

河 床 変 動 論

1. 河床変動の問題点

河道とは河水を流す土砂で構成された水路である。河床とはその水路の水との境界面をいう。流域に降った降水を海または湖に排水するのが河川であるが、その際同時に地表を流水が浸食して土砂を水とともに流下させる。河川はそれ自身で流送した土砂を下流に堆積して洪積地、沖積地を形成し、その上の低い所を流れるようになる。このことからわかるように、河水は河川自体が運搬・堆積した土砂の上を流れているのであるから、当然河川の流水によって河床が変化することを余儀なくされる。この変化の程度は河川により、また場所により異なるけれども、本質的にはどの河川でもこのような性質をもっている。

しかし、社会生活上からは河道はできる限り安定していることが望ましい。治水工事の主たる目的は洪水の氾濫の防止であるけれども、この目的を達するための1つとして安定した河道を作ることが非常に重要な問題となる。すなわち、河川全体として河床変動の少ない河道を計画することが必要となり、以前には洪水を河道内に収めて安全に流すということを主眼として河川改修が行なわれてきたが、土砂の問題をも考えて安定河道を考えるようになってきた。

また発電、洪水調節、農業用水などのために数多くの貯水池が造られるようになり、これに伴って貯水池内の堆砂が重要な問題となってきた。これはダム築造前の河床に対し、ダム築造のために生じた河床変動であり、近年大規模のダムが作られるようになって河床変動は非常に大きなものとなり、貯水池の寿命および Back sand による貯水池上流の河床上昇による洪水氾濫、内水の排水不良などの被害を与えている場合がある。したがって、ダム築造の場合の貯水池内の堆積およびその上流部の河床に与える影響について十分な知識を持つておくことが必要である。

また、長年月の河川の働きによってほぼ安定していたと考えられる河道が、ダム築造のために供給土砂量が著しく減少し、ダム下流部の河床低下をきたすことは従来の経験から知られており、この程度およびその対策を考慮しておくことが必要である。

また近年は河川からの砂利、砂の採取が盛んで、これによる河床変動が非常に著しい河川もある。安全に採取し得る量の推定が必要であるし、またたとえ砂利採取がなくても現河道として安全に流送させることのできる流送土砂量を推定し、それ以上の土砂は砂防工事などによって上流部において阻止することは、わが国のように急峻な地形で豪雨に見舞われ、かつ下流部が非常に開発されている地域では非常に重要なことである。

以上は河川全体として見た場合であるが、その他に河床変動の問題点としては局所的なものが数多くある。例えば、河川の弯曲部の深掘れ、狭さく部における深掘れならびにその上流部での堆砂などがあり、また護岸、水制など河川構造物による局所的深掘れの問題がある。

以上述べたように、河床変動に伴う非常に数多くの問題があり、従来幾多の研究、調査が行なわれてきているが、現段階では十分とはいえない。近年流送土砂に関する研究および実測が盛んに行なわれ、従来の統計的あるいは経験的な取り扱いが、やや合理的に取り扱い得るようになり、河川全体としての河道計画は比較的合理的にしかも数量的に樹てられるようになってきたが、未だ細部については不明な所が多く、今後の研究に期待される。

局所的な河床変動については、未だ水流自体の解明も十分でなく、近年漸く研究が行なわれているが、未だ局部洗掘を解決するまでには到っていない、経験的な法則に頼らざるを得ない状況にある。

ここでは主として河川全体としての河床変動につき取り扱うこととする。

すなわち、河川全体的な河床変動の予測と安全な河道の設計ということに帰着する。このためには流水の河床に作用する力とそれにより流送される土砂の連続条件とを考えあわせなければならない。流水自体の問題の大部分は河川を形成する河道によって支配をうけ、しかもその河道は自然の水流および流送土砂によって形成されているので河床変動は非常に複雑な問題である。すなわち、水流の問題を解決するためには、水の流れる流路を想定する必要があるけれども、この想定した流路は水流による洗掘、堆積のために変形することが予想され、実際にもこうした現象が多くの河川で見られている。また、流水の諸要素は河床を水が流れることによつて生ずる砂漣、砂堆などによって変化し、またさらに、含有する土砂量によつても変化するので、一層複雑となる。

これらのために、現実には、水理的に合理的に設計され、施工されたものが次第に変化していくことになるので、これを防ぐために将来における河床の変動をできるだけ少なくするような設計を最初から考えておくか、また変形をなるべく少なくするような処置を講じておくことが必要である。あるいは、将来の河道の変形を予知して、その対策を考えておかなければならない。

2. 河床変動の測定および測定例

河床変動の問題を取り扱うに当っては、まず河全体がどのようなようになって来たか、また今後どのようなようになっていくかを知ることが最も重要なこととなる。このためには次のような方法によって知ることができる。

(1) 過去の河川横断測量図を比較してみる

この方法が最もよいと考えられるが、河川によっては十分な資料が得られないことが多いし、また従来の横断測量は測量精度があまりよくないので、細かい変動状況を知るにはあまり適当とはいえない。庄川において横断図より計算された経年的河床変動状況を図-1に示す。

(2) 経年的平均低水位の比較

十分な横断測量の資料がない場合には年平均低水位（年平均水位以下の水位の平均）を、あるいは年平均水位を経年的に比較することによって、その地点の河床変動をほぼ推察することができる。図-2に淀川の平均低水位の経年的変化を示す。

(3) 経年的水位—流量曲線の比較

(2)の場合にはわが国の例では、年雨量その他の影響を受けることは比較的少ないが、もし測水地点の水位—流量曲線が経年的にわかっていれば、ある一定流量に対応する水位をこれから求め、それを経年的に比較することにより、より合理的に推定することができる。

図-3に淀川の枚方における低水流量曲線図を示す。これによると平均低

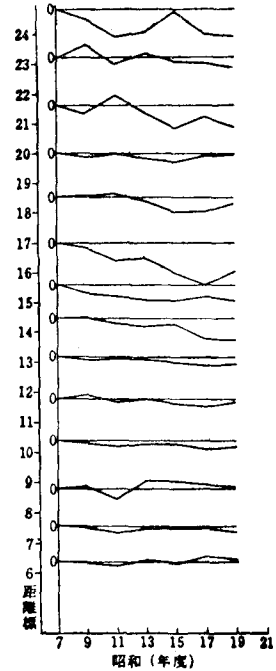


図-1 庄川の河床変動状況

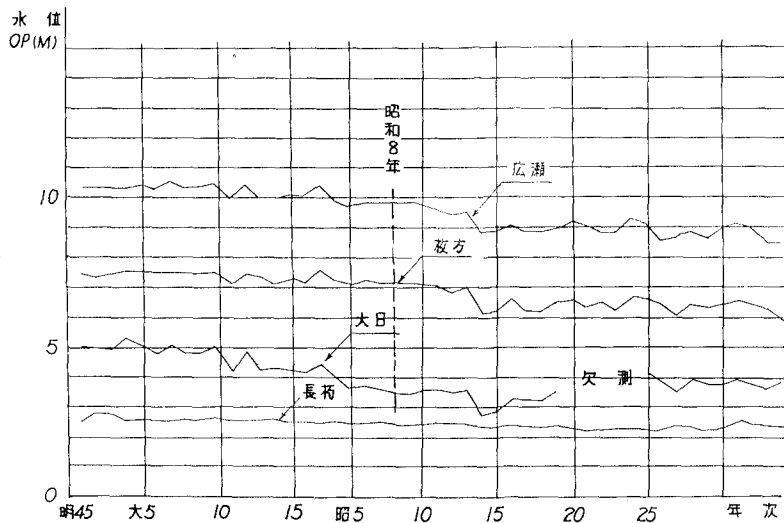


図-2 淀川の平均低水位の経年変化図

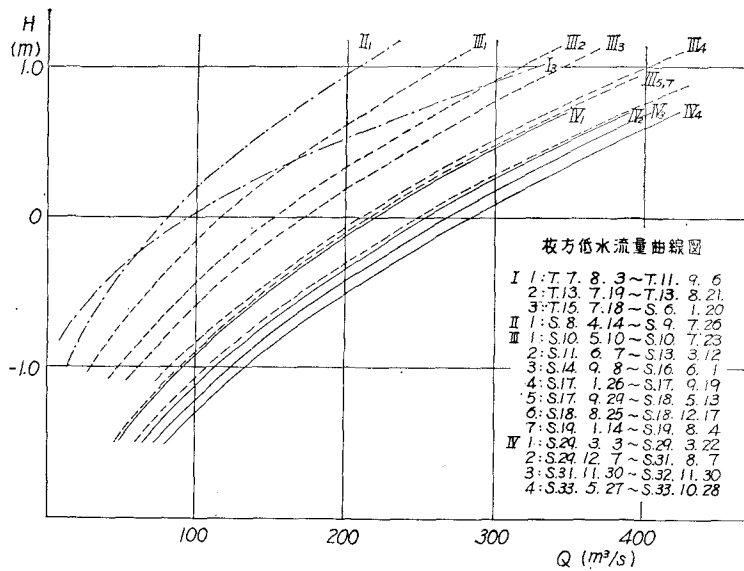


図-3 枚方低水流量曲線図 (淀川)

水位から得られた河床変動とほぼ見合う変動が認められる。

これらの方法では長期間にわたる河床の変動状況を知るには便利であるが、洪水時の河床変動を知ることにはできない。洪水時の河床変動は流水の特性を知る上にも、護岸の根入れ深さ等を定めるためにも重要であるが、わが国では流速が比較的速いため従来あまり測定されてはいないが、今後は測定に力を注ぐべきであると思われる。この方法としては次のようなものがある。

(1) 重錘による測深

洪水中に橋梁上より、あるいは舟の上から重錘を吊して測深する方法である。これは精度はあまりよくないが、簡便であるのでよく用いられる。

この方法で測定された2,3の結果を示す。これらの例を見ると洪水中に相当河床が掘られていることが知られる。(図-4,5)

(2) 音響測深器による方法

音響測深器により河床高を求める方法で、測深器を水面に固定することができれば、精度よく測ることができる。また、洪水中に限らず、広範囲の河床の状況および変動を知るのに非常に便利である。この方法による

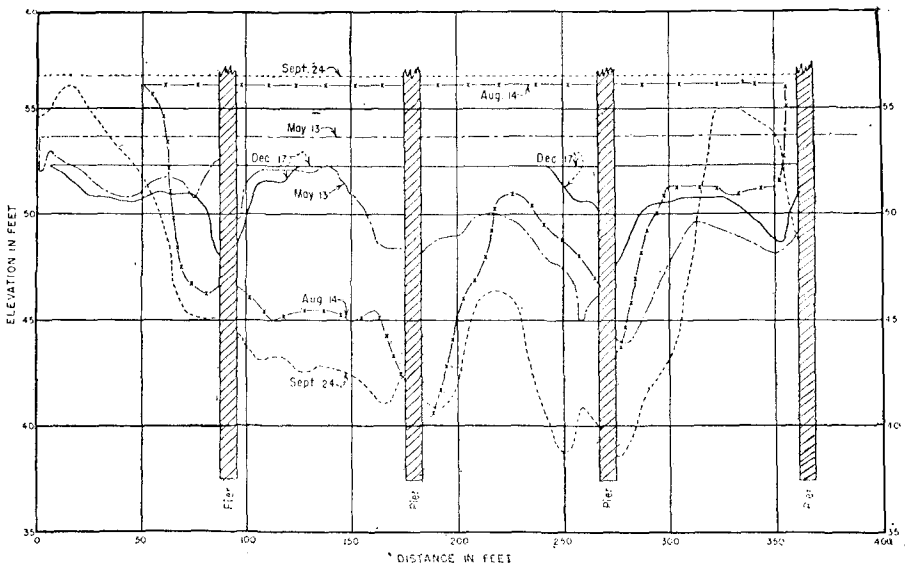


図-4 Rio Grande 河の河床変動 (New Mexico 州, San Marcial 1929年)

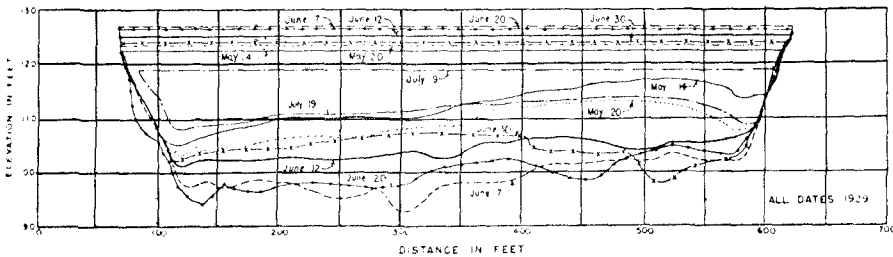
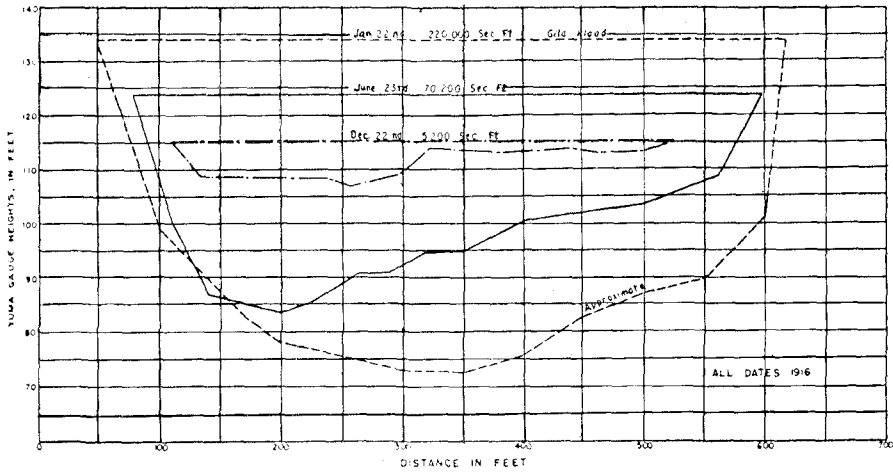
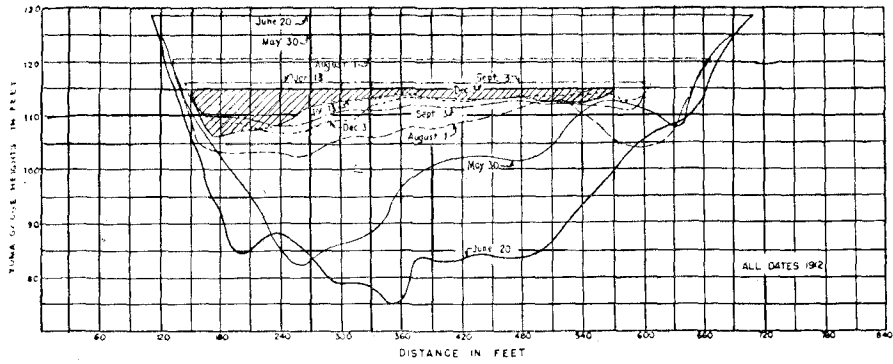


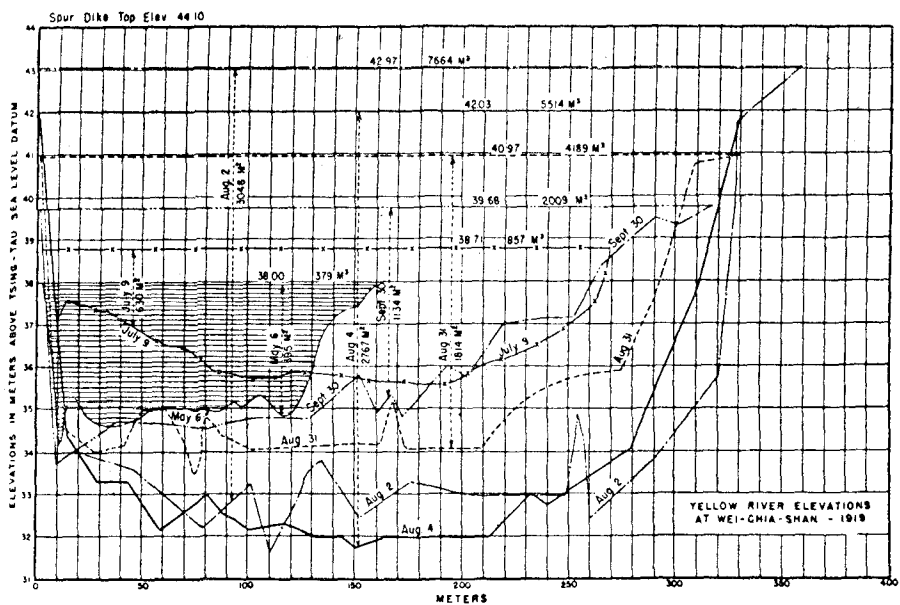
図-5 Colorado 河の河床変動 (Arizona 州の Yuma)

ミシッピ川における例*を示す。Carey と Keller はこの図から次のことを結論している。(1) Sand wave は一般に河床上で Systematic に生じ、流量変化に対応して変化する。(2) Sand wave は流量の増加に伴ない大きくなり、流量の減少とともに小さくなる。(3) Sand wave の変化には時間的おくれがあり、連続的に水位上昇する河川では wave はそれがその時の流量に対応してあるべきものより若干小さく、水位低下している場合はそれがあるべきものより若干大きい。(4) Sand wave は流れの抵抗の大部分の要素となっている。

(3) RI を用いた密度計による方法

図-8に示すような密度計を用い、河床変動を測定しようとする地点にあらかじめ立てておいたパイプの中を密度計を上下させ、パイプの周辺の密度を測定して河床位置を推定する方法であり、比較的精度よく測定する

* W.C. Carey and M.D. Keller: Systematic changes in the beds of alluvial rivers. Proc. A.S. C.E., 1957.



NOTE - That while in flood, the discharge increases 16 times over that in the dry season, the velocity is only doubled.

The enlargement of channel-way by scour, etc., keeps it down to 2.0 meters or about 7.0 feet per second.

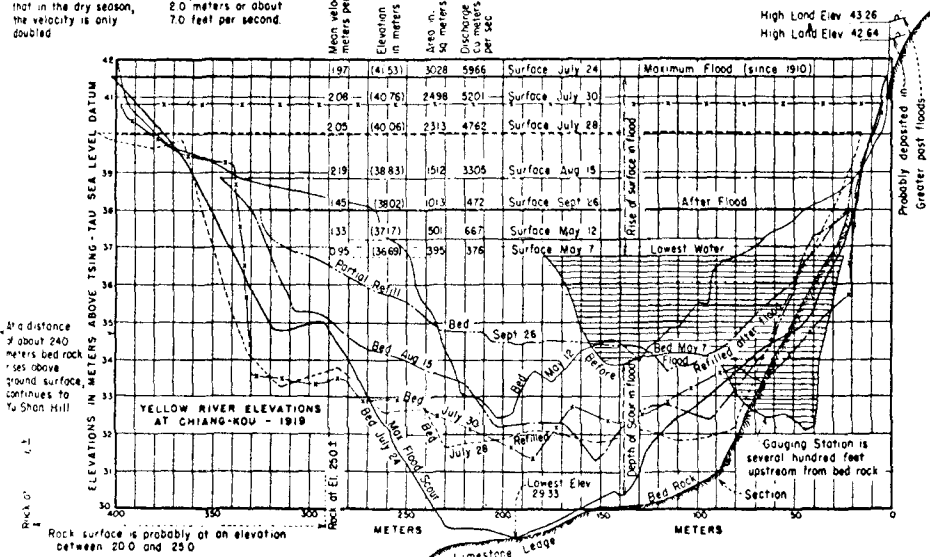
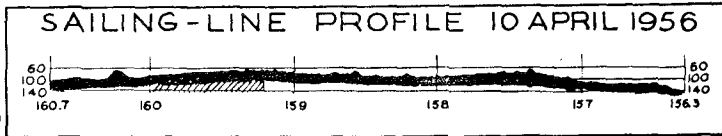
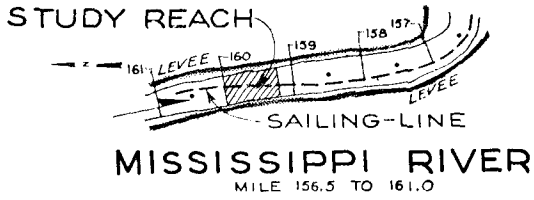


図-6 黄河の河床変動 (Wei-Chia-Shan と Chiang-Kou)

ことができるが、河水中に立てたパイプによる局所洗掘がある程度あると考えられるので、全体の河床の変動そのものを表わすかどうか疑問がある。ただし、護岸あるいは橋脚など構造物の周囲の局所的洗掘を知るには、構造物中に直接パイプを設けておけば便利に測ることができる。

図-9, 10に利根川栗橋地先で有泉博士*らが測定した平水時と洪水時の測定結果を示す。洪水時(6月30日, 0時32分流量が最大となり $Q_{max} = 3998 \text{ m}^3/\text{s}$ であった)にはこの点では約3m洗掘され、減水とともに次第に埋め戻されていることが認められる。また埋め戻された土砂は密度が小さいことが知られ、その後時間の経過とともに普通の状態の河床砂礫の密度に帰っていくことが知られた。

*有泉 昌, 近藤 紀, 森 芳徳: RI を装備した密度計による河床洗掘調査, 建設省直轄技術研究報告, 第15回。



Depths: Feet Below W.S.

SAND WAVE SYSTEMS

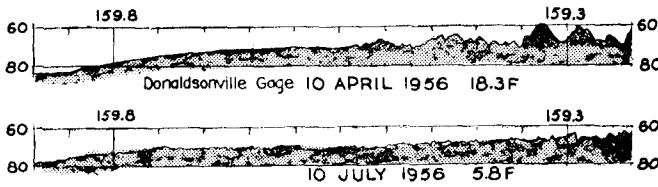
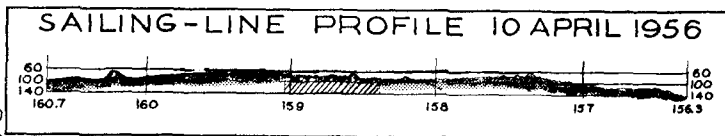
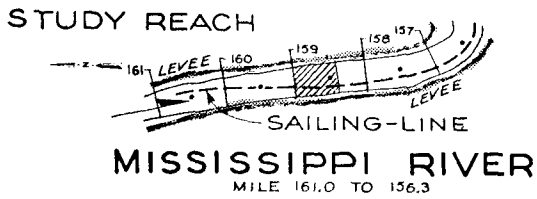


図-7-1 Mississippi 河の河床変動



Depths: Feet Below W.S.

SAND WAVE SYSTEMS

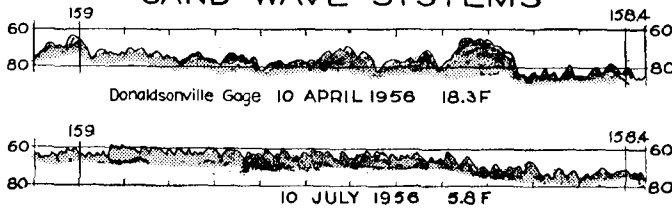
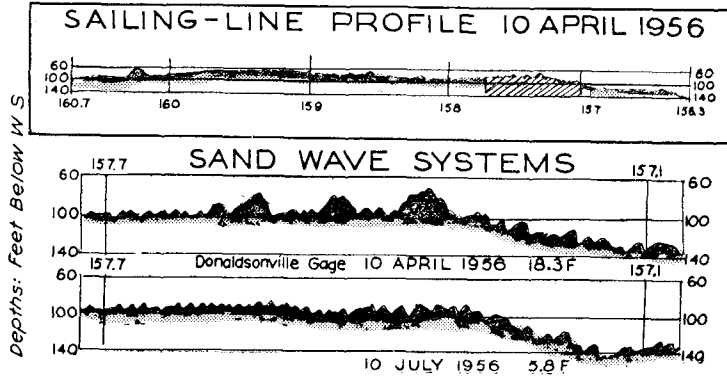


図-7-2

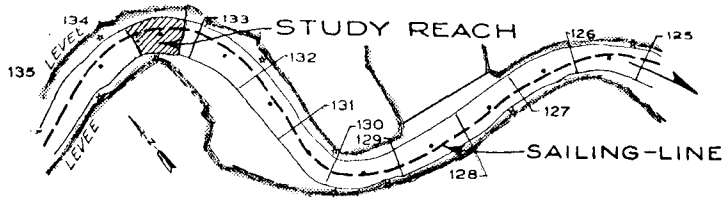
STUDY REACH



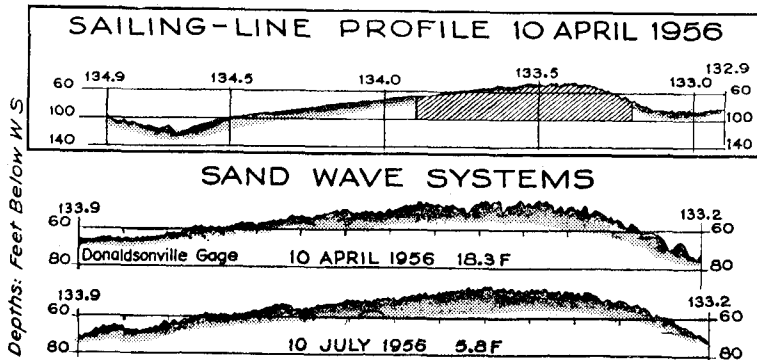
MISSISSIPPI RIVER
MILE 161.0 TO 156.3



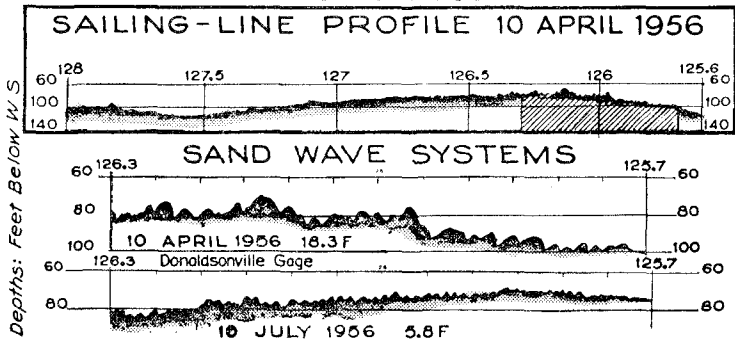
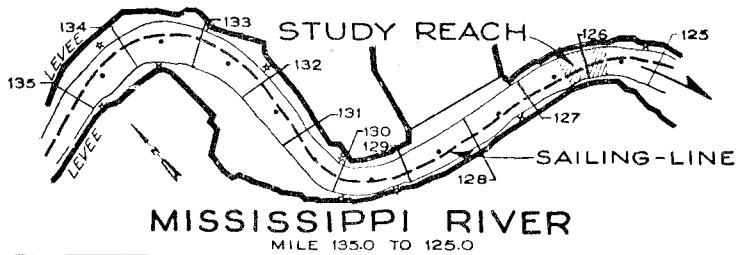
☒ - 7 - 3



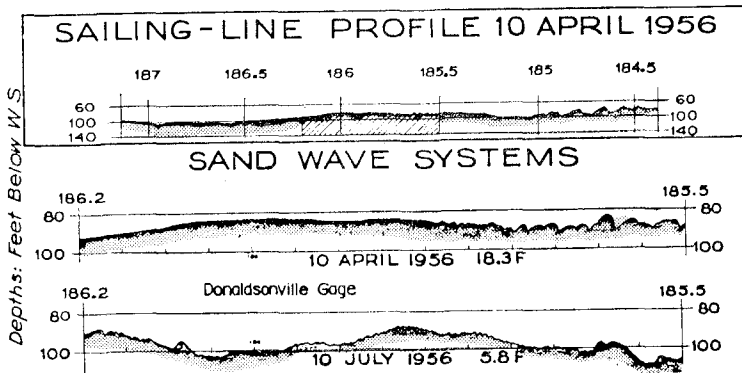
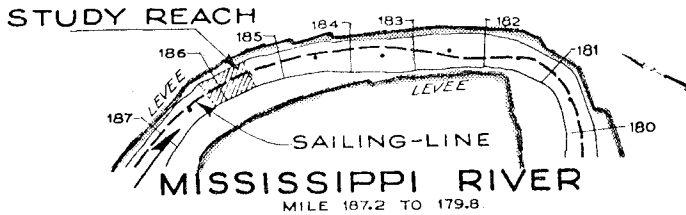
MISSISSIPPI RIVER
MILE 135.0 TO 125.0



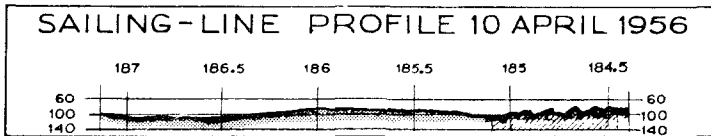
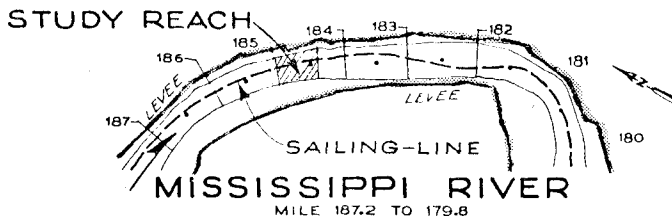
☒ - 7 - 4



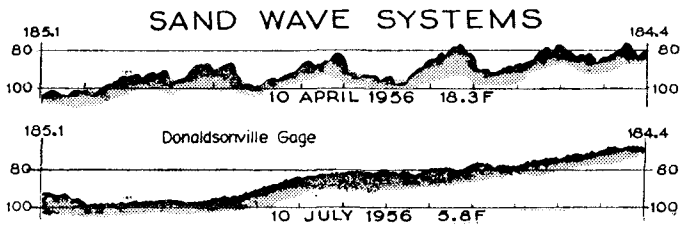
☒ - 7 - 5



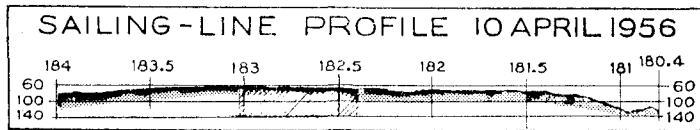
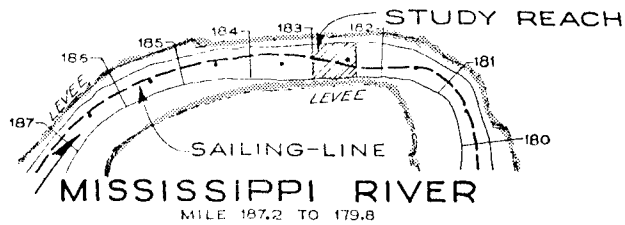
☒ - 7 - 6



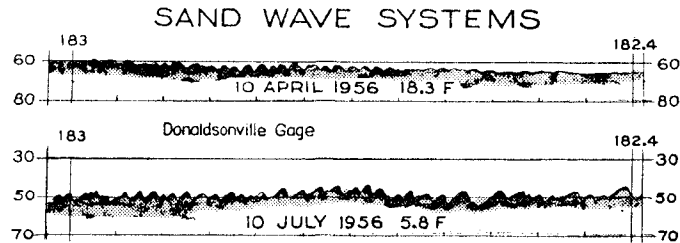
Depths: Feet Below W.S.



☒ -7-7



Depths: Feet Below W.S.



☒ -7-8

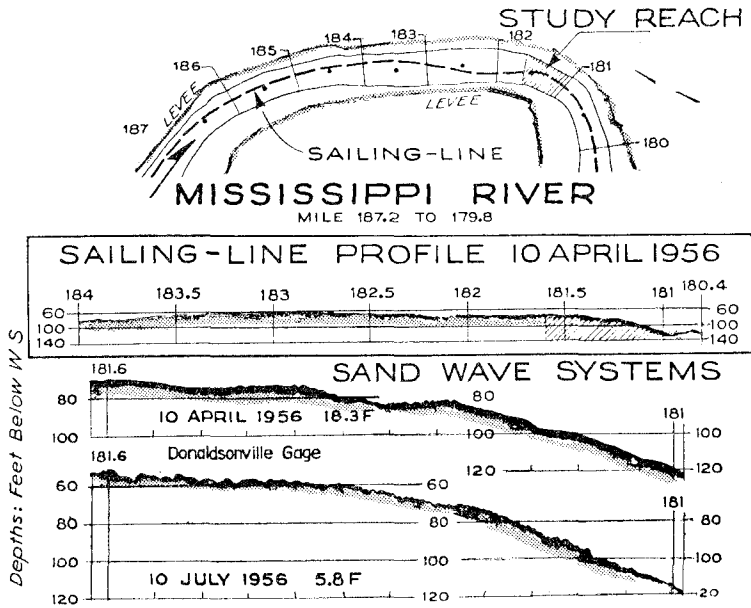


図-7-9

(4) 洪水時最大洗掘深を測る方法

このためには洪水前にあらかじめ河床に鉄棒を立て、それに輪を通して河床が洗掘されるにつれ輪が下がるようにして最も深く掘れた高さを洪水後測る方法が採られている。この方法も鉄棒のための局所洗掘の影響を受けるものと思われるが、簡便なので比較的多く使われている。

また洪水前に河床に孔を掘り、これに木炭粉などを入れておいて、洪水後掘りおこして調べる方法や、河床のいろいろな深さの所にレンガなどを入れておいて、洪水後流されたもの、残ったものを調べて最大洗掘深を推定する方法などがとられている。図-11に伊藤 剛氏*が利根川において径約10 cmの竹を立て鉄環をはめて、洪水時の洗掘深を測定した例を示す。

3. 流送土砂

前節において述べたように、われわれは記録をもっている範囲の過去の河床変化状況を知ることができるが、さらに将来の変化の推定をすることが必要となる。従来は過去の変化状況から環境条件の変化を加味して、将来の予測をして計画が樹てられてきた。このことは長年にわたり河川がその河道を流れ、河道がほぼ安定しており、改修工事その他で境界条件を変えることがあまり著しくなかったため、大部分の計画はほぼ成功してきたものと思われる。近年になり大ダムが築造され、また分水路、提水路などの大規模の工事が行なわれるようになり、また砂防工事も進捗してきたため大幅に境界条件が変化し、過去の記録および定性的な類推からだけでは河床変動を予測することが甚しく困難となった。このような河床変動の予測には流送土砂の運動および連続条件を水流の条件と同時に考えていかねばならない。このために流送土砂量について定量的に知る必要があるであり、また上流よりの土砂の

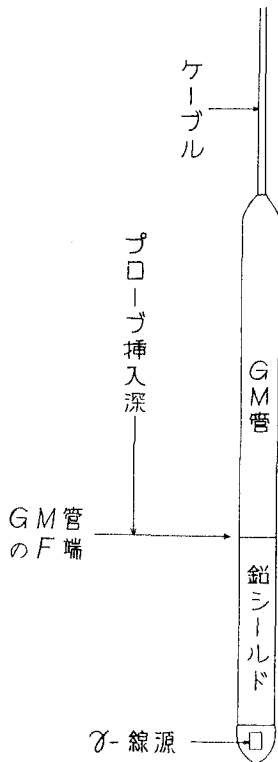


図-8 密度計

*伊藤 剛：利根川の水利，土木学会誌，20 卷 12 号，昭和 9 年 12 月。

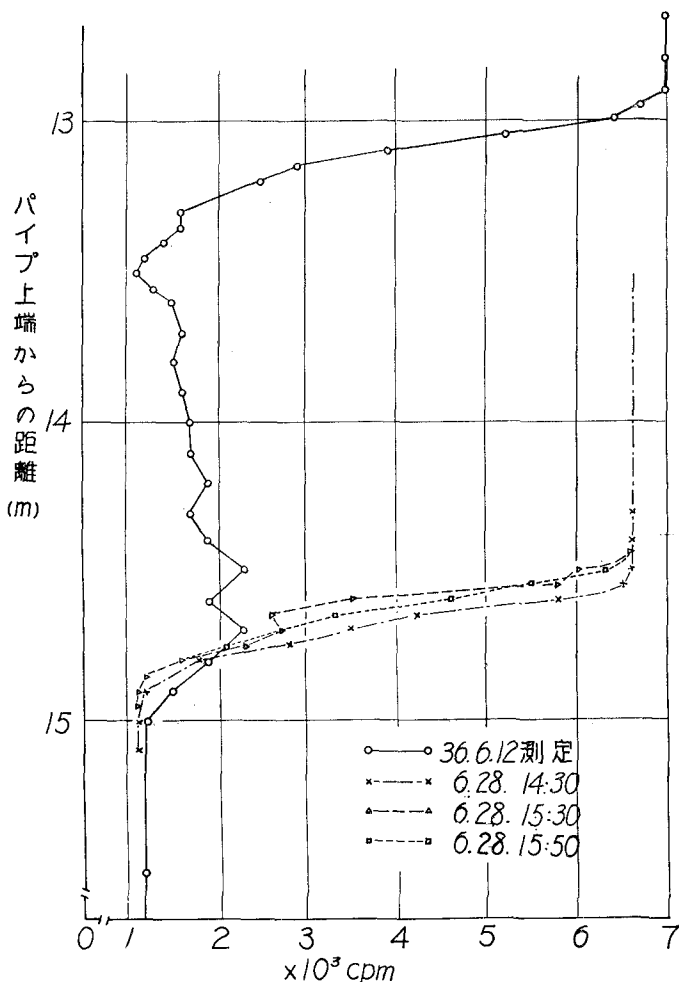


図-9 利根川河床洗掘測定結果 (1961.6.28~7.20)

ということで河道全体としてどのようなか判断されるわけであるけれども、河川延長の各所においても同様のことが考えられる。

いま河川のある小区間をとって考えると、その区間の上流端から運びこまれる土砂量が、その区間の下流端の流水の土砂運搬能力以下のときは、流水は不足分をその区間内の河床材料からとり上げて、能力だけの土砂を下流に運び去り、したがってその区間では河床は洗掘されることになり、逆の場合には河床に堆積することになる。したがって、河川の全延長にわたって各地点の洗掘、堆積はこのような流送土砂の連続性の条件を調べることによって判断することができる。

E.W. Lane* は河川を形態学的に研究して、次のような関係を得た。すなわち、平衡状態にある河川においては

$$Q_s d \sim Q_w I$$

の関係式が成立する。

ここに、 Q_s は流送土砂量、 d は土砂の粒径、 Q_w は流量、 I は河川こう配である。この関係式は平衡であるための各要素の間の関係を正確な数学的表現で表わしたものではないが、いずれかの要素に変化を生じた場合に

* E.W. Lane: The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering, Proc. A.S.C.E.

補給量を調べておくことが必要である。

上流山地の崩壊、浸食が多ければ、河川への補給土砂が多くなり、全体として河道に堆積し、河床は上昇することになり、逆に補給土砂が少ないと河床は低下すると考えられる。ここに補給土砂が多いとか少ないとかいう言葉を使ったけれども、この意味は不明確であり、この点について考えてみる必要がある。

流水は流速を増せば河床の砂礫を移動させる。洪水時には多量の土砂を掃流および浮遊状態において運搬する。

このように流水は河床構成材料を運搬する働きをもっているから、上流から補給される土砂以上に、下流の流水の土砂運搬能力があれば、流水は河床にある土砂を下流に運び去って、河床は低下することになり、また逆に下流の土砂運搬能力よりも補給土砂が多ければ、その差額分だけは河床に堆積することになる。したがって、補給土砂が多いとか少ないとかいうことは、下流における流水の土砂運搬能力との比較ということになる。河川全体からみれば、このように上流からの補給土砂量と下流の土砂の運搬能力とのバランスと

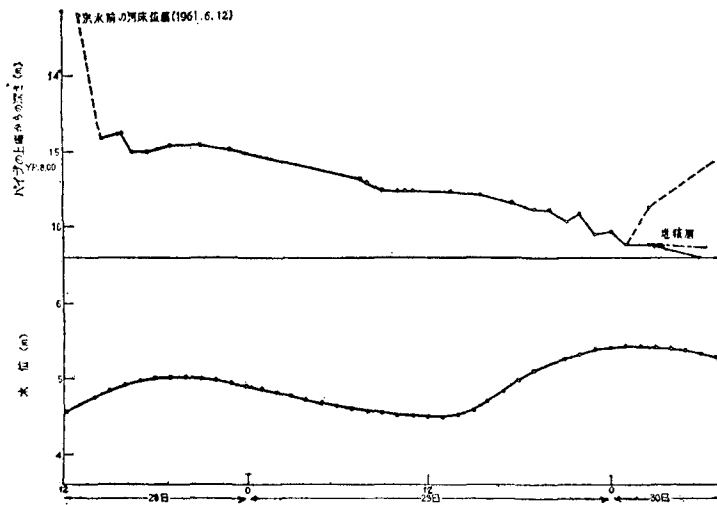
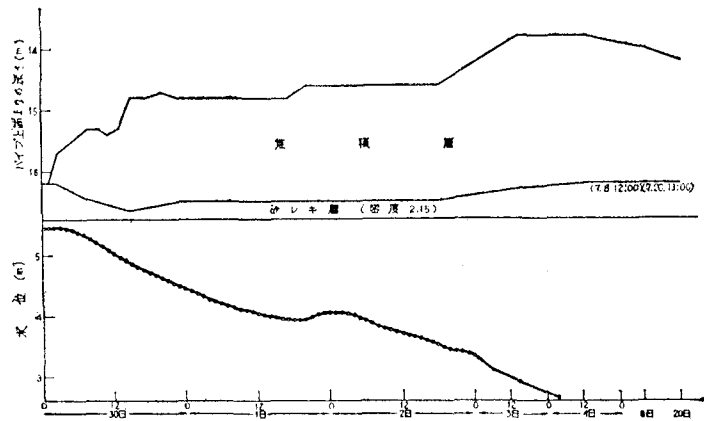


図-10 利根川の水位および河床高測定結果 (1961.6.28~7.30)

河川においてどのような変化がおこるかを定性的に知るには便利である。例えば、ある流砂量を持つ河川が平衡状態にある場合に、もしなんらかの原因で流砂量が減少すれば、流量あるいはこう配が減少するか、土砂の粒径が増大するならば平衡状態を回復する。この式の中で流送土砂量 Q_s は bed material load について考える必要がある。

Lane は上の関係式を用いて河川において生ずる種々の河床変動を説明している。しかし、この方法では定量的に知ることはむずかしいので、流域からの流出土砂量を推定し、河道における流送土砂量を定量的に把握して、定量的に河床変動を予測するようにするのが、最良の方策と考えられる。

近年流送土砂量に関して、研究が盛んに行なわれ、現在の段階では精度よく推定するには十分とはいえないが、ほぼ定量的に推測することができるようになり、したがって河床変動をある程度まで定量的に予測し得るようになってきた。

流送土砂は便宜的に浮流土砂と掃流土砂とに分けられ、それぞれについて数多くの実験、現地観測が行なわれ、数多くの流砂量公式が作られているが、未だ十分信頼するに足るものはないようである。しかし、これらの

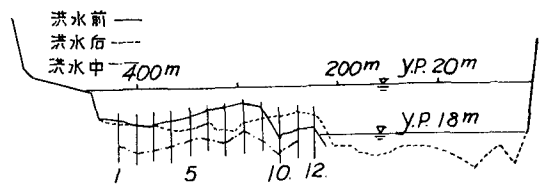


図-11 川俣地先(利根川)洪水前後河床変化図

公式から導かれる流送土砂の性質、および現地測定の結果からみて、現段階では現地河川への適用は大体において可能と考えられる。河床変動の問題を取り扱うに当たってはさらに精度を高めることが必要であり、また従来の公式では、二次元的取り扱いでは、ほぼ妥当と考えられるが、三次元的取り扱いを必要とする場合、および流れの方向に水理量あるいは河床砂礫の変化するものについては今後一層の研究が望まれる。

以上述べたように、流送土砂量については、概略値を得るには諸公式によることができるが、できるならばそれぞれの河川で実測により確めて使用されることが望ましい。流送土砂量の実測は甚だ困難であるが、次に述べるような方法が普通とられている。

浮流土砂については採水により測られる depth integral 方式と point integral 方法とがあるが、depth integral 方式では土砂含有濃度分布に仮定が必要となるので、point integral 方式の方がよい。この場合採水時間について考慮する必要がある。採水時間の決め方としてはできるだけ長い方がよいが、一応の目安として次のように考えることができよう。

水平、鉛直方向の変動速度をそれぞれ u' 、 v' とすれば

$$\left| \frac{u'v'}{u'^2} \right| = 0.2 \sim 0.3$$

の程度と考えられる。

一方、 $\tau = -\rho u'v' = \rho l^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2$ であるから

$$(0.2 \sim 0.3) u'^2 = l^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2$$

いま、 $\overline{u'^2}$ と v'^2 とが同程度の値であると考えれば

$$\sqrt{\overline{v'^2}} = \frac{l}{\sqrt{0.2 \sim 0.3}} \frac{du}{dy}$$

混合するに要する時間は平均的にみて

$$t = \frac{l}{\sqrt{\overline{v'^2}}} = \sqrt{0.2 \sim 0.3} \frac{du}{dy} \approx 0.5 \frac{du}{dy}$$

の程度であり、渦の平均 1 波長 L は

$$L = u \cdot t = \sqrt{0.2 \sim 0.3} u \frac{du}{dy} \approx 0.5u \frac{du}{dy}$$

の程度であると考えられる。

また、 $\frac{du}{dy} = \frac{u_*}{\kappa y}$ であるから

$$t \approx 0.5\kappa y \frac{1}{u_*}, \quad L \approx 0.5\kappa y \frac{u}{u_*}$$

と考えられるので、少なくとも 1 波長以上の採水が必要である。大略の見当を得るために、いま、仮りに $\kappa = 0.4$ 、 $y = 5.0$ m、 $u = 2.0$ m/s、 $u_* = 0.1$ m/s とすれば

$$t \approx 10 \text{ sec}, \quad L \approx 20 \text{ m}$$

となる。われわれが利根川下流部で、乱れを測定し、 L の値を推算した例では $L \approx 10$ m であった。

また浮流公式により計算する場合に底面より a なる高さの点の濃度 (C_a) が最も問題になるが、利根川布川において観測された結果では C_a は掃流土砂を基準として考えてよいようである。Einstein はこのような考えでまず掃流土砂を計算し、それを使って浮流土砂を計算する方法を提案している。

掃流土砂量の測定は、浮流の場合より一層困難であるが、次に述べるような方法がある。

1. 河床より水流と同じ速度でパイプで水を引く。
2. 河床に筒を設け、これに流入するものを測る。
3. 全流砂を阻柱などの攪乱装置により全断面一様濃度になるようにして採水する。
4. 掃流砂採取器による。

5. 砂堆の移動速度および規模より求める。
6. 着色砂礫または RI をつけた砂礫の移動を測る。
7. 貯水池の堆砂あるいは導水路への切換えによる。

以上のような方法で測定することができるが、掃流砂は河床全面に一様ではないので測定には注意を要する。

4. 安定河道

河道の設計に当っては、従来は単に計画高水流量を流下させることのみ主眼がおかれ、河道の維持などの観点から経済的に設計するということが、経験的事実にもとづいて若干の考慮が払われたのみで、ほとんど合理的に設計されてこなかった。沖、洪積地河川においては河幅、水深およびこう配自体が変数であるということが明瞭に認識されるようになって、河道をさらに合理的に設計するためには水と同時に流送される土砂についても考慮する必要がでてきた。

流水と流砂とを同時に考えて安定河道を設計していくのに現在では2つの考え方がある。1つは Regime theory と呼ばれるもので、安定な河道ではたとえば流量と河幅あるいは水深などとの間に一定の関係があるとして、これらの関係を実測資料から求めておこうとする方法* で、実用上は非常に便利であるが、理論的裏付けが乏しいので、これらの関係を求めることがむずかしいとともに、一般的に使うには具合が悪い。他の1つは流砂量理論を用いる方法であり、理論的な関係を求めるのには多少のむずかしさが伴うけれども、安定河道を合理的に求めることができる利点がある。ここでは後者の考え方にたって述べることにする。

河道を設計するにあたっては、まず所定の流量を安全に流しうる断面を考えなければならないが、それと同時にその河道が安定したものでなければならない。安定した河道とは流砂の点から見て河床が平衡状態にあるものをいう。流水によって河床がまったく動かないために洗掘も堆積も起らないような河道は、通常の河川には存在しない。したがって、われわれは動的平衡状態にある河道をもって安定河道としなければならない。

動的平衡状態にある河道とは、ある区間だけ上下流に離れた2断面において、上流断面からこの区間に流入してくる流砂量が、下流断面を通りこの区間から出ていく流砂量に等しくなり、河川のどの区間でもこのような河道をいう。

また安定河道であるためには、河道法線が適切であることも必要である。河川流路は一般に曲りくねっている。

この現象を蛇行 (meander) といい、自然の蛇行の法則にさからった河道法線を定めるならば、思わぬ所に水当りを生じ、堤防欠潰の危険を生ずることになるし、また河道断面内に偏流を生じ、一部に思わざる堆積を生ずることになる。

蛇行現象については古くから調査がおこなわれ、その原因や法則に関していろいろと考察されているけれども、現在のところ確定した理論はほとんど見当たらないようである。

W. E. S. でおこなわれた一連の実験結果**によると、最初まっすぐな水路は流れを偏向させる何らかの力が加わらないかぎり、まっすぐのままであり、時間が経っても蛇行現象が現れないことがわかった。すなわち、蛇行を始めるためには偏流を必要とし、それによって蛇行が下流につきつぎとほぼ正弦曲線として発達していくことがわかる。また蛇行現象の性質として知られたことは、(1) 流量の大小が蛇行規模に関係し、流量が多いほど曲りがはげしくなる。(2) 河床こう配が大きいくほど、蛇行の波長や振幅が増大する。(3) 最初の偏向流の突きあたる角度が大きいくほど蛇行が大きくなる。(4) 流送土砂が多いほど、急速に蛇行が発達し、その規模も大きくなる。

また木下良作博士はわが国の種々の河川について調べ、蛇行と砂堆との間に密接な関係があることを知った。蛇行について数量的に表わすことに努力されているが、未だ十分ではない。次にその主なものを示すが、統計的なものであり、どこでも使えるという訳にはいかないので注意する必要がある。

*例えば T. Blench: Regime behaviour of canals and rivers, London Butterworths Scientific Publication, 1957.

** Friedkin, J. F.: A laboratory of the meandering of alluvial rivers, U.S. Waterways Experiment Station, 1945.

| Rivers in flood plains | Incised river | Ref. |
|--|--|-------------------------------------|
| $M_t = 6.6W^{0.99} = 6.06W$ $M_b = 18.65W^{0.99} = 17.38W$ $M_b = 1.7M_t^{1.06} = 2.86M_t$ | $M_t = 2.06W^{1.27} = 11.45W$ $M_b = 21.4W^{1.94} = 27.3W$ $M_b = 1.19M_t^{1.97} = 2.2M_t$ | C.C. Inglis (1939-40) |
| $W = 4.88Q^{1/2}$ $M_t = 6.46W = 29.6Q^{1/2}$ $M_b = 57.8Q^{0.54} = 84.7Q^{1/2}$ | $W = 5.12Q^{0.42} = 2.5Q^{1/2}$ $M_t = 17.8Q^{0.53} = 25.4Q^{1/2}$ $M_b = 294Q^{0.38} = 56.4Q^{1/2}$ | Ferguson (1863) Ganges 河 |
| $M_b = 10.9W^{1.94} = 14W$ | $M_b = 264W$ | R.A. Bates (1939) |
| $M_t = 27.4Q^{1/2} \pm 14.33$ | | J. Shaw (1938-39) |
| $M_t = 36.4Q^{1/2}$ $M_b = 16.0Q^{1/2}$ | | C.C. Inglis (1942) by experiment |

5. 安定河道の設計

安定な河道を設計するには、普通次の諸点について考える必要がある。

- (1) 河道断面は計画高水流量を安全に流し得るものでなければならない。
- (2) 河床の安定は掃流砂と浮流砂とによって支配されるものと思われるので、河川の各断面で両者による流砂運搬量を等しくすることが必要である。
- (3) 掃流および浮流による流砂量は河川の流量によって変化するから、流送土砂計画の基準としては、数種の流量、たとえば計画高水流量、中洪水流量、小洪水流量、最多頻度流量および平水流量などについて、それぞれ流砂量が各断面において等しくなるようにする。あるいは流砂量と水理量との関係が分っている場合には、水理量の年間頻度から流砂量の年間頻度を求めることができるから*、これから年平均流砂量に対応する水理量を求め、これと年間の最大頻度を示す流砂量に対応する水理量などについて検討する。
- (4) 掃流および浮流による流砂量は現地調査、または理論式により各断面において求められるようにしておくことが必要である。
- (5) 上流山地よりの供給土砂量、河川内の土砂採取量などについて将来の変化状況を推察しておくことが必要である。
- (6) 計画高水位を高めることは一般に好ましくないで、なるべく計画高水位があがらないようにする。
- (7) 計画河床高は護岸などの維持に困難が生じないかぎりできるだけ低くすることが望ましい。内水を容易に排水するためには、河床高の低いことがよいし、また前項の高水位を低くすることにも役立つ。
- (8) 低水路および高水敷はともに、平面的にも縦断的にも上、下流断面と連続的になるようにすることが維持上望ましい。また種々の流量についてのその河川の蛇行法則を知つて、法線を計画することが望ましい。
- (9) なるべく現況をあまり変化させないことが、河床の安定に対して有利だと思われるので、この点を考慮して設計すべきである。

安定河道の設計の手続としては次のようにするのが適当と考えられる。

- (1) 河道の各区間の粗度係数（または k_s ）の値を決定する。
- (2) 前述のようにして定められた数種類の流量について現況河道における各点の水位を不等流計算により求め、その結果を用いて各断面の流砂量を計算する。あるいは各断面の平均年間総流送土砂量を計算する。
- (3) 前項で求めた結果を参照し、上流よりの補給土砂量を考慮して、その河川の計画流砂量を決定する。この場合今後の貯水池計画、砂防計画、土砂採取量などを考慮しなければならないし、また河道の土砂流送能力が

*例えば Schaffernak の方法がある、Schaffernak: Flussmorphologie und Flussbau, Vienna, Springer Verlag, 1950.

上流よりの供給土砂量より小さい場合には砂防工事などで土砂の流出を抑制することも考えてみなければならない。計画流砂量の決定は河道改修工事，砂防工事の規模に関係するから，流域の特性，土地利用状況などを考慮して，経済的に有利なように決められなければならない。この場合，平均年間総流砂量を設計基準流砂量として決めることができるし，または，前述した数種の流量についてそれぞれ計画流砂量をきめることもできる。

- (4) 計画流砂量と(2)で計算された結果とを比較して，洗掘および堆積の区域を求める。
- (5) 平水流量または年数回程度の洪水流量などを参考として現在の低水路の状態を検討して低水路断面を決定し，前項の洗掘および堆積の状況を参照して，一応の河道断面を仮定する。低水路は河川によって違うけれども，平水流量または年数回程度の出水に対して安定なものでなければならない。
- (6) 仮定された断面について，計画高水流量，支配的な洪水流量，最多頻度流量，平水流量などについて不等流計算を行なう。
- (7) それぞれの流量に対して不等流計算で求められた水理量を用い，河床材料調査資料をあわせ用いて，各断面の掃流砂量，浮流砂量を計算し，全流砂量を計算する。断面改修による河床材料の変化が予想されるときは，改修後の河床材料を適当な方法で推定しておくことが必要である。
- (8) 以上のようにして求めた各流量に対する断面ごとの流砂量がほぼ等しくなるまで，前述の操作を繰り返す。

このようにして対象とする各流量に対応する流砂量について，あるいは平均年間流砂量について，各断面とも等しくすることができれば，この計画河道は安定したものであるということが出来る。わが国の河川では洪水流量と平水流量との比が大きいため，一般に低水路を設けて，低水路断面では平水量あるいは小洪水流量を流すようにし，低水路断面を流砂に対して安定ならしめるよう計画されることが望ましい。

以上のような方法で安定河道を設計することができるが，従来の経験から見て，上流よりのあるいは支川よりの供給土砂量の推定が非常に困難なこと，および河川縦断的にみてもある場所では wash load であったものが，他の場合では，浮流土砂になるなど流送機構の変化が生ずるために従来の知識では計算ができなくなるようなことなどのむずかしい未解決の問題が沢山ある。

これらの点については，今後大いに研究されることが望まれる。

6. 貯水池内の堆砂

河床変動の重要な問題の一つとして，ダムなどを築造して河道に貯水池を設けた場合，貯水池内の堆砂がある。

これは貯水池の寿命にも関連する問題であるが，貯水池内に堆砂することにより，貯水池上流の河道が上昇し，水位上昇が生じている場合があり，貯水池を設ける場合に将来の予測をすることが必要となっている。

この場合の考え方も前述した安定河道の計算と同じであるが，次に A. S. Harrison* の示したダム築造後の貯水池内堆砂状況の計算手続を述べる。

- (1) 流量，貯水池水位および河床縦断形状それぞれの最初の値を求める。
- (2) 背水計算により最初の水面形を求める。
- (3) 背水の影響を受ける河道区間の流送土砂量の距離的变化率を算出する。
- (4) 短い時間間隔 Δt をとり，この時間内では流送土砂量は一定で，その時間の最初の時の値と同じであると仮定する。（すなわち，このような仮定が満足されるよう Δt を定めなければならないことを示す）。

$$(5) \quad \Delta h = \frac{1}{b\gamma_s} \cdot \frac{\Delta Q_s}{\Delta l} \cdot \Delta t$$

ここに Δh : 河床変動量， b : 堆積巾， γ_s : 堆積土砂の単位重量， ΔQ_s : 上，下流断面の流送土砂量の差， Δl : 上下流断面間の距離，

から Δt 時間内の堆砂高を計算する。

*A.S. Harrison: Deposition at the head of reservoirs, Proc. of the Fifth Hydraulic Conference, State Univ. of Iowa, June, 1952.

- (6) (1) で求めた原河床高に(5)の堆砂高を加えれば、 Δt 時間後の河床高が求まる。
 (7) 次の時間間隔 Δt の初めの貯水位および流量と定め、(2)から(6)までの操作を繰り返す。
 (8) 上述の操作を繰り返して所要の時間まで計算すればよい。

以上の計算において、デルタの先端に多量の土砂が堆積される場合が多い。実際には流水が先に押しやるのであるが、これをどのように計算すればよいかは、その運動機構が明らかでないので、不明である。現在では既設の貯水池の実例を調べて、前面法こう配を決めたり、水中の安息角で定めたりして計算している。また、計算において、計算単位時間が長すぎると、堆積しすぎるので注意を要する。ダムを設けた場合の終局的な堆砂形状については、前に述べた安定河道と同じく、動的な平衡河床を計算することにより求められる。しかし、普通の大ダムでは貯水容量に比し、流入土砂量が比較的少ないし、また流入土砂量は流量とともに非常に変動するので、平衡状態に達するには非常な長年月を要し、またどの状態が平衡であるか判定するのが困難である。

杉尾博士* は粒径が比較的大きい河川の上中流部において、河幅の変化が不規則で狭さく部と拡大部とを交互にもつ川の場合には、静的平衡河床を考える方が実用的であるとしている。すなわち各地点で限界掃流力になるような形状に河床がなると考える方が各地点で流砂量が等しくなるように河道がなると考えるよりも実用的であると考え、2つの貯水池にこの考えを適用して確めている。この場合に問題になることは、静的平衡条件に用いる流量であって、どの程度のもを対象として考えるべきであるかである。従来動的ならびに静的平衡河床形を大洪水流量を対象として計算すれば、計算された静的平衡河床形は当然現実の河床形よりはるかに緩こう配のものとなるはずである。杉尾博士は安芸博士と同様に、静的平衡を平衡河床を取り扱う基本的な考えとし、流量としては大洪水よりかなり小さい、いわゆる平衡河床支配流量 Q_n をとることとした結果、実測値とかなり適合することを知った。すなわち、ある区間内の河床が流量 Q_n の下で同時に限界掃流力状態になると考えて静的平衡河床を決定するのである。この場合支配流量 Q_n は杉尾博士の研究によれば、大体年最大流量の最小値にかなり近い値であることが知られた。

以上の研究によって、ダム上流部のように河幅変化の複雑な場合の堆砂形状がほぼ推定できるし、また、狭さく部や拡幅部の多い区域では移動限界水深を求めることにより、堆積、洗掘などの局部的河床変動の程度を推定することが可能と思われる。

しかし、著者も指摘しておられるように、ダム築造などのために河道に生ずる河床砂礫の変化の予測が必要であるし、また、支配流量を決定するために用いられた実例が堆砂のどのような段階にあるかに問題があり、われわれが知ろうとする堆砂形状の段階との関連を明らかにするためさらに研究を要すると考えられる。

最近、村野博士**は砂防ダム堆砂形状について実例を調べ、また実験的研究を行なって興味ある結果を得ているので紹介する。この結論中には種々の問題点もあるが、ダム堆砂および河床変動に関して示唆する所が多いと考えられる。

47 の既設の砂防ダムについて調べたところ、堆砂面は大体の傾向としては逐次上昇していくが、あるものは上、下に変動しいずれの場合も堆砂面の縦断形は二次曲線として表わされることがわかった。

すなわち

$$y = ax + bx^2$$

ここに y : ダムから x の距離における堆砂面のダム水通し天端から測った高さ、 a, b : 係数である。

実測値から a, b の間の関係を調べると、図-12 に例示するように

$$b = m - na$$

の関係がある。ただし m, n は係数である。

このように係数 a, b の間に直線的関係があることは、ダム上流に一定点が存在し、すべての堆砂曲線はこの定点とダム天端とを通ることを示しており、堆砂曲線は $y = box^2$ と $y = a_0x$ との2本の線の間で昇降していることを示している。堆砂面は常に上、下に変動を繰り返しているが、1つのダムについて何回か時間をおいて測量した縦断曲線を表わす式の a, b の間に直線的な関係があるとすれば、これから求められる a_0, b_0 は堆砂面の変動に関係

*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38.5

**村野義郎，泉 岩男，福家俊一，関口 明：砂防ダム堆砂面の縦断形について，土木技術資料，6巻5号，昭39.5

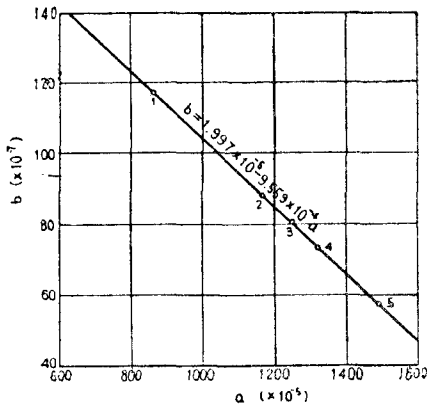


図-12 a, b の関係 (音田ダム)

なく、それぞれのダムに特有な値として取り扱うことができる。村野博士らは資料から a_0, b_0 の値を支配する因子として、流量や流出土砂量を代表するものとして流域面積 F (km^2) と堆砂面の掃流力に対する抵抗力を代表するものとして砂礫の平

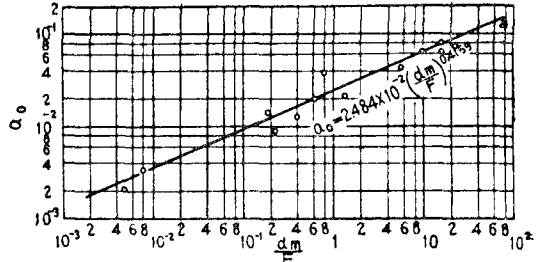


図-13 a_0 と d_m/F の関係

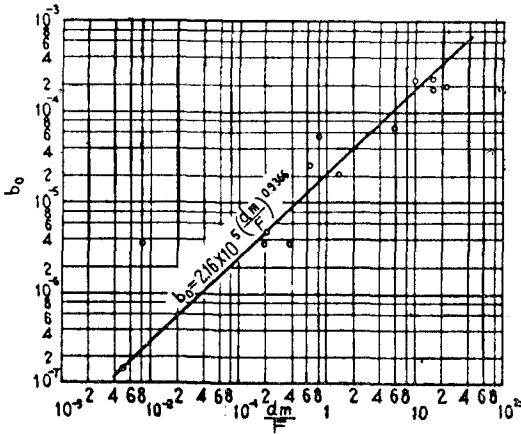


図-14 b_0 と a_m/F の関係

均粒径 d_m (mm) を選び、これらの関係を調べたところ、 $a_0 \sim \frac{d_m}{F}$, $b_0 \sim \frac{d_m}{F}$ について図-13, 14 に示すような関係を得た。

また村野博士らは幅 30 cm の等幅正方形断面水路を用い粒径 1.2~2.5 mm の砂を用いて実験を行ない、実物実測の場合と同じような結論を得た。この場合には一定流量を流し、一定土砂量が給砂されて

いるので図-15 に示すように逐次河床は上昇し、最後には動的平衡河床 (縦断的に直線) になっているが、前述したように堆砂面は2次曲線で表わされ、係数 a, b の間には直線関係が図-16 のようにある。また、 a_0, b_0 と Q_s/Q との関係は図-17, 18 に示すようになる。

実験によって得られた a_0 は、一定の流量、給砂量を長時間水路に流した結果、形成される堆砂面の値であるが、実測値の場合は、測定時期ごとに洪水流量、流送土砂量が異なるから、もし、 a_0 が堆砂面が動的安定こう配を表わすとすれば、同一のダムにおいても測定時期ごとに、 a_0 の値は異なるはずである。それにもかかわらず、それぞれのダムに特有の a_0 が得られたことはそれぞれのダムにおいて、数年間を通じて変動している堆砂面について、平均して取り扱える

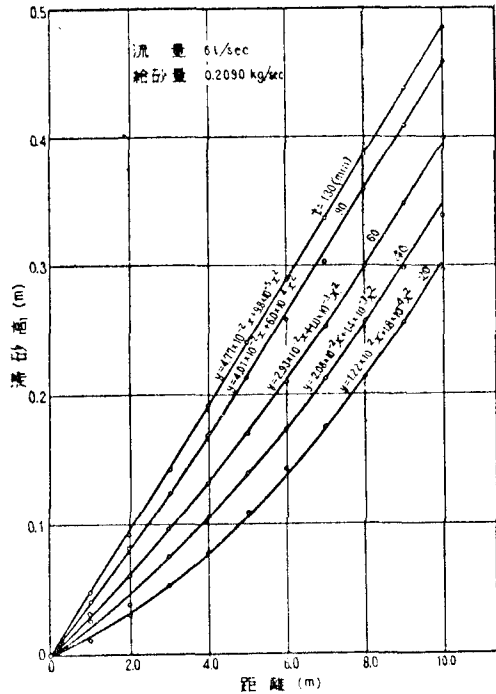


図-15 堆砂高の実験値

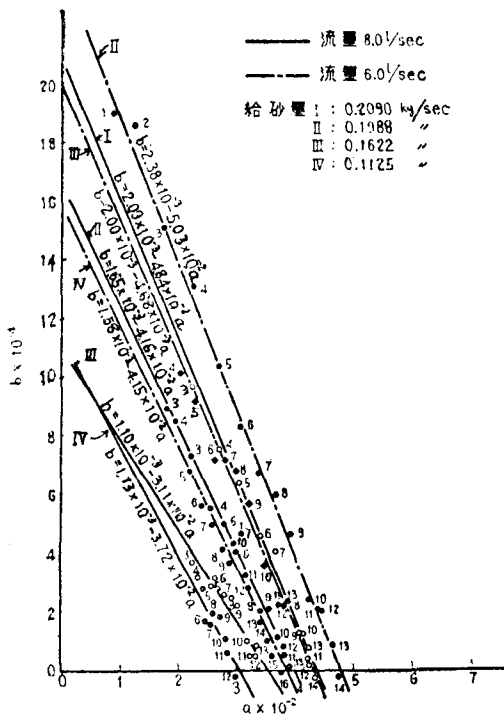


図-16 a と b との関係 (実験)

a_0 を決定する流量と流出土砂量が存在するように考えられる。

以上のことは砂防ダムの堆砂形状を主眼として調べられたが、一般河道の河床変動にもある程度応用して考えられるので、河床変動を考える場合の一助となると思われる。

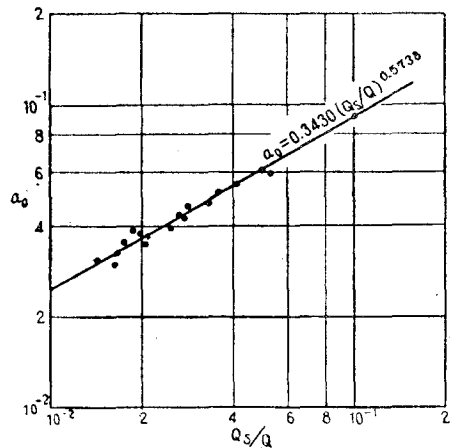


図-17 a_0 と Q_s/Q との関係

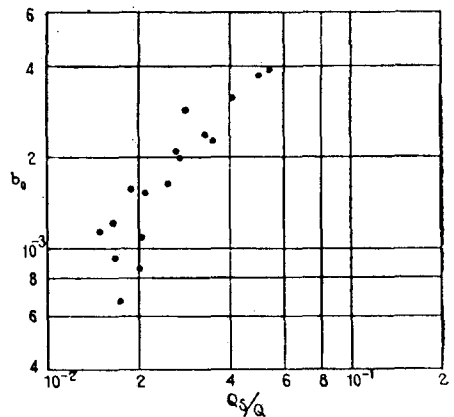


図-18 b_0 と Q_s/Q との関係

7. ダム下流の河床変動

ダムを築造した場合、前述したようにダム上流の堆砂が問題になるが、同時にダム下流に対しては上流に堆砂するため下流への補給土砂が著るしく減少または皆無になり、ダム下流部では河床低下が予想される。また下流改修を大幅に行なったとき(捷水路、断面拡大、放水路など)にも、下流の土砂流送能力が増大し、上流部よりの補給量あまり変わらない場合には、その直ぐ上流部において河床低下が起り、逐次低下が上流に遡及する。この例は例えば淀川下流部の改修により低水路において平均 約 1 m の河床低下をおこし、(図-2 参照)また荒川においても荒川放水路の完成により古谷本郷地点まで約 30 年かかって約 1~2 m 程度の河床低下が遡及している。このように河床低下が河川によっておこるが、これは護岸の根入の計画、取水計画などに対して重要であるので、ここではダム下流の河床低下を例としてその取り扱いについて述べてみる。

古くより、ダム築造後には直ぐ下流の河床低下が生じ、それが波状をなして下っていくことがいわれている。しかし、その低下量についてなかなか正確には予測し得ない段階にある。

安芸岐一博士* は庄川の小牧、祖山ダムの完成後の下流の河床変動について昭和 5 年ダム完成後昭和 7 年から 2 年ごとに観測した横断面図から求めた平均河床高を調べ 図-1 のような結果を得た。これによると、河床の洗掘、

*安芸岐一：河相論、岩波書店 p. 99.

堆積が順次下流に波状をなして移動することが認められる。また平均低水位の変化からも同様の結論を得、波の振幅としては約 50 cm 程度と推定される。

以上述べた 2, 3 の例からわかるように、河床低下の場合には案外平均河床としては低下量が小さいことが知られる。これにはダムなどによる流況の変化、支川からの土砂の流入、河岸欠潰による土砂補給などが考えられる、が最も大きな原因としては、細かい粒子がさきに洗い流され、河床表面の材料の粒度が次第に粗くなっていき、河床を洗掘から保護するようになることであると考えられる。

したがって河床低下については安定河道について説明したと同様な考え方によって予測することができるが、河床材料が次第に粗くなっていくことを考慮に入れなければならないであろう。このような考え方で E. W. Lane* は次のような方法で計算することを提案している。

流水により運ばれる河床材料はある限度の深さの材料であり、この厚さを彼は turn over zone と名付け、この zone 内の土砂の交換、あるいは取り出しを考へて計算する方法を考へた。この zone を決めるのに種々の河川の洪水中の河床変動の実例を調べたが、実河川では前に示したように洪水中には相当変動するが、下流に貯水池のある場合について調べてみたところ、(Rio Grande River では下流に Elephant Butte Reservoir があり、全ての流送土砂はここでとらえられる) この洗掘量は貯水池内に土砂が堆積していないことなどのために、彼は turn over zone を粗い材料では比較的小さく、細かい材料では比較的大きく、適宜にとって計算している (Rio Grande River の計算では turn over zone を 2 ft. から 7 ft. に場所により定めて計算している)。turn over zone については考へ方は合理的であるけれども、流量に関連してそれぞれの河道で数量的に決められるよう、今後の研究にまつべきであろう。砂澱の高さを考へることは掃流土砂の実験室での観測で合理的なように考へられるが、砂堆、砂澱の高さも現在では非常に困難である。

次に Lane の方法を順序を追って述べる。

MIDDLE RIO GRANDE DEGRADATION STUDIES

- 1st Stretch - Cochiti Diversion Dam to Angostura Diversion Dam
- 2nd Stretch - Angostura Dam to Atrisco Heading
- 3rd Stretch - Atrisco Heading to Isleta Diversion Dam.
- 4th Stretch - Isleta Dam to San Juan Heading.
- 5th Stretch - San Juan Heading to Rio Puerco.

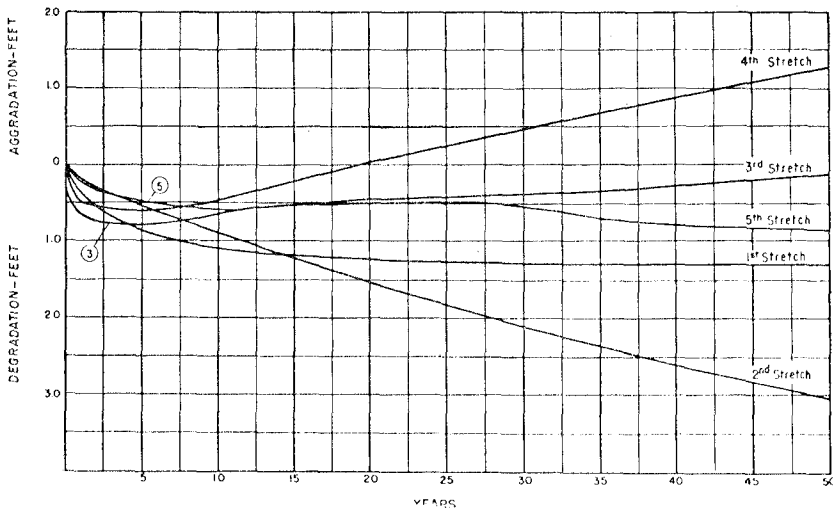


図-19 Middle Rio Grand 河の河床低下計算

*E. W. Lane: An estimate of the magnitude of the degradation which will result in the Middle Rio Grande channel from the construction of the proposed sediment storage basins and contraction works and sample computations showing method of computing degradation or aggradation on the Middle Rio Grande River, Bureau of Reclamation. Denver, Colo., July, 1948.

- (1) その河道におけるボーリングにより、深さ方向の河床構成材料の構成を知る。
- (2) 公式を用いて流送土砂の年平均輸送能力を各地点で求める。
- (3) 各断面において運ばれる各粒径ごとの量を計算する。各区分につき土砂の流出量とすぐ上の区分から入って来る土砂の流入量、local な流入量、灌漑川水などにより運び出される土砂量を組み合わせて、河床材料の構成の変化を計算する。
- (4) 1年の初めと終りの河床材料構成から1年間の平均の河床材料の構成を決定する。
- (5) この平均の河床材料構成を用いて、その区分から運び出される量を求めるために(3)を繰り返す。そして河床が上昇あるいは下降する量を求める。
- (6) その年の終りに turn over zone に残っている材料を計算し、次の年の最初における turn over zone の厚さおよび構成を決定し、以上の計算を繰り返す。

Lane は浮流砂には Lane-Kalinske 公式を、掃流砂に Kalinske 公式と Schoklitsch 公式との平均値を使って Middle Rio Grande のダム下流の河床低下を計算し図のような結果を得ている。なお彼は turn over zone の厚さを変えて計算しているが、低下量に相当に差がでることが知られた。

8. 河床変動防止工法

自然河川では上流よりの供給土砂量が変動するし、河道内の土砂の運搬力の原因となる流量も常に変動するし、また河口が海の波あるいは沿岸流の力により前進したり、後退したりするために河川延長が変化するなどのために、全体的な河床変動を常にうける。河床変動があると、河道の洪水疎通能力が変化し、護岸が破壊される場合もあるし、また利水のための取水、内水排除の困難、地下水の変動など種々の弊害を生ずる場合が多い。

したがって、以上に述べたようにできるだけ河床変動の少ないような河道を設計したり、あるいは河床変動の予測をして、前もって対策を考えておくなどの処置がとられている。

このように自然河川では河床変動はある程度避けられないと思われるが、できるだけ河床変動を防止するために有効な工法について簡単に述べてみる。この中にはすでに述べたことと重複することが多い。

(1) 砂防工事による法

すでに述べたように、自然河川では流量により土砂の運搬能力が異なるので、河川の土砂運搬能力に常に見あう土砂量を供給できるよう、砂防ダムあるいは崩壊防止工法を上流山地で行なうことは非常に有効である。しかし、常に見あうように砂防工事を行なうことは、現段階ではできないので、大洪水に対して下流河川の許容限度内に土砂を流すようにし、それ以上を貯砂する方式が現在とられている。また大粒径の砂礫を貯砂し、小粒径のものを流し、下流の河川の流送能力以上にならないように計画されているが、これについては数量的に明らかにすることが現在ではできない。

(2) 床止め工

河床低下のある河川では低下防止のために床止め工が施工される。この設計法は安定河道の設計法と全く同じようにすればよい。上流よりの土砂の供給がほとんど期待できない場合には静的平衡理論を用いて設計すべきである。

一般に床止め工は洪水時に十分効果があらわれるようにするためには、洪水時に床止め工上で射流が生ずる程度まで高くする必要があるが、このような高さにする時は高水位が相当上るので、普通維持しようとする河床高と同程度の高さにすることが多い。普通このようにした場合には平水時でも完全に潜っているか、小流量のとき完全溢流となるようなものが多く、洪水流量時には潜りせきとなり、若干の落差があったり、ほとんど落差を生じない場合が多い。流砂量は洪水時に多いから、この時に有効に働かなければならないが、低水時のみ有効に働いて(この時は流砂量は少ない)、高水時には有効でなくなるものが多いので、床止め工の設計には十分注意することが必要である。

(3) 浚 渫

河床上昇の甚だしい所では浚渫または掘削が有効である。

(4) 水 制 工

河床上昇の甚だしい所では水制工を適切に施工することにより、流水をより小さい断面に集中させ、洗堀させると同時に水制域に土砂を沈澱させ、効果をより確実にすることができる。

(5) 河床材料の置き換え

河床低下の著るしい所で、原河床にある河床材料より大きい土砂を河床全面に投入することにより、河床洗堀保護を行なうことができる。

(6) その他の工法

河床上昇を避けるためには、捷水路、放水路とか下流断面の拡幅とかを行なうことが有効な場合がある。また、河口閉塞が原因のときは河口に導流堤を設けるなどの方法が講ぜられる。