

ダムの背砂に関する研究(Ⅲ)

—背砂の遡上について—

矢野 勝正・芦田 和男・田中祐一朗

STUDY ON RESERVOIR SEDIMENTATION (Ⅲ)

— ON THE BACK-SAND PHENOMENA —

by Dr. Eng. Katsumasa YANO, Dr. Eng. Kazuo ASHIDA
and Yuichiro TANAKA

Synopsis

The dam which is constructed in the river having much sediments produces many difficult problems due to deposited sediments.

In this study the authors tried to clear the back-sand phenomena due to the debris barrier in the experimental flume of 150m length, and revealed the interesting behaviors in these problems.

1. 緒 言

最近各地において、洪水調節と水資源確保のために多目的大ダム群が続々と築造され、また国土保全の名のもとに山間地の小溪流に築造される砂防ダム等を含めるとその数は実に莫大なものとなる。

自然の流路では一般に水とともに土砂が輸送される。このためダムの築造はその土砂の移動を止めることから、その効能の陰に貯水容量の減少、上流部の河床上昇など色々な問題を内在している。

とくに堆積土砂による上流部の河床上昇はそれに伴って現われる洪水位の上昇、洪水時の冠水区域の拡大、排水不良地区の拡大などダム上流部の住民の福祉に種々の被害を与え、このために社会的紛争を惹起している例もある¹⁾²⁾³⁾。

このような問題が派生するにつれ、直接ダムによる便益を受けない上流部住民のダム計画に抵抗する力は強くなり、こうした補償問題はダム計画の前途に大きな障壁となっており、その合理的な解決は今後のダム計画については治水、利水対策の前途を左右する重要な問題である。

こうした問題を合理的に解決するためには、まず現象そのものを客観的に正しく把握しなければならない。そのために長大水路を用いて実験を行なった結果、極めて興味ある事実が明らかになった。

この種の問題に関しては最近の土砂水理学の進展に伴ない国内外において数多くの研究がなされ、種々の特性が明らかにされてきた。すなわち、堆積土砂量に関しては、流域面積と貯水池容量が堆砂量に及ぼす影響を統計的に考察した Witzig⁴⁾、Brune⁵⁾、Brown⁶⁾、鶴見⁷⁾らの研究、地形や地質との関係からとらえようとした田中(治)の研究⁸⁾などがあり、また貯水池が満砂されるまでの堆砂形状や堆砂の進行過程については Harrison の研究⁹⁾、杉尾¹⁰⁾、吉良、横瀬¹¹⁾、山岡¹²⁾らの実験的研究があり、著者らも砂堆先端の運動の特性に着目した一解析法を提案した¹³⁾。

そこで、ここではこのようなダムによる堆砂の影響が上流にどのように波及してゆくかという点に着目して、満砂後のダム上流部の河床変動について考察することにする。この問題に関しては、流水の水理特性と、流路を形成する土砂との間に適当な釣り合い関係があるという考えの下に、物部¹⁴⁾、安芸¹⁵⁾らによる限界掃流力の概念に立脚した平衡こう配理論、および Lane¹⁶⁾と同様な考え方に基づく増田、河村の研究¹⁷⁾

などの平衡こう配、安定縦断形状などの考え方を適用して、ダム上流部の河床形状を説明しようとする研究が、矢野、大同¹⁸⁾¹⁹⁾、土屋²⁰⁾、山岡²¹⁾、杉尾²²⁾らによってなされてきた。しかし、初期河床から平衡河床に達するにはかなりの長期間を要し、実際河川ではそうした変化が完了するまでに、すなわち過渡領域において新たな外的環境の現われるのが常であり、こうした意味から支配流量*との関連において平衡河床の存在意義についてもさらに考察を加える必要がある。また仮りにこうした平衡河床の存在を認めても、これは必ずしも初期こう配とは一致せず、その結果背砂の影響の及ぶ限界が存在することになるが、この点については実測資料からも、実験結果からも明確に結論したものは未だ見当たらない。

このような堆砂の邇上の様子を調べる上からも、またダム上流部の河床上昇に伴う種々の対策を合理的に、又経済的に計画する上からも最終的な河床形状だけでなく、それに近づいていく過程をも知る必要があり、そのためには時間的な変化をも考慮した解析を行なわなければならない。このような解析法はすでに岩垣の特性曲線法²³⁾などが提案されているが、精度を向上するためには $\Delta x, \Delta t$ のメッシュを小にする必要があり、計算が非常に繁雑となる。したがって高速度計算機を駆使した数値解²⁴⁾が試みられているが、この方法も計算を完了した後でなければ変化の様相がわからず、現象の一般的性質を調べる上から不便である。

そこでまず、現象の実体を把握するために実験を行なった結果、従来あまり注目されていない極めて興味ある事実が得られた。しかし現在までのところではこうした現象の全てを説明し得るような解析は進んでいないが、ここにその一端を報告して今後の研究を進める上での指針としたい。

2. 実験施設および実験方法

(1) 実験施設

長さ 150m の実験水路を用いて実験を行なった。以下にこの実験施設の概容について説明を加える。

この装置は洪水および高潮などの非定常流に関する問題の実験的究明を目的として作られたもので、**Phot. 1** に見られるように、水路本体、昇降装置、上下流低水槽、帰還水路、高水槽、量水槽、洪水発生用制禦装置、下流部の境界条件発生用装置、サンドフィーダーおよびスクレーパーより成っている。

水路本体：水路断面は 60cm×60cm の鋼製水路であるが、下流端は境界条件発生用のワールとして 3m×3m×1m に広げてある。長さはこのワールも含めて 150m であり、6 m の間隔で昇降装置に支持されており、0~ $\frac{1}{150}$ の範囲で連続的にこう配を変えることができる。

昇降装置：1 ストローク 75mm のネジ棒を回転させて水路の支点を上下させる。

上下流低水槽および帰還水路：上流部低水槽は 9m×4.5m×1.35m であり、下流部低水槽は主に下流端での境界条件を発生させるための水を貯えるもので、5.7m×2m×1.5m のコンクリート製の水槽で、両者は内径 50cm のヒューム管で連結されている。この三者を含めての総貯水容量は約 80m³ である。

高水槽：2m×2m×1.5m の鋼製の水槽で、量水槽とは内径 30cm の管で連結されている。水位差による自然流下方式をとってあるため、流量を一定に保持すべく内径 30cm の管による余水吐により水位を一定に保つようになっている。

量水槽：2m×1m×1m の鋼製の水槽で、下流端の溢流口には 50cm×50cm の刀型堰を取りつけており、

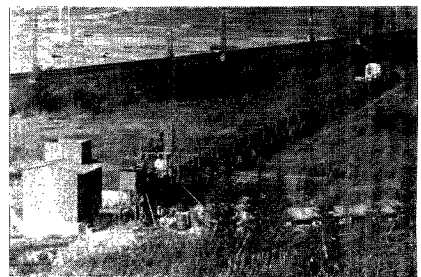


Photo. 1 Experimental flume

* 杉尾博士によれば、この流量は種々に変化する流量のうちで、平衡河床形状の形成に最も支配的な役割りを演ずるもので、ダム築造前の河床形状より推定することができるとして、平衡河床基準流量なる呼称を与えている。

越流水深により流量を知るようになっている。

洪水発生装置：内径 25cm、20P のポンプにて高水槽に揚水し、基底流量は高水槽と量水槽とを結ぶパイプに設置された手動の制水弁にて調節し、流量の変化分はバイパスに設置された空気弁を自動制御させて流量をコントロールする。最大流量は 100l/s である。

下流部の境界条件発生装置：洪水発生装置と同様な方式による自動制御により下流端のプールの水位を変化させるものであるが、現在この自動制御装置は設置されておらず、内径 10cm、10P のポンプのみが設置されている。

サンドフィーダー：一定量の給砂を連続的に行なう装置であり、投入口に投入された砂はバケットエレベーターによって上部のホッパーへ運ばれ、この砂はホッパーとベルトコンベヤーの間のゲートの開度およびベルトコンベヤーの回転速度を変化させることによって、乾燥砂重量で 20gr/s~2680gr/s の範囲で調節された後シュートを伝わって水路内に投下される。給砂量は砂の乾燥状態その他の条件によりかなり変動するので、砂は乾燥炉にて完全に乾燥させてから用いることにした。給砂量の小さい場合は底面を傾斜させ、その前面に巾 1cm のスリットを設け、底板との間隙を変化させることのできるゲートを有する補助給砂箱を用いた。

スクレーパー：水路に砂を均一に敷き均らす装置であり、水路内のレールに懸垂された、ならし板の高さを任意に変えることのできるスクレーパーを水路上流部に設置した駆動部のモーターにより上下流方向に 6m/min の速度で移動させる。

(2) 実験方法

実験に先だち、水路を正確に 1/300 のこう配に設置した。実験に用いた砂は Fig. 1 に示すような比較的一様に近い粒度分布の海岸砂で、その中央粒径は 0.245mm であり、空隙率は 0.4 である。行なった実験は Table 1 に示す通りである。

まず水路床上に厚さ数 cm に一様に砂をスクレーパーにて敷き均した後、所定の流量、給砂量を与え、河床がその流量、給砂量に対応した平衡状態に達したと思われるまで通水を継続する。河床がほぼ定常状態に落ち着いたと思われる時に上流から約 130m、即ち給砂点から 128m の位置に鋼板による

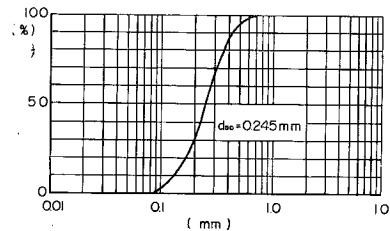


Fig. 1 Grain-size accumulation curve of used sand.

Table 1

No. of Experiment	Discharge	Supplied Sediment	Hight of Weir from Initial Sediment Bed
1	29.3l/s	2.474gr/min	14cm
2	15.4l/s	1.168gr/min	10cm

刃型堰を設置した。

さらに流量、給砂量を一定値に保持したままかなりの時間実験を継続し、河床および水面形の時間的変化を測定した。Exp. 1 については、水面は時間間隔 2 時間、距離間隔 3m で水路中央部のみ測定し、河床は水が濁って通水のまま測定することが困難であったため、時間間隔 4 時間で、その都度断水して横断方向に 3 点を、距離 3m の間隔で測定した。断水する場合に、河床形状が変化しないよう特に注意した。

Exp. 1 において初期の平衡河床形状を得るまでの時間が短く十分な平衡状態に達しておらず、そのため上流部の河床は堰設置後一旦低下の傾向を示してから上昇し始めた。また砂の移動は活発で、dune が大きく発達し、水面の波立ちが激しく測定に十分な精度を上げることが困難であった。またこの場合の給砂量が

サンドフィーダーの調節能力の下限に近く、乾燥も天日によったため、使用砂の状態の均一性を欠き、給砂量も10~15%程度の変動は免れなかった。以上のような理由から **Exp. 1** は定量的に論議するには不相当と思われたので、現象の様相を観察する程度に止め、これらの諸欠点を改善して行なったものが **Exp. 2** である。したがって **Exp. 2** は **1** と本質的に相異なるものではなく、砂澁をできるだけ小さくするために流量、給砂量を少にし、また給砂の条件を一定に保つために乾燥炉により完全乾燥させたこと、補助給砂箱を用いたことなどが主な相異点である。測定は精度の向上をはかって水面は横断方向に3点を、河床は **Exp. 1** と同様な方法で横断方向に5点を、距離3m間隔で行なった。測定の時間間隔は満砂時までは水面は3時間、河床は9時間毎に、満砂後は水面は3時間、河床は6時間毎に測定した。満砂後においては通水停止の6時間間隔にて越流流砂量を測定し、給砂量 = 堆積土砂量 + 越流流砂量 の関係から測定精度のチェックを行なった。短時間ではこの誤差は大きいですが、時間を大きくとって調べてみるとその間の誤差は1割以内に入っており、測定精度はかなり信頼し得るものと思われる。以下とくにごとわらない限り実験に関する説明は実験2の場合についてのものである。

3. 実験結果とその考察

貯水池が土砂で埋め尽されてしまうまでの過程は従来からの多くの実験によって明らかにされてきた現象と同じである。ただ堰設置前に見られた数mm程度の小さい砂澁が堰の設置による水深の変化によって、背水終端付近でかなりの大きくなり、このため砂堆(デルタ)の先端はかなりの時間、砂澁と識別しえなかった。背水終端よりかなり下流において、実験時間にして10時間ほどあとになってはじめて砂堆が識別し得るようになり、その砂堆は徐々に厚みを増しながら堰に向かって前進する。この砂堆の運動は著者らが昨年行なった実験および解析方法とよく合致しており、満砂までに要する時間もこの前進速度

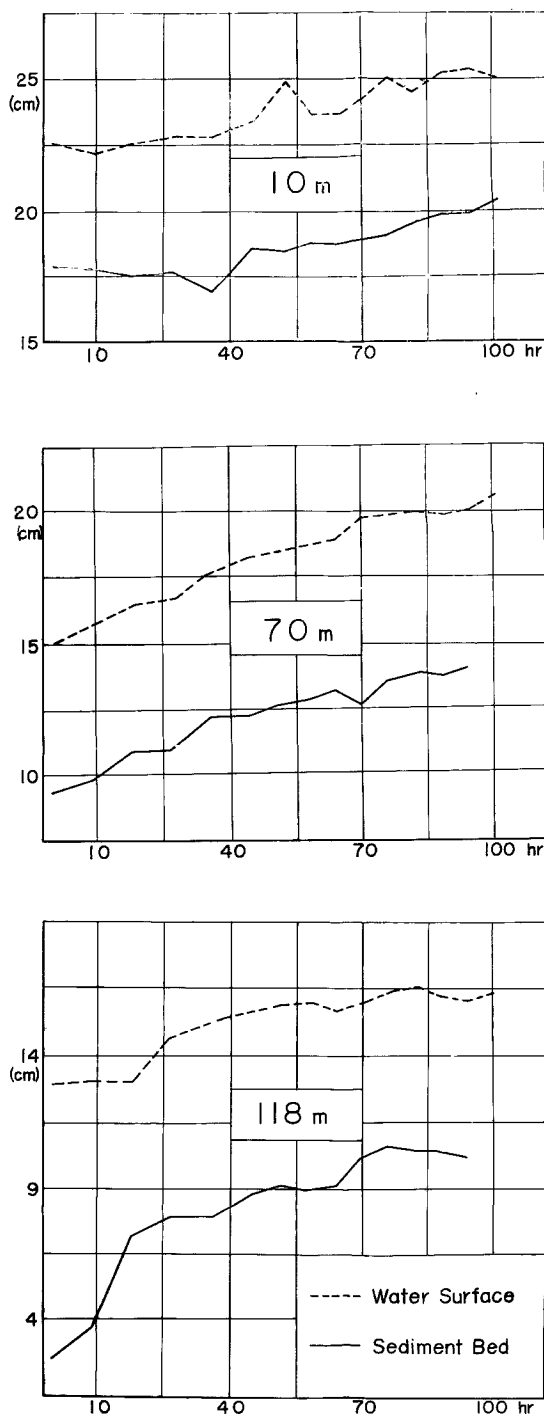


Fig. 2 Variation of elevation of bed and water level with time. (Exp. 2)

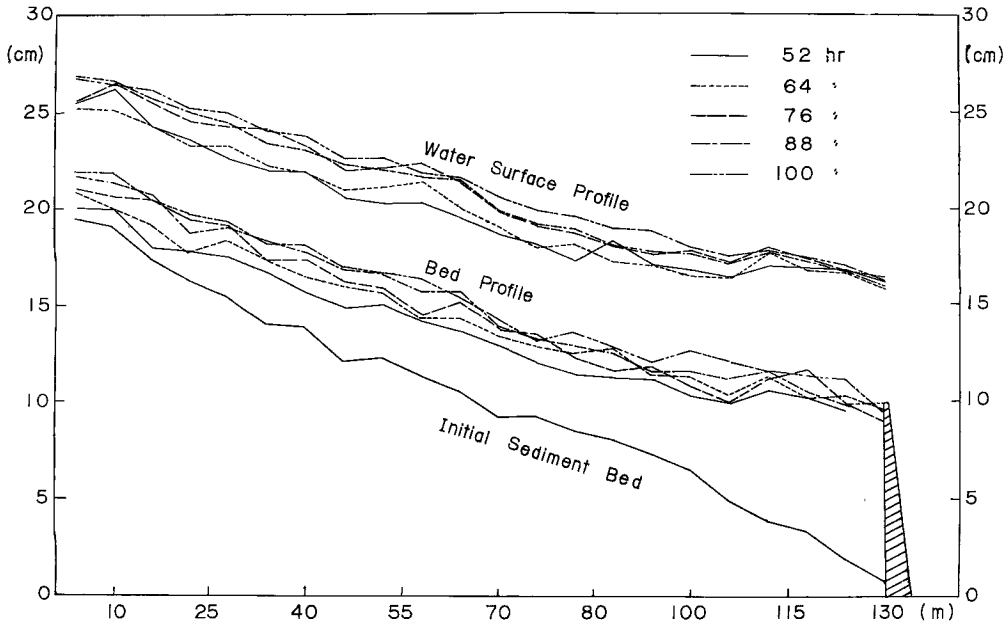


Fig. 3 Variation of bed and water surface profile with time (Exp. 2)

u を積分したものの $\int_0^l \frac{dx}{u}$ にほぼ一致している。(ここに l はダムから堆砂開始点までの距離を表わす。)

ただ堰の上流 10cm 程度に達してからはその間を埋めるのにかなりの時間を要し堰近傍の渦など局所的な流れの影響で、ほぼ堰まで埋めつくすとすぐに渦によって洗掘されてしまうという現象を繰り返す。結局堰設置後 52 時間をもって満砂状態と判定した。

Fig. 2 は実験結果の一例として数地点における河床と水位の時間的変化を示したものであるが、従来は堆砂面こう配はほぼ直線によって近似できると考えられていたが、この図からもわかるように、そうした直線と旧河床との交点よりもずっと上流まで実験の最初からすでに堆積の傾向を示しており、この点はきわめて注目すべきことである。すなわち堆砂面形状を直線とみなしてデルタ付近のこう配をもって直線を引くと、背砂の終端点を過小に見つめることになり、実際は旧河床を漸近線とする一つの曲線を考えるべきであろうと思われる。この点はさらに満砂後の

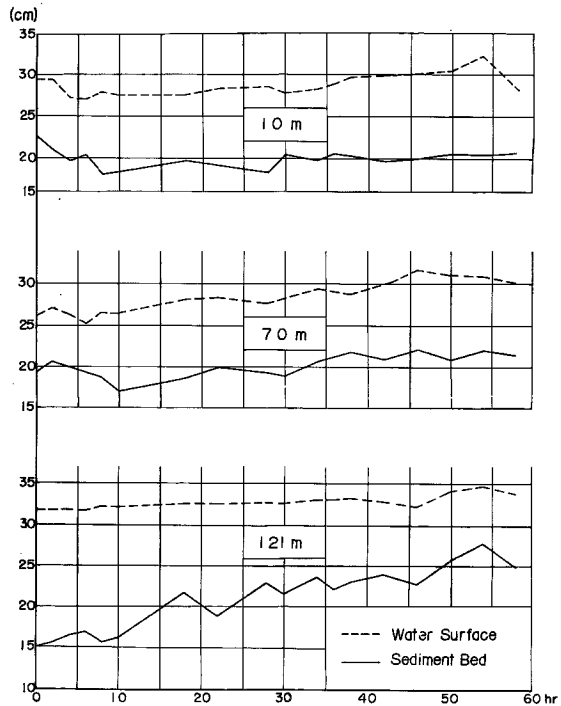


Fig. 4 Variation of elevation of bed and water level with time (Exp. 1)

背砂の遡上を考えると、きわめて重要な意味をもつことになる。

Fig. 3 は満砂後の水面形および河床の縦断形状の時間的変化を示したものである。砂漣の発生のため水面も河床面もかなり波立っているが、この図からもその変化過程の概略の様相はうかがうことができる。この図から認められる最も顕著な特徴は全区間を通じほぼ平行に河床も水位も上昇していることである。これは **Fig. 2** においても上下流ともに時間的変化曲線のこう配はほぼ一定に近く、直線的に変化していることから認められる。こうした現象は **Fig. 4** に示した **Exp' 1** の場合にも認めることができる。また **Fig' 5** に示した常願寺川における本宮砂防ダムの

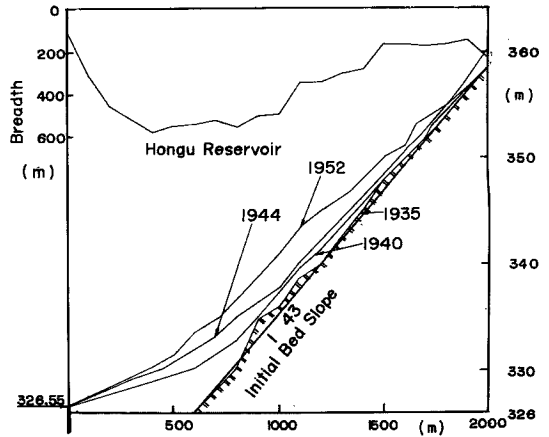


Fig. 5 Example for the aggregation of the bed upstream the debris barrier.

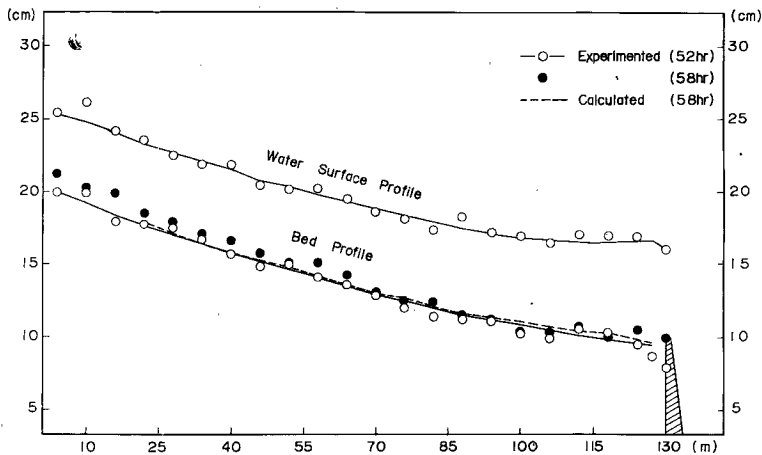


Fig. 6 Comparison between the experimented and calculated profiles for the bed and water surface.

実測例からも認めることができる。これに関連して、すでに A. Schoklitsch は“ダムの築造前後を通じて流砂量が一定で、抵抗係数、流量、および河床材料も不変であれば、河床こう配はダム築造後も築造前と同一であるべきであり、貯水池内の水深も一定で、かつ河床は最初の河床に平行に上昇するであろう”。と述べている。これはきわめて常識的なことで何ら疑問をはさむ余地がなく、結局河床は旧河床こう配に等しい平衡等流こう配におちつき、ダム上流の全区間はダムの高さだけ平行に持ち上げられることになる。

しかしわれわれはこうした終局状態への遷移過程を問題にしているのであって、こうした問題は水の運動方程式、連続式、および流砂量式と流砂の連続式、抵抗法則式の五つから導かれる基礎方程式を解くことにより原理的にはその解明が期待される。だがこの基礎式を解析的に解くことは困難なため、特性曲線による近似解法とか、微小変動などにより線形化して解を求めることが試みられている。

そこで、いま **Exp. 2** について実測値から求めた粗度係数を用いて特性曲線法によって計算を行ない実測値と比較したものが **Fig. 6** である。満砂時の実測値が白丸、6時間後のものが黒丸で示してある。砂漣の影響を除くため初期河床形状は実線で示すような実測値から最小自乗法によって求めた二次曲線で代用させ

た。堰の位置で水位を与え、背水計算を行なって各点の水深を求めた。これは図中に実線で示した水面形である。この水深を用い Δt を3時間とって計算を進めた、その結果6時間後の河床形状が図中に点線で示してある。水深変化の大きい背水終端付近までは、計算と実測とはかなりの一致をみているが、それより上流では計算上の変化はきわめてわずかであり、実測とは合わない。これは背水計算の結果水深はきわめて速やかに一様な値に収束してしまい上流部はほぼ等流状態になってしまう。これは実測においてもみられる。各時間における水深の距離的变化を調べたものが Fig. 7 であり、砂澱のために変動が激しいが $t = 52\text{hr}$ の資料について 70m より上流部において水深はほぼ一定になっている。

このように計算上、上流部は等流状態となるため、計算による河床の上昇は現われてこない。Fig. 2 に示されている水位および河床の時間的变化 dz/dt は各点を通じてほぼ共通に $1 \times 10^{-7} (m/s)$ 近傍の値をとっている。流砂の連続式から

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{7}{6} \frac{\alpha(n^2 \cdot q^2 \cdot g)^{m+1/2}}{h^{13/6}}$$

$$\left(\frac{1}{h^{7/3}} - \frac{1}{hk^{7/3}}\right)^{m-1} \left(\frac{2m+1}{h^{7/3}} - \frac{1}{hk^{7/3}}\right) \frac{dh}{dx}$$

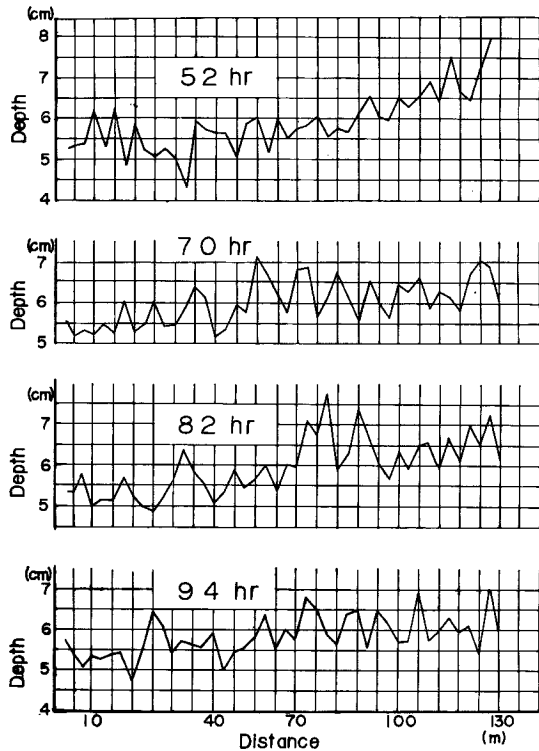


Fig. 7 Variation of depth with distance in the case of $t = \text{const.}$

となるから、このような dz/dt が存在するに必要な dh/dx の値を計算してみると、 $m=2, K=10$ とすると、この場合には $dh/dx = 7.7 \times 10^{-5}$ という値が得られる。すなわちこのようなわずかな水深変化が存在しても河床は実測値にみられる程度の変化をすることを意味しており、水面形の計算を非常に高精度で行なわない限り、河床の変動を適確に論じえないことになる。したがって土砂を含む流れの抵抗法則の問題などもっと根本にたち帰って考察しなければならない。

4. 結 論

以上著者らはダム満砂後の背砂現象に関して長大水路による実験的研究を行なった結果、興味ある諸点を明らかにした。すなわちポイントゲージによる測定などでは通常等流とみなしうるようなかなり上流の区域にまで河床上昇はあらわれ、背砂の領域は非常に長区間に及ぶことが明らかにされた。この点について流砂と河床変動の連続式によって検討した結果、 dh/dx が 7.7×10^{-5} という非常に小さい値によっても、実験に見られるような河床上昇が生じることがわかった。したがって背砂のような緩慢な長期にわたる現象に対しては、水面形を非常に高精度で求めることが必要となるが、このためには流砂のある場合の抵抗法則など土砂水理学上の基本的な問題について再検討することが必要である。

実際の河川においては実験にみられるように長期間にわたって洪水流が継続することもなく、また、混合砂礫の選択流出、水路幅の変化、蛇行流の影響が加わってくるため、事情はかなり異なってくるものと思わ

れるが、ダムによる背砂の影響は非常に長区間に及ぶものと考えなければならない。
最後に本研究は道上正則君の労に負うところが大きい。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 長野県土木部：泰阜ダム関係経過調査，昭36.
- 2) 長野県土木部：天竜川上流の河床変動について，昭36.
- 3) 篠原謹爾：ダムと水害(2)，土木技術 Vol. 12, No. 7, 1957
- 4) Witzig B.J.: Sedimentation in reservoirs, Proc A.S.C.E. June 1943
- 5) Brune C.M.; Trap efficiency of reservoirs, Trans. A. G.U. Vol. 34, No. 3, 1953,
- 6) Brown, C.B.; "Discussion of sedimentation in reservoirs, by Witzig, B.J." Trans. A.S.C.E. Vol. 109, 1944
- 7) 鶴見一之：貯水池堆砂量の一算法，土木学会誌，第39巻，第3号，1954.
- 8) 田中治雄，石下宏：貯水池の堆砂量と集水区域の地形，地質との関係について，土木学会誌，第39巻，第4号，1951.
- 9) Harrison. A.S.; Deposition of the head of reservoirs, Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, I.A.H.R. 1953.
- 10) 杉尾捨三郎：矩形水路におけるせきの堆砂現象に関する次元解析的研究，土木学会論文集，第80号，昭37.
- 11) 吉良八郎，横瀬広司：貯水池の滞砂機構に関する実験，農業土木研究別刷，第1号，昭35.
- 12) 山岡勲：堰における堆砂の進行過程とその形状について，北海道開発局土木試験所月報，第104号，1962.
- 13) 矢野勝正，芦田和男，定道成美：ダムの背砂に関する研究(1)―貯水池における砂堆の運動機構について，京大防災研究所年報，第6号，1963.
- 14) 物部長穂：水理学，岩波書店，昭26，pp. 260.
- 15) 安芸皎一：河相論，岩波書店，昭26，pp. 66.
- 16) Lane, E.W.; Stable Chanel in Erodible Materials, Trans. A.S.C.E. Vol. 107, 1937,
- 17) 増田重臣，河村三郎：河川の静的平衡勾配について，土木学会論文集，第70号，昭35，流砂ある河川における平衡勾配について，土木学会論文集，第70号，昭35.
- 18) 19) 矢野勝正，大同淳之：砂防ダムの堆砂勾配について，新砂防，31，昭33，砂防ダムの堆砂勾配について(第2報)京大防災研究所年報，第2号，昭33.
- 20) 土屋義人：流路の安定縦断形状について，京大防災研究所年報，第5号A，昭37.
- 21) 前出12)
- 22) 杉尾捨三郎：ダム上流の堆砂形状について，土木学会論文集，第93号，昭38.
- 23) Y. Iwagaki; On the analysis of mechanism of river-bed variation by characteristics, Memories of the Faculty of Eng. Kyoto Univ. Vol. 18, No. 3, 1956.
- 25) 矢野勝正：河床変動の研究一特に河口付近の浚渫が河床に及ぼす影響について一，京大防災研究所年報，第5号A，昭37.
- 26) 芦田和男，田中祐一郎：河床変動に関する二，三の考察，第17回土木学会年次学術講演会講演概要，昭37.