。これらの河床変動が治水、利水に与える影響は非常に大きいものがある。

本研究はこうした問題の基礎として、断面急拡部の砂堆の運動機構を解明しようとするものである。

こうした問題をとりあつかう上において、実際の観点から考えると三つの段階がある。

一つは、一定の水量にする断面急拡部の安定河床形状の問題である。

つぎは、一定の水量に対する安定河床形状に達するまでの時間的変化の問題であり、最後は、変動する水量の場合における河床変動の問題である。

一番目の問題に関しては、著者の一人がすでに発表した¹⁾、ここでは二番目の問題を、特に急拡部における砂堆の運動という点に着目して研究していこうとするものである。

水路幅が急拡する場合には、水流は壁面から剝離し、自ら流路を形成しつつ、下流に行くにしたがって次第にその幅を増していく。こうした場合の水量は非常にむづかしく、従来より固定床においてさまざまな研究がなされているが、その水理学的機構はまだ十分解明されているとはいいがたい。したがって、こうした場所における砂堆の運動を論ずるためには、まず急拡部の水理特性を明らかにすることが必要である。

本研究においては、以上の観点より、まず固定床における流れをとりあつかい、これを水流のひろがり、すなわち後流域の大きさに着目して、理論的、実験的考察を行ない、しかる後に砂堆の運動と後流域の大きさの変化との関連に注目しつつ、移動床における実験を行なった。さらに、砂堆が進行しつつある状態における急拡大部のエネルギー損失について若干の考察を加えた。

まだ多くの問題点が残されており、十分な解決にまで到達していないが、興味ある2,3の特性を明らかにすることができたと考えられる。

2. 急拡大部における後流領域の大きさに関する実験

(1) 実験装置

実験に用いた水路は幅1m、長さ14m、勾配1/500のモルタル仕上げであり、その上流端より3mを狭部とし、下流11mを拡大部とした。水路の上流端付近では水流が乱れるため、上流端より1mの区間は測定区間としては用いなかった。この水路は上流の狭部幅が自由に換えられ拡大比としては任意の値を与えることができるが本実験では、**Fig. 1**に示すように拡大比 $B_1/B_0 = 2.5$ および 5 の2種類とした。また、水路横断面の各位置は、**Fig. 1 (a)**に示してあるように急拡大部断面を0とし、それより上流、下流側断面はその距離にそれぞれ正負の符号をつけて表わす。以下の説明では、必要に応じてこの約束に従うものとする。水路下流端には堰がありこれにより水位を自由に調節できる。

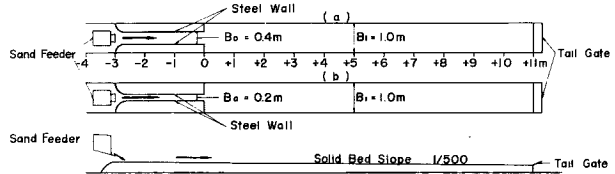


Fig. 1 Experimental flume.

移動床の実験においては、**Fig. 1**に示したように、上流に給砂箱を置き一定量の給砂を行なう方法を採用した。この給砂装置は、種々ある給砂装置の内でも最も簡単なもので、底部に傾斜をもたせた木製の箱でその底部前面には間隙があり、ここから自重により砂を落下させ、この間隙を調節して給砂量を変えられるようになっている。この装置は簡単ではあるが、砂の乾燥状態が均等で、ごみなどを含んでさえないなければかなりよい精度がえられるものである。実験用砂は**Fig. 2**に示すようにほぼ一様粒径で、その平均粒径 d_m は、0.88mmである。

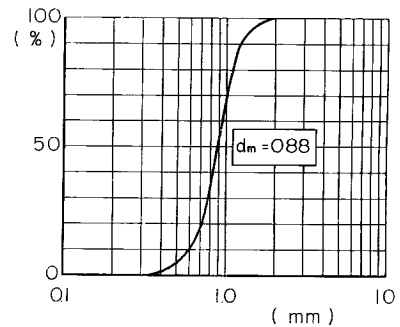


Fig. 2 Grain-size accumulation curve of used sand.

(2) 実験方法および実験経過

(a) 固定床の場合

行なった実験は **Table 1** に示すとおりである。

Table 1

No. of experiments	1	2	3	4	5
Expanding ration B_1/B_0	2.5	2.5	5	5	5
Discharge (l/s)	10	30	10	20	5.6~10
Bed slope	1/500	1/500	1/500	1/500	-1/4

No. 1~4 は **Fig. 1 (a) (b)** において行なったものである。各 No. の実験に対して、下流の堰高を数

種ずつ変えて測定を行なったので、実験の個数は表にあげたものより多い。

No. 5 は Fig. 3 に示すように Fig. 1 に示した水路の一部に逆勾配部分を付けた水路において行なったものである。No. 1~4 のものと特に異なる点は、急拡部において水路床が約 1/4 の逆勾配になっている点である。No. 5 は流量、堰高など種々異なったものを含んでいるが、簡単のために一つにまとめてある。

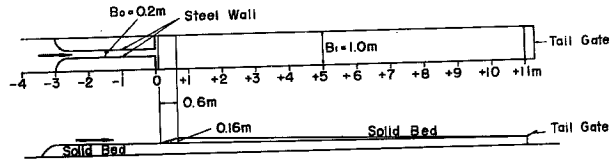


Fig. 3 Experimental flume.

(b) 移動床の場合

行なった実験のケースは Table 2 に示すとおりである。

Table. 2

No. of experiments	6	7	8	9
Expanding ratio B_1/B_0	2.5	2.5	2.5	5
Discharge (l/s)	10	10	10	20
Supplied sediment load (g/min)	807	807	1500	1500
Depth at section No. 10 (cm)	5.26	1.92	7.97	—
Depth at section No. 5 (cm)	—	—	—	15.66

No. 6~9 はすべて、まず固定床での測定を行ない、その後一定量の給砂を行なって後流域の形状、流線の方向、水位、河床形状などの時間的変化を測定した。

いずれの実験においても、水位、河床はポイントゲージで、後流域の形状、流線の方向は、水面に対してはアルミ粉を流す方法、水底付近に対しては過マンガン酸カリの固体を多数水底に沈める方法で測定した。

(3) 水路急拡部の水理

(a) 固定床の場合

水路急拡部では、水流が壁面から剝離し、この剝離した流れとの mixing により両側の水が運動を始め、同時に流速の大きい主流中に両側の水が混合して下流に流れ去る。これを補なうために下流から上流に向かって主流とは逆方向の流れが生じる。このようにして固定床、移動床にかかわらず急拡部では必ず後流域が生じる。

Table 1 の No. 1~4 に相当する流れのもつ特徴としては、

- ① 堰上げを増した場合、流れが非対称になり後流域が長大になること
- ② 流れが不安定なこと

の二つがあげられよう。

まず①について説明する。我々の行なった実験は、流れが狭部—急拡部—下流部で常流—射流—常流となる場合、常流—常流—常流となる場合の二つである。下流の堰を低くして急拡部の水深を限界水深よりかなり小さくした場合、すなわち、前者の場合は後流域は非常に短小でしかもほぼ左右対称となり、主流の流れ方も対称となる。堰上げを大きくして前者から後者の状態に移行するあたりで、後流域は急激に長大になり、後流域および主流の非対称性ははなはだしくなる。一例をあげると、No. 1 のもので、前者の流れに属するものでは後流域の長さ l_D は 0.5m で左右対称となっているのに対し、急拡部で限界水深に近づいているものでは $l_{D, \text{long}} = 9.0\text{m}$, $l_{D, \text{short}} = 2.1\text{m}$ となっており、その長さは長く、左右後流域の非対称性が著しい。堰上げを非常に大きくしていくと後流域の長さは少し短くなるが、やはり非対称性ははなはだしく、これ以上堰上げを大きくしても対称になることは無かった。また非対称な流れが時間的に逆の非対称

流れに移行するという事は無い。逆の非対称流れに移行させるには、板などに主流を沿わせて流れの方向を変えるか、または、短い方の後流域中に水を注入したりすればよいが、このようにして一度逆の非対称流れになったものは、再び外力を加えぬかぎりもとに戻ることは無い。このような非対称性は水路製作上の欠点によるというよりは、むしろ、流れのもつ特徴であろうと思われる。

つぎに②について述べる。固定床急拡部での流れの状況は、だいたい **Fig. 4** に示したとおりである。急拡部付近では特に数多くの渦ができ、流れの様子は非常に複雑である。しかし主流と後流域との区別は比較的判別しやすい。下流にいくにつれて主流と後流域中の水の出入りが激しく、かつ、不規則で、後流域の測定は非常に困難となり誤差も大きくなる。また、後流域の末端は変動が激しいが、特に長い方の後流域の長さは、短い方のそれに比較して、変動が激しく、ときには 3m ぐらいいも達する。

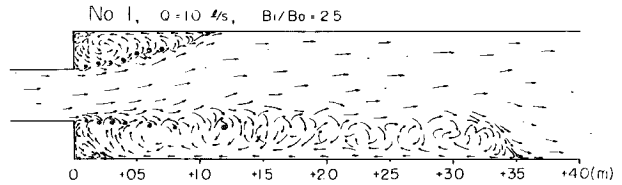


Fig. 4 Flow direction in an abrupt expansion (Solid bed).

流れが左右岸のどちらかに片寄って、後流域が非対称になっている場合には、水位を横断的にみると、必ず、長い後流域中の水位の方が、短い後流域中のものよりわずかに高くなっていることが認められる。この事実と、流れが片寄ることとは何らかの関連があると思われるが、中には、ほぼ対称形となっている後流域中の水位でも左右で差のあることもあるので、現在のところまだ説明しえない。

また、非対称な流れの場合には、短い方の後流域の末端に対する断面では、長い方の後流域の幅が少し広がっており流れ全体として見たとき、蛇行現象が存在するように思われる。これは $B_1/B_0=5$ のように拡大比が大きく、堰上げを増した場合に特に著しい。

つぎに **Table 1**, No. 5 の実験について述べよう。これは前に述べたように急拡部で逆勾配になっている水路で行なったものであるが、このような実験を行なった理由は、つぎの **3** で述べる整理方法の妥当性をより広範囲にわたって検討するためと、芦田がさきに発表した論文¹⁾中に急拡部での安定縦断勾配が $1/20 \sim 1/10$ の逆勾配となる資料が含まれているが、このような逆勾配の場合について固定床における実験を行ない後流域その他の特性が移動床と固定床とにおいてどのように異なるかを検討するためである。この場合の後流域は、左右対称であり、また、前に見られた数多くの渦が見られない。むしろ移動床における逆勾配の場合の後流域の特性とかなり類似している。

(b) 移動床の場合

砂堆の運動と水流のひろがりとは互いに密接に関連しあっており、水流のひろがり砂堆の進行を支配し、砂堆の進行が水流のひろがりに影響をおよぼすという具合に両者は切り離せない関係にある。この現象を完全に解明するためには、水と砂の運動を2次元的にとりあつかわなければならないことは述べるまでもないであろうが、かりにこのような問題を一次元的に近似化して考えても、非常にむづかしい。

さきに芦田が行なった研究¹⁾では、安定形状を一次元的にあつかって実測値とかなりよく一致した結果を得ているが、これの適用範囲は安定状態に達した河床形状の場合に限るのであって、これを用いて安定状態に達するまでの河床縦断形状を予測することはできない。また河床横断形状に関しては、安定状態における定性的な特徴については述べられているが、定量的なとりあつをいはいは今後に残された問題としている。本研究においても横断形状を定量的にとりあつかうには到らなかった。ここでは、安定状態に近づくまでの砂堆の運動状態と後流域の関係について、実験で観察された事実をもとに、単に定性的に述べるに止めておく。

固定床の流れに一定量の給砂を行なうと、その給砂量によって二つの場合が生ずる。一つは流れのもつ流砂能力以下の給砂量を与えた場合で、砂堆は発生せず、給砂した砂が全部下流へ輸送される場合であり、他の

つは流れのもつ流砂能力以上の給砂を行なう場合で、このときには砂堆の進行が見られる。**Table 2** のNo. 6, 7 は前者に属する場合であり, 8, 9 は後者に属するものである。前者の場合は, 上流狭部で給砂された砂が全部下流の拡大部に輸送され, 跳水のある場合にはまずその付近から堆積を始め, 跳水のない場合には拡大部で十分水流がひろがって流速の減少したかなり下流の断面から堆積が始まる。このようにして下流に堆積した砂により流れが堰上げられ砂の堆積範囲は上流へおよび始める。同時に後流域も砂の堆積と共に時々刻々変化していく。No. 7 は給砂前に急拡部で射流になっており, 後流域が極端に短かい流れであるが, このような場合には, 跳水をおこしている付近に砂が堆積し始めると, 後流域は一たん長くなり, またわずかず短くなる。初め, 後流域が非常に長かった No. 6 のような場合には, 砂が下流に堆積しだすと後流域は急激に短くなる。つぎに No. 8, 9 のような場合には, 砂は水路狭部を砂堆の形式で進行してくるが, これが急拡部付近まで達したとき後流域は一たん長くなり, その後再び短くなり始め, 同時に非対称形から対称形へと変化していく。砂堆も急拡部を出てからしばらくは流れに沿って水路の片側へ片寄って堆積するが, それにつれて流れが反対側へおしやられ, 後流域が左右対称形に近づいてき, 同時に砂も水路の反対側へ堆積するようになる。

このようにしていずれの実験でも時間さえたてば, かなり安定した状態に近づき, 変化はゆるやかになる。我々の今回行なった実験では, 最終安定状態に達したと思われるものが無いのでこの状態については詳細に説明を加えることはできないが, 年報前号に発表した論文¹⁾にかなりくわしい説明がある。

本研究で行なった実験の内, かなり安定状態に近づいたと思われる場合の流れの状況を示したものが **Fig. 5** であり, **Fig. 4** と比較すれば, 左右対称になっていること, 急拡部の数多くの渦が消えていることなどの特徴が見られる。

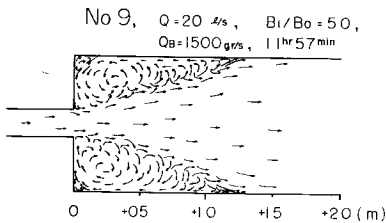


Fig. 5 Flow direction in an abrupt expansion (Movable bed).

また, このような状態に対応する河床形状の平面形は **Fig. 6** に示してある。この No. 6~8 に対応する形状はいずれも砂堆の峰線をつらねたものである。河床の横断形状は, 代表的な一例として, No. 8 の場合があげてある。急拡断面より上流では, だいたい水平に, 急拡部では流れが diverge するため凹形となり, 両側が高く, 後流域の終端付

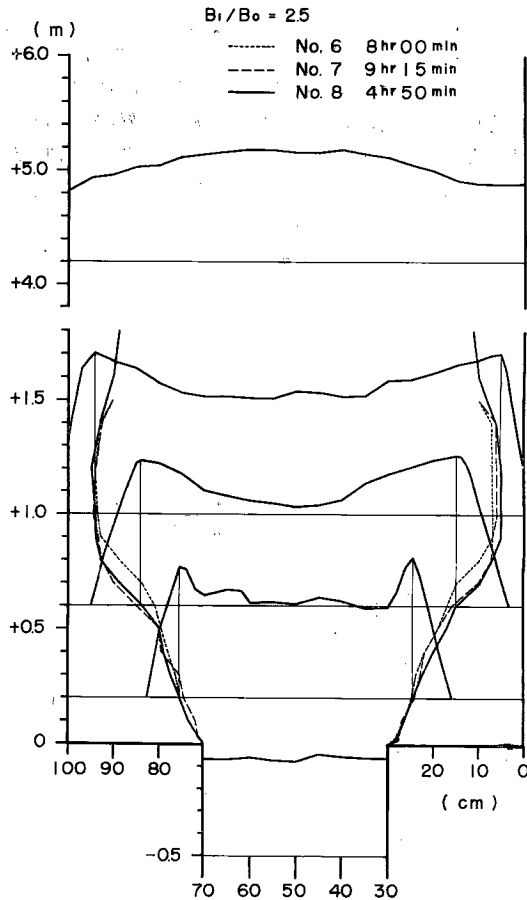


Fig. 6 Shape of sand ridge and cross-section in an abrupt expansion.

近をのぞいては、主流と後流域の境界はこの峰線とだいたい一致している。さらに下流では、側壁の影響により両側の掘れた凸形に変化している。以上の特徴は、年報前号の研究¹⁾においても述べられている。

3. 後流領域の大きさに関する理論的、実験的考察

(1) 急拡部における水流の基本方程式

z 方向の速度を無視すれば、 x および y 方向に対する定常流の運動方程式は、

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}\right) \rho dx dy dz = \rho X dx dy dz - \frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx dy dz \quad (1)$$

および

$$\left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) \rho dx dy dz = -\frac{\partial p}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dx dy dz \quad (2)$$

となり、連続方程式は、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

となる。(1) 式を河床から水面まで積分すれば、

$$\int_0^h \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) dz = g \sin \theta \cdot h - gh \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho} + \frac{1}{\rho} \int_0^h \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dz \quad (4)$$

となる。ここで τ_0 は各 2 次元要素に対するものであって、全断面の平均値と異なることに注意しなければならない。断面内の 2 次元的な輸送関係の特性があらわれてくると、 τ_0 は断面内において uniform に分布しなくなるであろう。したがってこうした問題の合理的な解明には、 τ_0 の分布、 τ_{xy} の分布など流れの内部構造について検討をすすめることが重要となるが、ここでは準 1 次元のなとりあつかいによって現象を支配する主要な無次元量を求めていくことにする。いま、

$$\alpha_1 = \frac{\int_0^h \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) dz}{h \left(u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial v_m}{\partial y}\right)} \quad (5) \quad \alpha_2 = \frac{\int_0^h \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dz}{h \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}\right)_m} \quad (6)$$

で定義される α_1, α_2 を用いれば (4) 式は、

$$\alpha_1 h \left(u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial v_m}{\partial y}\right) = g \sin \theta \cdot h - gh \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho} + \frac{\alpha_2}{\rho} \cdot h \cdot \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}\right)_m \quad (7)$$

となる。いま、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.0$ と仮定し、かつ、添字 m を省略すれば、

$$\frac{1}{g} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) = \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho gh} + \frac{1}{\rho g} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (8)$$

となり、同様にして (2) 式より、

$$\frac{1}{g} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) = -\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{\rho g} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho g} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (9)$$

をうる。(3)式は、

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

となる。(8)、(9) および (10) 式が基本方程式と考えられる。

(2) 後流領域の大きさに関する考察

(8) 式の $\partial \tau_{xy} / \partial y$ を mixing length theory を用いて、かつ、断面内において $l = \text{const.}$ と見なして表示すれば、

$$\frac{1}{g} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) = \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho gh} + \frac{2l^2}{g} \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (11)$$

となるが、 $\sin \theta - \partial h / \partial x - \tau_0 / \rho gh = 0$ の場合には、上式は Tollmien その他によって解析されている。これ

らの解析結果と実験値とによって、拡散していくひろがり角度としてはほぼ一定の値がえられている²⁾。しかし実際に急拡部の水流のひろがり方を調べてみると、さきにも述べたように、水量や境界の条件に応じてこれよりはるかにゆるい場合や、急な場合などいろいろ生じる。こうした水流のひろがり方は、急拡部の砂堆の挙動に対して非常に大きな影響をもつと考えられるので、まずこれについての考察を進めることにする。

$\sin\theta - \partial h/\partial x - \tau_0/\rho gh \neq 0$ の場合を厳密に論議するためには、こうした場合の乱流の実測にもとづいて、横方向の拡散係数についての検討を進めなければならないが、いま、かりにこれが、 $\sin\theta - \partial h/\partial x - \tau_0/\rho gh = 0$ の場合におけるものと変化しないとしても、(11)式を解かなければ、 $\sin\theta - \partial h/\partial x - \tau_0/\rho gh$ の影響を検討することができない。これは困難である。そこでここでは、どのような無次元量が拡散のひろがりに対して影響をもつかを(11)式によって検討し、実験結果を整理することにする。

u_0 を $x=0$ における流速とし、

$$u = u_0 u', \quad v = u_0 v', \quad x = l_D x', \quad l = l_D l', \quad y = l_D y'$$

とおいて(11)式を無次元量の方程式になおすと、

$$u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} = \frac{g l_D}{u_0^2} \left(\sin\theta - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho gh} \right) + 2l'^2 \frac{\partial u'}{\partial y'} \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \quad (12)$$

となる。いま、

$$P = \frac{g l_D}{u_0^2} \left(\sin\theta - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho gh} \right) \quad (13)$$

とおくと、 P の大きさは、噴流の拡散に対する圧力勾配の影響の効果を表わすものと考えられる。

$$\frac{\partial u'}{\partial y'} \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} > 0$$

と考えられる領域では、 $P > 0$ の場合、 P は見かけ上 l' を増加させる作用をなし、 $P < 0$ の場合には、減少させる作用をなす。すなわち、前者では噴流の拡散を助長し、後者ではゆるやかにする。

τ_0 は横断方向に一樣ではないから P は x および y の関数と考えられるが、いま、一樣速度の部分でこの値を求めると、

$$\frac{1}{g} u_{0x} \frac{\partial u_{0x}}{\partial x} = \sin\theta - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho gh} \quad (14)$$

となる。ここに、 u_{0x} は x の点における一樣速度の部分における流速である。

これを用いて(13)式を書き表わせば、

$$P = \frac{l_D u_{0x} \frac{\partial u_{0x}}{\partial x}}{u_0^2} \quad (15)$$

となるが、いま、(15)式と同様な意味をもつ無次元量として、便宜上、

$$P_1 = \frac{u_1 - u_0}{u_0} \quad (16)$$

を用いる。ここに u_1 は後流域末端における流速である。

減速流れにおいては $P_1 < 0$ であり、 $P_1 = 0$ の場合に比較して、噴流の拡散はゆるくなり、加速流れにおいては $P_1 > 0$ であり、噴流の拡散は急になるものと考えられる。その程度は無次元量 P_1 によって表示される。

(16)式を便宜上、水深を用いて表わせば、

$$P_1 = \frac{h_0 - h_1}{h_1}$$

となる。 h_0, h_1 はそれぞれ $x = 0$ および後流域の末端における水深を表わす。

また、後流域のひろがりの程度を表わす無次元量としては

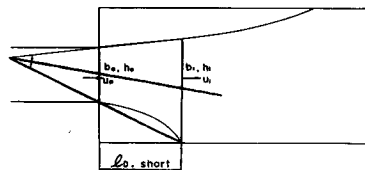


Fig. 7 Definition sketch.

$\Delta t/l_{D, \text{short}}$ を用いた。ここに、 $\Delta b = (b_1 - b_0)/2$ である。 $l_{D, \text{short}}$ を用いたのは、側壁の効果をのぞくためである。

(3) 実験結果とその考察

Fig. 8 は固定床の場合の実験結果を前節で述べた整理方法にしたがって整理したものであり、Fig. 9 は移動床の場合の実験結果を整理したものである。

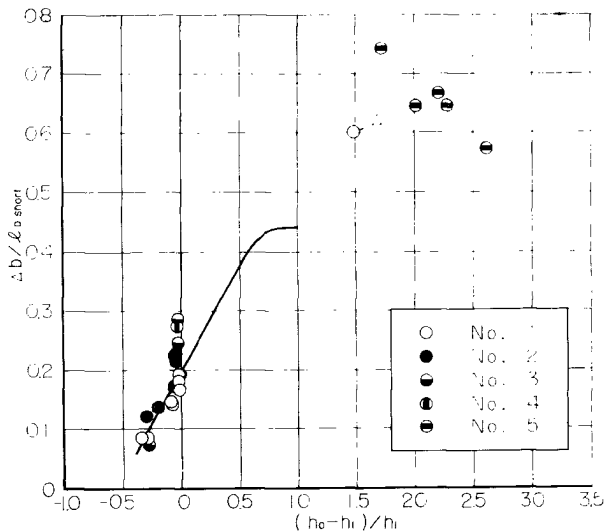


Fig. 8 Relation between $\Delta b/l_{D, \text{short}}$ and $(h_0 - h_1)/h_1$ (Solid bed).

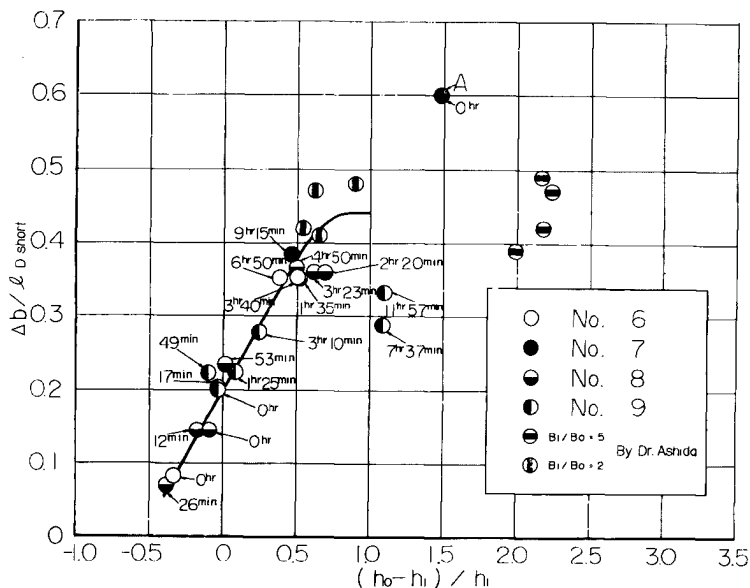


Fig. 9 Relation between $\Delta b/l_{D, \text{short}}$ and $(h_0 - h_1)/h_1$ (Movable bed).

図中の曲線は固定床、移動床におけるすべての実験結果をプロットした場合、全体の傾向を表わすと思われる曲線である。したがって、**Fig. 8** の曲線と **Fig. 9** の曲線とは同じものであるが、これより $(h_0 - h_1)/h_1$ の値が $-0.4 \sim 1.0$ の範囲においては、固定床の場合でも移動床の場合でも、このような表示の仕方では現象をかなりよく表わすことができるとと思われる。この範囲においては $(h_0 - h_1)/h_1$ が、水流のひろがりに対してかなり支配的な要素であると考えてよからう。

しかし、現象は非常に複雑であるから、前に述べたように多くの仮定を置いて導かれたこのような簡単な表示で、すべての場合を説明することには少し無理があり、 $(h_0 - h_1)/h_1$ が 1.0 より大きい範囲に対しては、点がばらつき、一定の傾向を見出すことはできない。

以下で、固定床の場合と移動床の場合に分けて、もう少し詳細に説明を加える。

(a) 固定床の場合の実験結果とその考察

Fig. 8 において、No. 1, 2 の実験結果はかなりよく曲線上ののっており、一定の傾向を示している。しかし、No. 1 の実験のうち、図中に A と記号を付けたものは、急拡部で射流となる場合で、後流域の極端に短い左右対称な流れに対応するものであり、この場合は、y 方向の水位変化が非常に大きいため、さきに述べた解析の適用範囲を越えるのであろうと考えられる。

No. 5 の流れに対応する点は、すべて上の方へプロットされる。これはさきにも述べたように、急拡部で水路床が逆勾配になっている場合の流れに対応するものであるが、後流域が左右対称になっている点、急拡部で小さな渦が見られない点、加速流れである点などは、つぎに述べる移動床急拡部での流れと共通する性質である。しかし、この場合は、逆勾配をさらに急にすると、後流域はあっというまに短くなり、したがって、点はもっと上の方へプロットされると考えられる。このような流れでは、流れのひろがりの機構が他の場合と異なっていると考えられ、 $(h_0 - h_1)/h_1$ 以外に、流れのひろがりに支配的な影響をもつ要素があるのであろう。

つぎに、No. 3, 4 の流れに対応する点は、No. 1, 2 の結果と比較して、若干、上の方へプロットされるようである。

後流域の形状は、つぎに述べる移動床の場合においても言えることであるが、水面と水底付近とは差はほとんど見られなかった。データの中には、後流域の大きさがわずかながらうものもあったが、測定の誤差と考え合わせた結果、整理にあたっては、これらの平均値をプロットしておいた。

(b) 移動床の場合の実験結果とその考察

Fig. 9 のうち、0 hr を記したものは、給砂開始前の流れの状態を表わすものである。したがってこれらの点は前の **Fig. 8** にもプロットしてある。

No. 6 と No. 7 の実験は流量、拡大比は共に同じであるが、下流の堰上げ水位が異なり、給砂前の状態は図からもわかるようにまったく異なったものであるが、これに同量の給砂を行なうと、両者はだいたい同じような状態に近づいていく。また、No. 6, 7 と No. 8 とは、下流の堰上げ水位と給砂量が異なり、砂の運動状況も異なるのであるが、時間が経過すればやはり同じような位置におちついている。

No. 6, 7, 8 はいずれも、まだ平衡状態には達していないものであるが、それにかかなり近づいた状態であると考えれば、年報前号のエネルギー損失が水路全体を通じてほぼ一定になるという事実と、平衡等流水深、平衡等流勾配の考え方をういて、この同じような状態におちつくという現象は説明することができる。

No. 8 の結果は特に砂堆の進行と後流域の長さとの関係をよく表わしているように思う。はじめ 0 hr の所にあった点は、29 min 後には、砂堆が急拡部まできたため $(h_0 - h_1)$ の値は絶対値のより大きい負の値となり、その結果減速流れとなり 0 hr のときよりも水流のひろがりはゆるくなり、点は曲線上を左下方へ移動する。さらに砂堆が前進して下流で流れを堰上げてくると $(h_0 - h_1)$ の値は正となり、流れは加速流となってそのひろがり方はきつくなる。その結果、点は右上方へ移動する。1 hr 35 min 以後は変化がゆるやかになったため、点はだいたい同じような所におちついている。

No. 9 は Fig. 1 (b) の水路の +5.0m の位置に高さ 12cm の堰をもうけて行なった実験である。0 hr から 3 hr 10 min までは、かなりよく線上にのっているが、それ以後、 $(h_0 - h_1)/h_1$ が 1.0 より大きくなると、一定の傾向は示さなくなる。

なお、年報前号に発表した実験結果も再整理をしてのせてある。

4. 砂堆の進行過程における急拡大部のエネルギー損失に関する考察

前論文¹⁾において、掃流力が限界掃流力にくらべて、十分大きい移動床水路においては、水路幅変化にかかわらずエネルギー勾配がほぼ一定になること、水路幅急拡大部においても急拡大によるエネルギー損失はかなり小さいものであるという注目すべき結果が得られた。この事実を用いれば平衡状態における河床形状を容易に予知することができる。

しかし急拡大部において砂堆が進行しつつある状態においても、はたして急拡大による損失水頭は小さいであろうか、もし小さくないとすればその定量的評価方法はどうかという疑問が生じてくる。この問題を解明することは急拡大部における河床の時間的変化を予知する上において極めて重要なことであるので、以下若干実験的検討を行なった。

Fig. 10 および 11 は No. 8, 9 の実験結果である。いずれの場合においても、水面形とエネルギー線については、はん雑をさけるために、最初と最終のものしか示していない。ここで最も問題になるのは急拡大部付近におけるエネルギー水頭の計算方法である。

流水断面積、流速分布の補正係数のとり方によって計算されるエネルギー水頭は大きく変化する。Fig. 10 および 11 に示されたものは後流域の末端と急拡大始点を結ぶ直線によって有効断面積を算定し、かつ

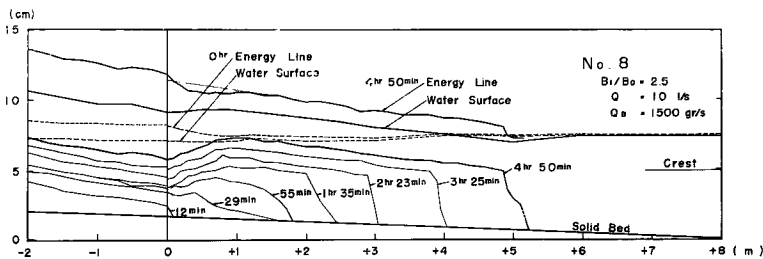


Fig. 10 Change of water level, energy line and bed profile.

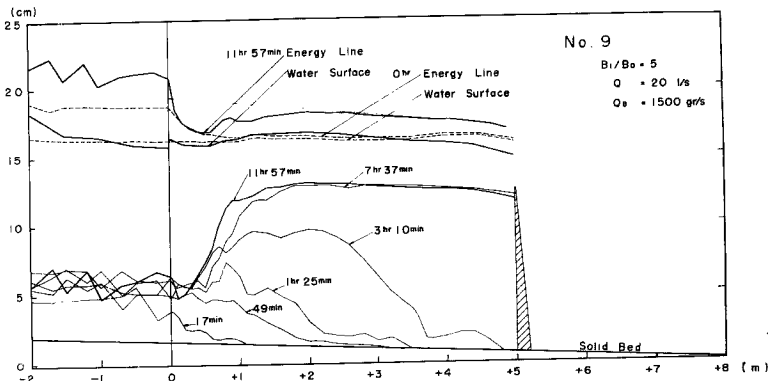


Fig. 11 Change of water level, energy line and bed profile.

流速分布の補正係数を 1.0 として求めたものであるが、このような算定方法が不適切であるため、急拡部においてエネルギー水頭が低下している。したがってこのような算定方法を合理的にしない限り、急拡による損失水頭を論議することはむづかしい。ここでは勾配が比較的一様な部分のエネルギー線を上流に延長して、急拡始点におけるエネルギー水頭との差をもって急拡によるエネルギー損失水頭とみなせば、Fig. 10, 11 に点線で示すように、存在することになり、平衡状態における特性とかなり異なる。

No. 9 の実験では平衡状態に近づくまでの時間を短縮させるために、堰を +5 m の所に設けたが、Fig. 11 に見るように、この実験の範囲内では、堰の背砂が上流に進行しつつあり、平衡状態に達していない。

したがって、さらに平衡状態に達するまで実験を継続して、急拡による損失水頭の変化について検討するとともに、その定量的評価については、急拡部における合理的なエネルギー水頭の算定法との関連のもとに、今後検討していかなければならない。

5. 結 論

以上、著者は急拡部における砂堆の運動機構について主として実験的研究を行ない、砂堆の運動に密接な関係をもつ後流域の特性について 2, 3 の興味ある事実を明らかにした。

後流域の長さ、すなわち急拡による水流のひろがりに関しては、 $(h_0 - h_1)/h_1$ が $-0.4 \sim 1.0$ の範囲において我々の用いた整理方法は、かなりよく現象を説明できる。しかし、 $(h_0 - h_1)/h_1$ が 1.0 より大きい範囲では、点がばらつき、一定の傾向を見出すことはできない。このような流れに対しては、 $(h_0 - h_1)/h_1$ の他に流れのひろがり大きな影響を与える要素があると思われる。

後流域の対称、非対称性に関しては、堰上げの大きい減速流れの場合は非対称になり、急拡部で射流になる場合と固定床逆勾配にした場合、および、移動床で堆積した砂により逆勾配が形成されている場合とは、加速流となり、対称になる。この対称、非対称の生ずる原因については、いまのところ確実なことは言えない。この点は今後検討していくべき重要な問題である。

砂堆の運動状況に関して、水の流れと砂の運動との相互関係について定性的な若干の考察を加えた。また、砂堆の進行とともに後流域は、非対称形から対称形へと変化していく傾向をもつ。

急拡部におけるエネルギー損失に関しては、前論文¹⁾の結果と合わせて考えると、平衡状態に達する前と後では、かなり様子が異なり、平衡状態に達する前では、急拡によるエネルギー損失がかなりあるという結果を得た。しかし、この定量的なとりあつかいには、急拡部における合理的なエネルギー水頭の算定法を確立することが重要である。

断面急拡部における砂堆の運動機構という問題は、理論上、応用上、きわめて興味深い重要な問題であり、今後さらに研究をしていきたい。今後の研究方針としては、問題が非常にむづかしいので、これを適当に簡単化した 1 次元的なとりあつかいで、どの程度まで現象を説明できるか研究していくことも必要であるが、一方では、水理の根本現象に立ちかえって、現象を 2 次元的に、忠実に解明していくという努力も欠くことはできない。

最後に、本研究を行なうに際しては、矢野勝正教授よりたえず御教示と御激励をいただき、実験および図面の整理に際しては、辻本行雄君には多大の労をわずらわした。ここに深謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 芦田和男：断面変化部における河床変動に関する研究（Ⅰ），京都大学防災研究所年報 第 6 号，昭 38. 7. pp. 312-326.
- 2) G. Birkhoff and E. H. Zarantonello : Jets, wakes, and cavities, Academic Press Inc., New York, 1957, pp. 309-310.