

動的安定河道の設計

Design for Stable Channel Section with Actively
Transported Bed Materials.

大同 淳之*

By Atsuyuki DAIDO

The state of dynamic equilibrium must satisfy the following three conditions;1) Equal sediment discharge along the channel. 2)Stable channel cross-section with actively transported bed materials.3) Hydraulic condition to confine the small sediment wave and the wave length of meander.The paper gave a concrete method to keep the three conditions and explained the applied results for the actual river.

Key words : Stable cross section,Channel design,
Bed material transport.

1. はしがき、

動的安定な河道を設計するとき、1) 縦断面方向の流砂量の平衡、2) 横断面方向の平衡および、3) 河道内に発生する河床波ができるかぎり小さい水理的条件を満たす断面、を選ぶ必要がある。任意の点の横断面の主要な値、勾配は縦断面方向の条件で決まる。与えられた流量、および流砂量を満足するという制約の中では、勾配は緩い関数であるが、川幅は水深の変化となって流砂量に及ぼす影響が大きい。幅が狭いとき、水深が大きくなり、結果として勾配は緩くなり、幅を広くすると勾配が急になる。一方、水深および幅は流路内に発生する河床波蛇行の規模に関係し、それらは水深、幅の増加にしたがって大きくなる。したがって、これらの相互関係しながら、最適な断面を選ぶ必要がある。

著者は、フィリピンのある扇状地の河道の改修計画の立案にあたった。この作業は河道を新設するに等しい状況にあった。特に、これらの河道は、扇状地の入り口より下流の河道の土砂輸送能力を越える土砂の供給があり、設計する河道は、過剰な土砂を流し得る河道を作る必要があった。

本文では、1)については、参考として一水系の任意の断面において、一洪水時の流砂量は等しいという考え方を述べる。2)について、流量、川幅との経験則は断面内の二次流の影響をも表現したものである、考え3)の条件も考えながら、断面を定めた過程を述べる。

* 立命館大学理工学部 教授 京都市北区等持院北町 703

2. 動的平衡河道の条件

河道を設計するとき、次の3つの条件を満足する必要がある。

- (a) 縦断方向の流砂量の平衡
- (b) 与えられた流量、流砂量に対して動的平衡な横断面
- (c) 水路内に発生する河床波、蛇行波波長ができるだけ小さい水理条件を満たす断面

以下において、これらの条件を満たす方法を考察する。

3. 考察の対象とする河道の概要

著者は、フィリピンで、扇状地に新しく河道をつくる仕事に従事した。この地域は降雨が雨期と乾期にわかれ、雨期の雨も主として台風時にもたされ、台風時には300mm/hr(100mm/5min)の雨量強度があるが、雨期でも晴天時にはほとんど流水がない。図1に示すように、山地から流出した5本の自然堤防で囲まれた河道がほぼ平行に扇状地を西進し、末端で北進する本川にそれぞれ合流する。そのうちの1つM河についてさらに説明を加えると、谷の出口から扇状地に入ったところで河道がいくつかに分かれ、洪水時、いわゆる首振りと呼ばれる河道の変更を起こしながら、しばしば河道を変えたと共に、農地を侵食してきた。農地の侵食を防ぐため、河道を改修するにあたり、著者は河道が変わる原因は、河道が細分化しているため、掃流力が不足して河道に土砂が堆積して流積が減少する結果、流れが変向すると考え、これを防ぐためには、現在細分化している河道を一本にまとめて掃流力を維持することが必要と提案した。結果として、新しく河道を新設することになり、この河道の寸法をどうするかということが課題となった。扱った三つの河道はいずれも扇状地の入口に設けられた頭首工からの流出土砂を受け入れる。頭首工上流は峡谷で、水理学条件は下流とは不連続で、流砂量も下流より大きい。頭首工より下流の本川までの距離はどの河もほぼ7kmである。

現地の河床の粒径分布を図2に示す。最大粒径は100cmである。頭首工から上流の水理条件では100cmが移動可能であった。M河の懸案地点の既往最大流量 $Q_{max}=2140\text{m}^3/\text{sec}$ 、 M_1 の地点で河床勾配は1/100である。

4. 縦断平衡条件

4-1 定流下における縦断平衡条件

河道の縦断方向の平衡は、従来より連続式

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial (q_B B)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

ここに z : 河床高、 λ : 空隙率、 q_B : 単位幅流砂量、 B : 流路幅、より $\partial z / \partial t = 0$ を満たすため、 $\partial (q_B B) / \partial x = 0$ の

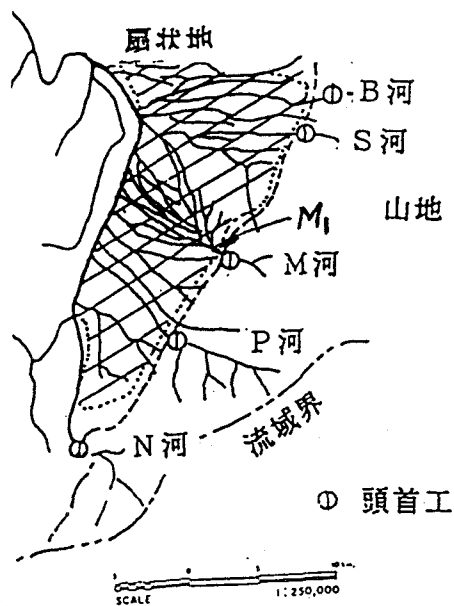


図1 計算の対象とした河道

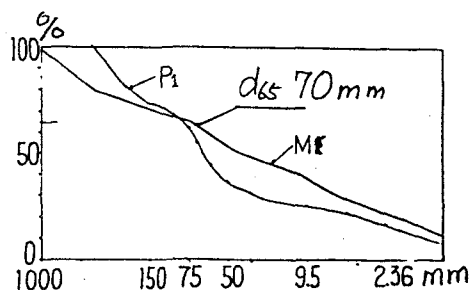


図2 対象河道の粒径分布

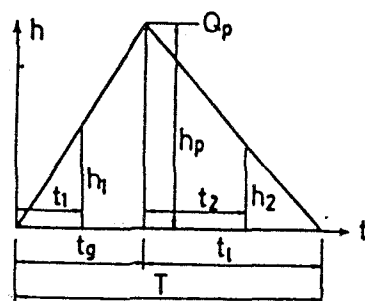


図3 洪水モデル

条件が追求されてきた¹⁾。その成果は、流量が大きいときは勾配が急になる。これは流量の大きいときに流砂量が大きくなり、抵抗が大きくなるので、結果として勾配が急になる。

流量に応じて河床の高さが上下することは、ある点の勾配は、縦断方向の条件から決まるものであることを示唆する。山間部あるいは山間部と扇状地との境界等では自然条件から流砂量が不連続になり、その河道の流砂能力とは無関係に、境界で流砂量が与えられることになり、 Q_B は従属変数でなく独立変数となる。このときには、与えられた流砂量を流す能力のある河道にする必要がある。

4-2 不等流下における縦断平衡条件

(a) 一洪水期間中の流砂量が流下方向に等しい条件による縦断平衡条件

著者は、従来より山間部または流域面積の小さいところでは、一水系の各断面で、出水中にその点を通過する流量は下流になるほど大きいことから、このような条件下において河道が安定な為には、安定条件として(1)式に変わって連続式として次の式を提案した。

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{T} \int_{\tau} q_B dt \right) = 0 \quad (2)$$

ここに、 T は洪水の継続時間である。 $\partial z / \partial t = 0$ をはかるため、 $\frac{1}{T} \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{\tau} Q_B dt \right) = 0$ を保つ必要がある。

ある。この考え方では洪水期間中に任意の断面で時間的に河床変動は生じるが、上式を満たす条件のまわりでの変動であるとする。一洪水の継続時間 T および尖頭流量 Q_p を式(3)および式(4)であらわす。

$$T = 2 R_r A \times 10^3 / Q_p \quad (3)$$

$$Q_p = 0.278 r_p A \quad (4)$$

ここに、 R_r ：全有効雨量、 A ：流域面積、 r_p ：ピーク流域を形成する有効雨量である。

図3のモデル洪水について、一洪水中の流砂量 Q_T を求めると次のようになる。

$$Q_T = (4/5) \alpha g^{3/2} R_r (0.278 r_m)^{-0.1} B^{0.1} S^{1.05} A^{0.9} n^{0.9} \times \left\{ 1 - \frac{5}{4} (k_c^{0.5} g^{-0.5} d_s^{0.5} S^{-0.35} A_1^{-0.3} n^{-0.3} B^{-0.3}) \right\} \quad (5)$$

{ } 内は掃流力中の限界掃流力の補正項

ここに、 R_r ：一降雨中の全有効雨量、 r_m ：有効雨量の到達時間内の平均値、 B ：河道幅、 A ：流域面積、 n ：Manning係数、 Γ ：掃流力中の限界掃流力に相当する部分の補正項、である。基準点の位置の流砂量を Q_{B0} とすると、 $Q_{B0} = Q_B$ より基準点の勾配 i_0 に対して任意点の勾配 i は、次のようになる。

$$i = i_0 (R_r / R_{r0}) (r_m / r_{m0})^{0.1} (B_0 / B)^{0.0951} \times (A_{10} / A_1)^{0.855} (n_0 / n)^{0.855} (\Gamma_0 / \Gamma)^{0.951} \quad (6)$$

対象区間内で雨量、粗度係数が等しいとき、式(6)は

$$i = i_0 (B_0 / B)^{0.0951} * (A_0 / A)^{0.855} \quad (7)$$

と表される。式(7)は勾配 i が流域面積 A の -0.855 乗に比例することになる。図4はほぼこの考え方が成立することを示す。

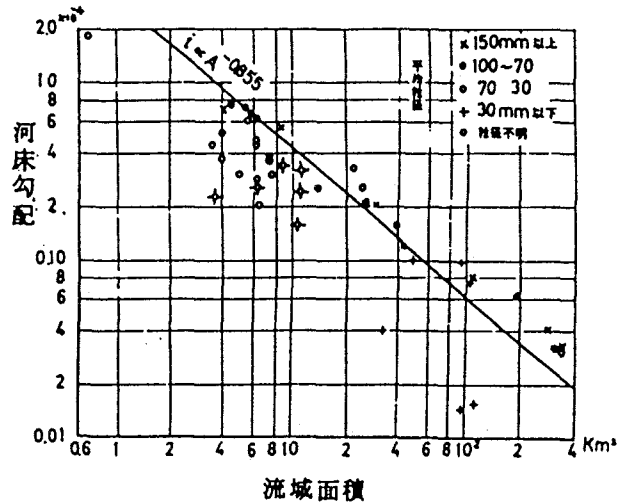


図4 砂防ダムの堆砂勾配と流域面積の関係²⁾

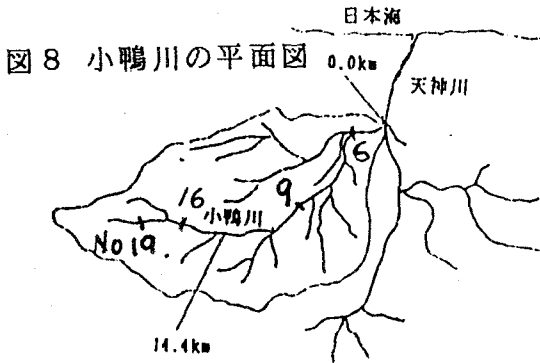
(b) 一水系での一洪水中に移動する全流量が等しいことの検証

上記の検証のため、天神川支川小鴨川で、10kmの区間で9地点を選び、50年確率および100年確率に相当する洪水を対象に一洪水中の流砂量を求めた。

モデル洪水としては上流端 No19のハイドログラフを図3で表し、流域面積A、全有効雨量 R_r を用いて、下流断面では、

$$R_r \cdot A = \int_0^T q \, dt \quad \text{を満たすよう、流量}$$

分布を修正した。一般に図3の形よりやせる形となり、断面No.19とNo.9を通過したハイドログラフの比較を図5に示す。全掃流流砂量の計算結果を図6に示す。この区間は、勾配は1/80から1/250、流量比1~3.78、粒径分布も図7に示すようにかなり異なる。No.19とNo.9の部分では一洪水中の全流砂量はほぼ等しいと判断できる。



No.10からは、勾配、粒径が、急に小さくなり、上流とは不連続である。このような不連続点において動的安定条件をどのように決めるかは今後の課題である。この場合、No.10から下は式(1)で議論すればよいであろう。図7は、10年間に相当する洪水で、この計算を行ったときの河床粒径の変化を示す。粒径の大きな変化は示されていない。この計算では、交換層は最大径の2倍にとり、出入りした粒径分で、元の粒径を計算し直して次の段階に与えるようにしたが、結果として、粒径の変化は極めて小さい。

5. 横断面の平衡

4.で述べた縦断方向の平衡をはかるためには、基準点における横断面の川幅、形状が平衡である必要がある。基準点が平衡ならば各点では形状を相似にして流路幅を式(1) 又は(6)を満たすようにすればよい。

5-1 平衡横断面に関する従来の研究

池田³⁾は、礫床河川の動的安定形状に付いて考慮し、両岸部においては、土砂の移動がなく、中央部では掃流が生じている場合に、

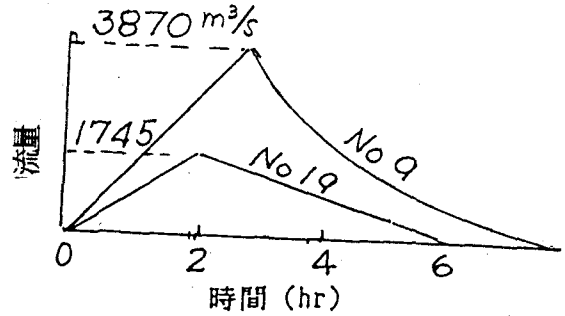


図5 断面によるハイドログラフ

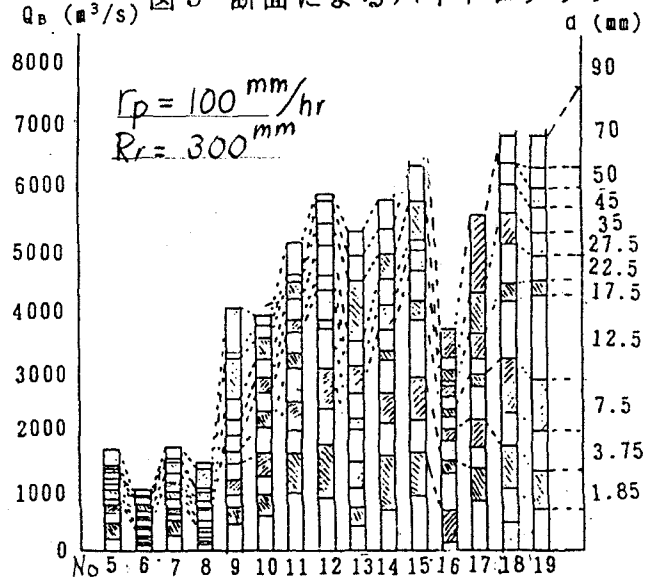


図6 一洪水中に移動する掃流砂量の比較

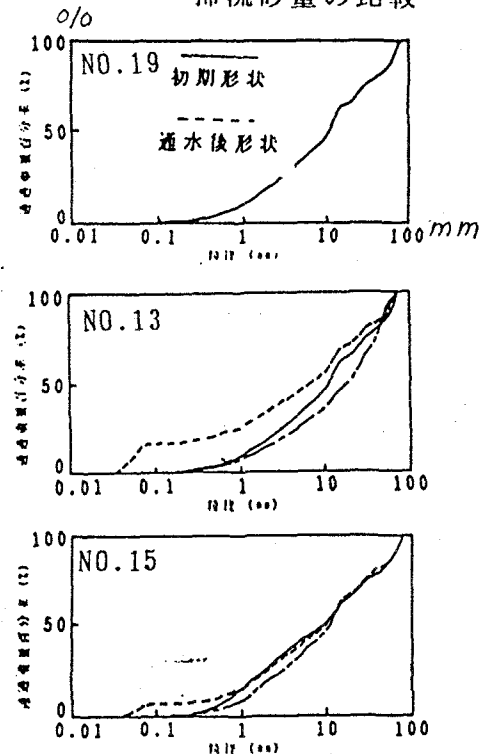


図7 河床砂の粒径の変化

とBがQの1乗に比例するとしている。この場合、 h_c としては、 $\tau_x = \text{定数}$ 、を満たすように定めている。

$$B = \phi(\tau, s, q, d)^{-3/2} q^{-1/2} I Q \quad (9)$$

一方、Regime理論⁵⁾では、

としている。kは3.5~7.0とされているが、この値は流量の関数で、流量が大きいほど、定数は小さい値をとることを示されている。⁶⁾

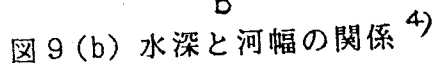
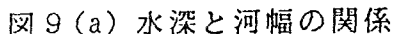
5-2 川幅Bと水深hとの経験則を導入した川幅Bと流量との関係

水路の断面形は外力と摩擦力の釣合だけでなく、横断面方向の乱れ、二次流の影響を受けた安定な形状でないといけな。これらの効果は未知のものばかりで、当然のことながらモデル化されていないが、実地の測定、実験による結果はこれらの効果を表しているはずである。

例えば、二次流の効果であって横断面において、直径が水深の1.3倍～2倍程度の縦渦が発生するとされている。移動床では、この縦渦が偶数個存在するときに安定といえる。河床抵抗は水深に一定ではないので、川幅と水深の関係は $B=(1.3\sim 2.0)h$ とはならない。

一方、日本の河川の多くは、地形的影響または何らかの制約で式(8),(9)より、川幅が狭いことが多い。このときは、与えられた流量、流砂量を流すためには水深が大きくなり、逆に勾配は緩くなる。両岸に作用するせん断力は増加し、川幅は拡幅の方向に向かう。このときは、護岸または水制で、川幅を維持する必要がある。このような川幅が制限されているときに平衡な水深と勾配の関係を知る必要がある。

水深と川幅との関係として図9(a)は著者およびSimons⁸⁾、図9(b)は山本⁴⁾によって示された実験のおよび現地資料、図9(c)はBrayらの結果である。これらの図はその水深からみて、河道内に流砂が生じている資料



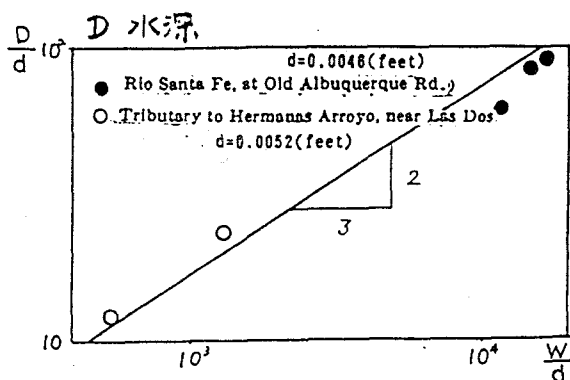


図 9 (c) 水深と河幅の関係

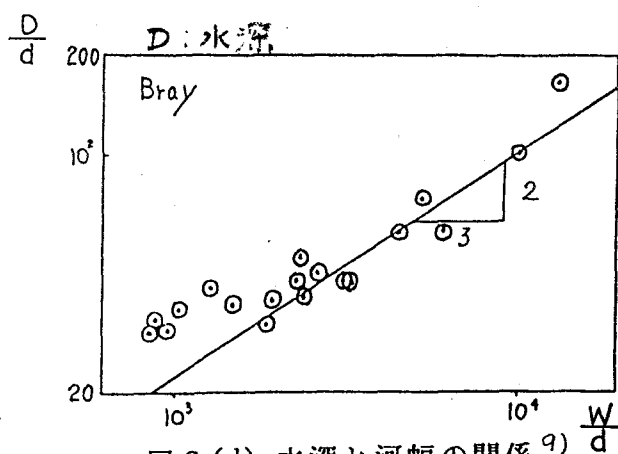


図 9 (d) 水深と河幅の関係⁹⁾

である。これらの図は、

$$h = \alpha_0 B^N \quad (11)$$

と表される。もし断面が長方形断面とみなせるときは、

$$A = \alpha_0 B^{N+1} \quad (12)$$

と表される。この式が横断面が平衡な条件を表すものとして、流量と川幅の関係を求める。

ここで対象とする断面は、与えられる流砂量 Q_B を流し得るものでないといけないので、流砂量として、ブラウン型を用いるとき、

$$\frac{q_B}{U_* d} = \alpha_1 \tau_*^m \quad (13)$$

と表され、 $\alpha_1 = 1.0$ 、 $m = 2$ である。抵抗則は次式を用いる。

$$\frac{U_*}{U_{*c}} = 7.66 \left(\frac{h}{d} \right)^{1/6} (\tau_*' / \tau_{*c})^{-2/3} \quad (14)$$

河床の状態は砂堆であるとして、 τ_*' は、次式を用いる。

$$\tau_* = 0.21 \tau_*'^{1/2} \quad (15)$$

流れの連続式は式(12)を用いて、

$$Q = \alpha_0 B^{N+1} U_* \quad (16)$$

とすると、

$$B = \frac{\beta}{\{ \alpha_0 2.4 (\alpha/d)^{1/6} (\alpha_1^m q_B^{1/m})^{-1/2} \}^{1/(N+1)}} Q^{1/\{(7/6)N+1\}} \quad (17)$$

となる。 N は図9(a),(b),(c)より2/3と読みとられるので、 Q の指数は0.56となり、式(10)のRegime式と一致する。 $\alpha_0 = 0.1$ 、 $\alpha_1 = 5$ 、 $m = 2$ 、 β は補正係数とする。この式は相対水深、掃流砂量が大きくなると比例係数は小さくなることを示す。

5-3 現地河川への適用

(a) 池田による予測；式(8)によって川幅と流量の関係を求めた結果を図10に示す。粒径が大きくなるにしたがって川幅が大きくなる。

(b) Regime定理による予測；式(10)の結果は図10に示す。

(c) Changの方法による予測；与えられた流量および流砂量に粒径を与え、流砂量を満足するよう勾配を、一

方流量を満足するよう水深を定め、両者に用いる勾配と水深が一致したときの水深と勾配の関係を求めた。計算に用いた抵抗則は式(14)を、流砂量は、Einsteinの式に限界掃力を挿入した近似式で無次元限界摩擦速度は急勾配では、相対水深の関数となって大きくなるので、無次元限界摩擦速度は上昇することから、 $\tau_{c0}=0.06$ を用いた。計算した結果は図11に示す。Changの指摘する勾配の最小値は生じていない。ただ勾配の変化はごくわずかで図9に示される範囲では、どの勾配を用いても流砂量を流過する能力を持っている。種々の流量に対して勾配と水深の関係は図12に示す。

- (d) 水深と川幅とを関係に経験式をいれたときの予測；式(17)において $h=2.7\text{m}$ （現地の予測水深） $d_{65}=0.07\text{m}$ 、 $Q_B=12\text{m}^3/\text{s}$ を入ると $B=1.25Q^{0.56}$ となる。この値を図10に示す。 $\beta=3.3$ とすると、 $B=6Q^{0.5}$ と等しい。

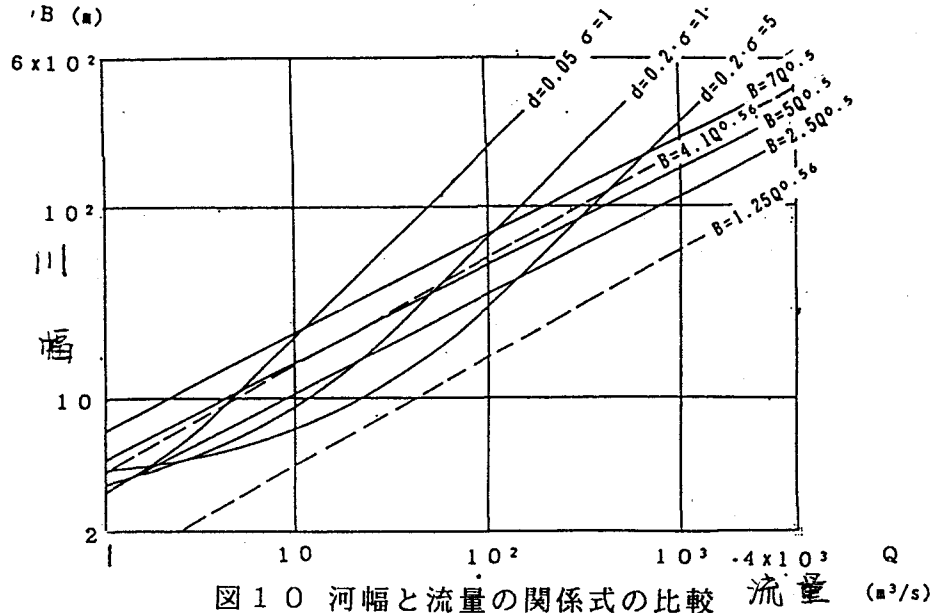


図10 河幅と流量の関係式の比較

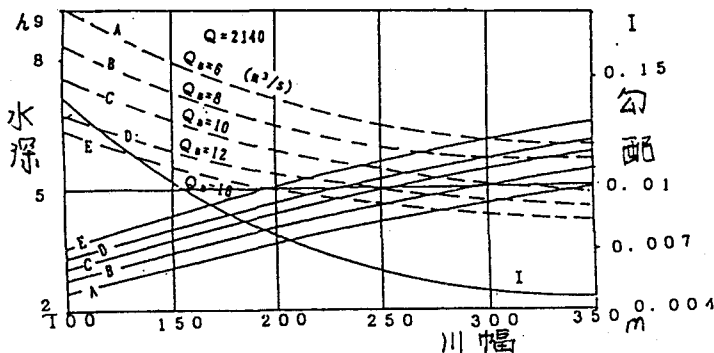


図11 流砂量の変化による水深と勾配の関係

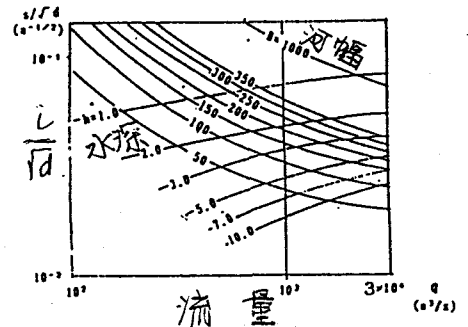


図12 流量、水深および勾配の関係

5-4 現地河道の寸法

与えられた流量と流砂量を流す川幅と流量はM河、M1断面で、図10で与えられる。現地は1) 護岸は当分出来ない。もし必要なら、護岸は竹その他植生に頼らざるを得ないので水深は小さい方がよい。2) 河床波は水深が小さい方が小さい。3) 現在の勾配と一致させるのが、望ましい等の条件を考えてM河 $B=300\text{m}$ とする。この値はRegime式では、 $k=6$ に相当する。洪水時洪水堤防の前面の浸食を防止するため複断面とし低水路は日流量の規模としその時の幅は $B=6Q^{1/2}$ で決めた。

最大水位の時、低水路に生じる河床波をYalinの式から推定すると、砂堆の波高は、 0.37m 、波長 15m である。この値は、河床の最大径よりも小さい。河床波による河床の乱れは河床の最大径の範囲とみなせる。

6. 工事中の出水による河道の反応

2. で述べた5つの河道のうち、M、PおよびS河の3つの河が本計画にしたがって改修工事が行われた。乾期のみしか工事が出来ないため、1991年から1993年にかけて施工されたが、1992年9月、台風にともなって洪水が発生した。当時の雨量は500mm/日、76mm/hrである。推定流量はM河で、2300mm/s、P河1060mm/s、河1200mm/sで、既往最大流量に相当する流量である。当時改修工事の進捗率は、M河15%、S河60% P河85%であった。当然のことながら、施工中の堤防を溢流した。流れの痕跡から当時の流線は図13のように調べられている。工事が85%進んでいたP河は下流で溢流したがほぼ河道内を流下した。施工中の手戻りが心配されたが施工者からの苦情は生じなかった。その理由は河床波による若干の凹凸は残ったが河床の高さは計画線より少し低め($d_{90} \times 0.2$)で洪水が土砂を工事区内の末端まで洗い流したためと言える。平面的な蛇行の波長は約 10^3m で、この値は池田の図の予測線とほぼ近い値である。

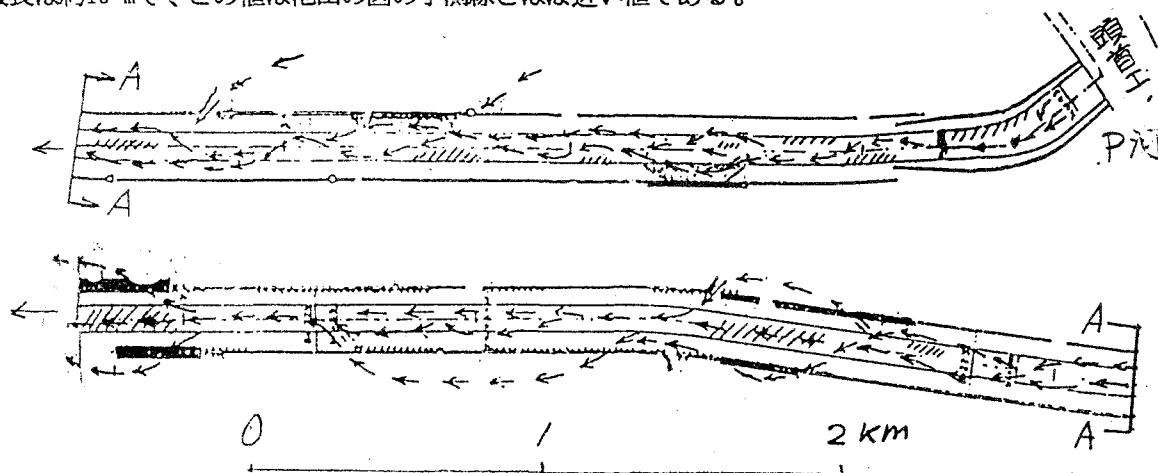


図13 改修後の河道の洪水時の流況

7. むすび

河の断面形を動的平衡状態に保つためには、1) 縦断方向の流砂量の平衡 2) 横断方向の平衡 3) 断面に生じる河床波ができるだけ小さい条件、を考慮しながら、河道計画を行った。とくに横断方向の平衡については水深と河幅の関係が、流れの内部機構による釣合を表すものとして式中に導き、その結果 $B = \alpha Q^{0.56}$ と従来のRegime式と一致することを示した。現地河道の寸法を決めるとき、これらを総合に参考として決めた。

- 1) 例えば、土屋：流路の安定縦断形状に関する研究，京大防災研究所年報，第5号A，pp192-211，昭37
- 2) 村野：砂防ダムの滞砂，建設省直轄工事第15回技術研究報告 p107
- 3) 池田，Parker，千代田，木村：直線礫床河川の動的安定横断面形状とそのスケール，土木学会論文集，375号，pp117-126，1986
- 4) 山本：河川特性論，土木研究所資料，第2662，pp45-46，1988
- 5) Leopold, Maddock: The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, U.S.G.S., Professional Paper, 598, 1968
- 6) 池谷：急勾配河川における水理特性 土研資料第1309号 昭53
- 7) Chang: Fluvial processes in River Engineering
- 8) Simons: Uniform Water Conveyance Channels in Alluvial Material, ASCE, HY.5, 1960
- 9) Bray, D.I.: Estimating average velocity in gravel-bed river., ASCE, Vol.105 HY9, 1979
- 10) Ikeda等: Bend theory of river meander. Part1 JFM.112, 1981