

河道平衡理論に関する 2, 3 の考察

建設省土木研究所 土 屋 昭 彦

1. まえがき

最近、河川における砂、砂利の採取の増大に伴う河床低下により、橋脚や護岸等の基礎が浮き上ったり周辺の地下水位が低下するなどの影響を生じている。しかし一方河床を人為的に掘削することにより洪水疎通能力の増大、高水位の低下が期待され、あわせて砂、砂利等の供給が可能になるところから、最近では積極的に河床を下げて河川の安全性を高めようとする方向にある。この場合河床低下により生ずる影響の大きさと、洪水に対する安全性の増大とをかん案して低下量がきめられることになるが、同時に河川の縦横断形状を決める場合にはできるだけ安定な河道であることが望ましい。

安定河道の設計には、平面形状、横断形状、縦断形状の三つの面から考慮しなければならないが、平面形状、横断形状には流水の蛇行現象が関係するために合理的な設計法が確立されていない状況である。縦断形状については、いわゆる平衡理論や河床変動計算などの手法があり、ある程度研究が進められている。

自然の河道では一般に砂礫は混合砂礫であって、流水によるふるい分け作用をうけることになり、安定な縦断形状が存在するか否かという本質的な問題があって、平衡理論の適用については議論の多いところである。この点について、平衡理論を実河川に適用して 2, 3 の考察を試みた。

2 平衡理論

平衡理論には、河床砂礫が限界掃流力に均合って静止した状態で河床形状が平衡であるとする静的平衡理論と、流砂量が縦断的に一定で平衡しているとする動的平衡理論があり、前者については、運動方程式、連続式、抵抗法則式、河床の限界掃流力を表わす式および河床高を表わす幾何学的条件式を用い、河床の粒度分布、河巾、粗度係数および基準点における水面勾配と水深および河床高を境界条件にして求めることができる。

後者については、限界掃流力公式の代りに流砂量公式および流砂の連続式を用いて求めることができる。

長方形断面について、増田、河村⁽¹⁾は抵抗法則式に対数分布則を用いて計算式を求めており、土屋(義人)⁽²⁾は Manning 式を用いて川巾の影響を表わした計算式を求めている。

複断面形水路については、須賀⁽³⁾が、高水敷と低水敷を、それぞれ、静的平衡、動的平衡、あるいは固定などの数種の組合わせについて計算法を示している。

長方形断面の場合の一般的な計算式は次の様に表わされる。

1) 静的平衡

抵抗法則に Manning 式を用い、限界掃流力公式に岩垣公式を用いると、静的平衡勾配 i は次のように表わせる。

$$i = -\frac{dz}{dx} = M_1 I_0 + M_2 h_0 + M_3 \frac{h_0^3}{n_0^2} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\frac{6}{7}} \left(\frac{a_c}{a_{c0}}\right)^{\frac{10}{7}} \left(\frac{d_m}{d_{m0}}\right)^{\frac{10}{7}} \left(\frac{B}{B_0}\right)^{\frac{6}{7}} \\ M_2 &= \frac{3}{7} \left(\frac{n}{n_0}\right)^{\frac{6}{7}} \left(\frac{a_c}{a_{c0}}\right)^{-\frac{3}{7}} \left(\frac{B}{B_0}\right)^{-\frac{6}{7}} \left(2 \frac{dn}{dx} - \frac{1}{a_c} \frac{da_c}{dx} - \frac{1}{d_m} \frac{dd_m}{dx} - \frac{2}{B} \frac{dB}{dx}\right) \\ M_3 &= -\frac{1}{7} \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\frac{12}{7}} \left(\frac{a_c}{a_{c0}}\right)^{\frac{6}{7}} \left(\frac{d_m}{d_{m0}}\right)^{\frac{6}{7}} \left(\frac{B}{B_0}\right)^{\frac{12}{7}} \left(\frac{6}{n} \frac{dn}{dx} - \frac{3}{a_c} \frac{da_c}{dx} - \frac{3}{d_m} \frac{dd_m}{dx} + \frac{1}{B} \frac{dB}{dx}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし, x : 流れの方向の距離, I : 水面勾配, h : 水深, h_c : 限界水深, B : 河巾, d_m : 平均粒径, n : 粗度係数, a_c : 岩垣公式の係数 ($U_{*c}^2 = a_c \{(\rho_s/\rho) - 1\} g d_m$) であり添字 0 は基準地点のそれぞれの値を示している。

ii) 動的平衡

抵抗法則に Manning 式を用い, 流砂量公式として Brown 式を用いると, 静的平衡と同様に動的平衡勾配 i は次のように表わされる。

$$i = -\frac{dz}{dx} = K_1 I_0 + K_2 h_0 + K_3 \frac{h_c^3}{h_0^2} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\frac{6}{7}} \left(\frac{B_0}{B}\right)^{\alpha} \left(\frac{d_{m0}}{d_m}\right)^{\beta} \\ K_2 &= \left(\frac{n}{n_0}\right)^{\frac{6}{7}} \left(\frac{B}{B_0}\right)^r \left(\frac{d_m}{d_{m0}}\right)^{\delta} \left(\frac{6}{7n} \frac{dn}{dx} + \frac{r}{B} \frac{dB}{dx} + \frac{\delta}{d_m} \frac{dd_m}{dx}\right) \\ K_3 &= -\left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\frac{12}{7}} \left(\frac{B}{B_0}\right)^{-2r} \left(\frac{d_m}{d_{m0}}\right)^{-2\delta} \left(\frac{6}{7n} \frac{dn}{dx} + \frac{r+1}{B} \frac{dB}{dx} + \frac{\delta}{d_m} \frac{dd_m}{dx}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\text{ただし} \quad \alpha = \frac{14-12p}{7(1+2p)}, \quad \beta = \frac{20(1-p)}{7(1+2p)}, \quad r = \frac{-12p}{7(1+2p)}, \quad \delta = \frac{6(1-p)}{7(1+2p)}$$

ここに p は, Brown 公式中の係数である。

$$\frac{q_T}{U_* d_m} = a_s \left[\frac{U_{*c}^2}{\{(\rho_s/\rho) - 1\} g d_m} \right]^p \quad (5)$$

ただし q_T : 流砂量, Kalinske・Brown 公式 $p = 2$, $a_s = 10$

佐藤・吉川・芦田公式 $p = 1$, $a_s = 0.623$, $n \geq 0.025$

(1) および (3) 式をみて分るように, 基準点の水深および水面勾配を与え, (2) および (4) 式の河道条件を与えることによって求めることができるがここで基準点の I_0 , h_0 の意味を考えると次の如くなる。

まず静的平衡の場合には, Manning 式と $U_{*c}^2 = gh_0 I_0$ とから,

$$I_0 = \left(\frac{B_0 U_{*c}^{\frac{10}{3}}}{g^{\frac{5}{3}} Q n_0} \right)^{\frac{6}{7}} \quad (6)$$

$$h_0 = \left(\frac{Q^2 n_0^2 g}{B_0^2 U_{*c}^2} \right)^{\frac{3}{7}} \quad (7)$$

を得る。即ち、流量と基準点の粒径および粗度によって定まる値である。

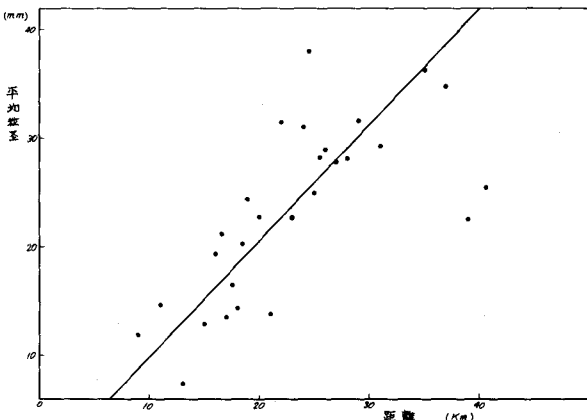
動的平衡の場合には、Manning 式と Brown 公式とから

$$I_0 = \frac{B_0^{\frac{6}{7}} \{ Q_T \{ (\rho_s / \rho) - 1 \}^P g^P / B_0 \cdot a_s \cdot d_{m0}^{1-P} \}^{\frac{20}{7(2P-1)}}}{g^{\frac{10}{7}} Q^{\frac{5}{7}} n_0^{\frac{5}{7}}} \quad (8)$$

$$h_0 = \frac{Q^{\frac{5}{7}} n_0^{\frac{5}{7}} g^{\frac{3}{7}}}{\{ B_0^{2P} Q_T \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^P g^P / a_s \cdot d_{m0}^{1-P} \}^{\frac{2}{2P+1}}} \quad (9)$$

の如くに流量および補給砂量と基準点の河道条件によって決まる値である。従って何れの場合においても、基準点が、その流量について十分安定した河道条件を示していることと動的平衡の場合には、上流からの補給砂量 Q_T の見積りが精度よく行なわれるか否かが重要となる。

つぎにこれらの平衡理論を吉野川について適用した例を示す。吉野川は、下流より 15 km 地点に用水堰があってこれの上下流では流れの状況が異なるので、15 km 地点より上流についての計算結果を示す。



図一 1 吉野川平均粒径

まず静的平衡について、河床材料の粒径を何の様にとるかが問題であるが、一応平均粒径を考えた場合の粒度変化を図一 1 に示す。非常に変化が激しいので図に示す如き直線変化を仮定し、流量は $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ と変化させ、15.2 km 地点を出発点として粗度係数 $n=0.035$ 一定として計算した所図一 2 に示す如き結果を得た。15~25 km では $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ の適合性がよいが上流の方では $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ に対する河床勾配の方が現状河床に類似している。これより流量を増せば計算河床勾配は更に緩くなる。現状河床については、過去 10 年間の横断測量結果から殆んどその変化を認めず砂利採取の影響も、図一 2 に示される変動に比較すれば無視してよいと言える。

動的平衡理論については、流量が $500 \sim 15000 \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲で、補給砂量をそれぞれのケースで数種変えて計算を行った。それらのうちから $Q=2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ の計算結果を図一 3~5 に示す。 $Q=5000 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合について見ると、15~20 km 附近は、流砂量が 123000 cc/s のケースが現状河床に近く、25~30 km 附近は 153750 cc/s のケースが近く、また 33 K 40 km では 184500 cc/s のケースが現状河道に類似している。この傾向は他の流量の場合でも同様に認められ、流砂量の変化率も 50~100 % と変化している。

以上の様な結果から、吉野川の現状河道は、静的平衡理論によっても動的平衡理論によっても 1 流量、あるいは 1 流砂量によっては完全には表現されないといえる。また、もし仮りに表わされた場合にも、その時の流量や流砂量が、支配流量、あるいは支配流砂量に相当すると言えるものであろうか。この点について次のような河道の形成モデルを考えて考察を進めることにする。

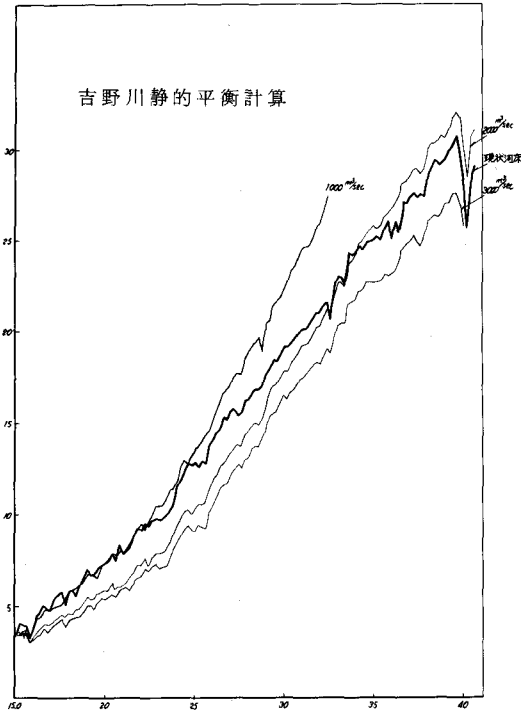


図 - 2 吉野川靜の平衡河床

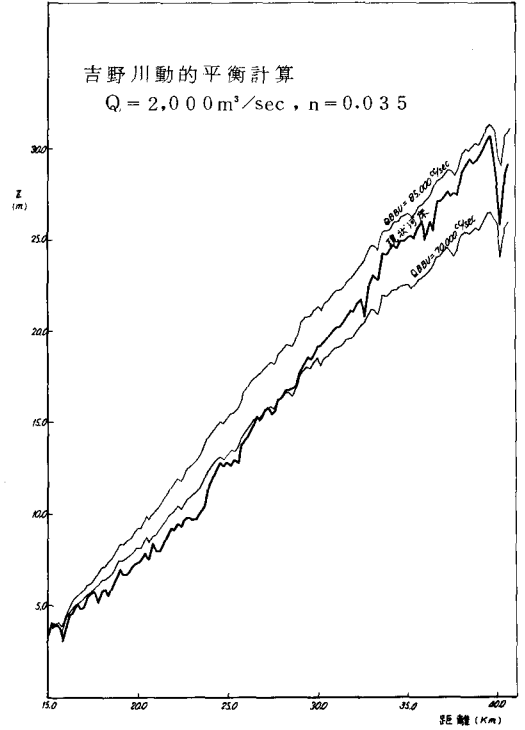


図 - 3 吉野川動の平衡河床

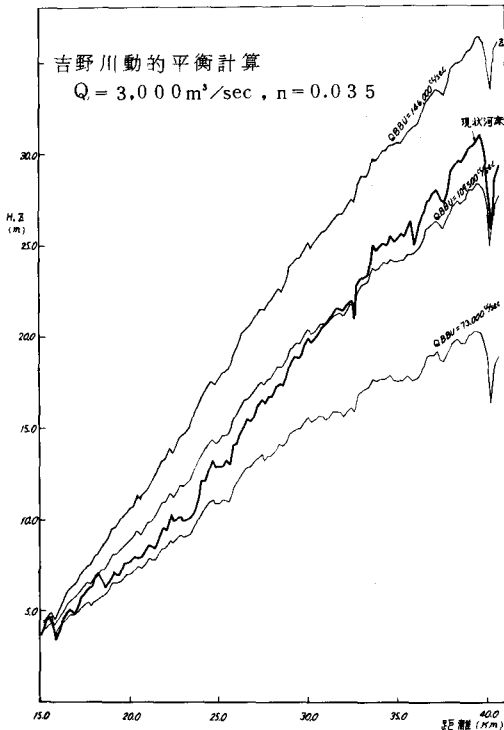


図 - 4 吉野川動の平衡河床

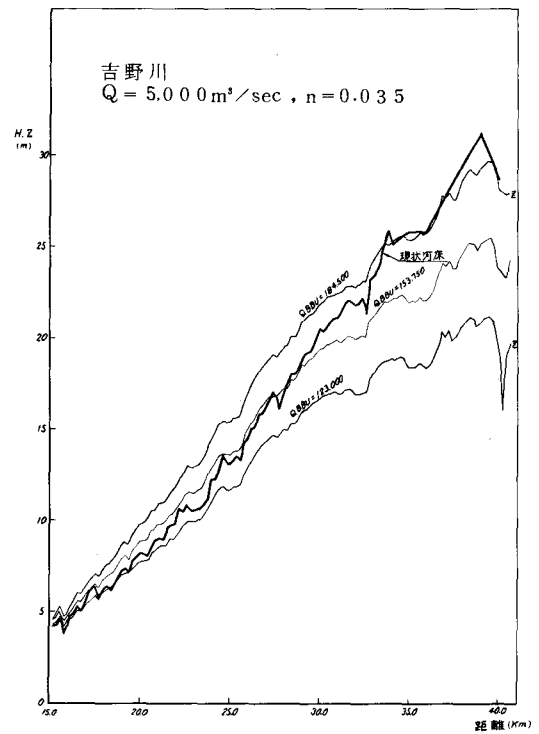


図 - 5 吉野川動の平衡河床

3 河道形成のモデル

上流からの土砂供給は、その河川の河床にみられる砂礫がよく混合されて、どの粒径の土砂も十分供給されるものとする。

河床縦断形状については種々の形が考えられるが、実際河川に多く見られるような一定流量に対して、上流に行くに従って次第に掃流力の増加する河床形状を想定することにする。

ある粒径の砂礫について見た場合に、最大洪水流量で限界掃流力となる地点より下流には輸送されないで、その砂礫はそれより上流に分布することになる。即ち上流から供給された混合砂礫は、その時の流量に従ってふるい分けされて河道に堆積する筈である。では最初に想定した河床形状は何によって規定されるであろうか。

いま、ある地点において一定流量が流れている状態を考える。この時この地点ではその掃流力を限界掃流力とする砂礫は停止するが、それ以下の粒径のものは下流に通過する。もしその河道が非平衡であればそれ以下の粒径でも堆積洗掘を生ずるが、それによって河道は平衡に復する力が大きく、容易に平衡状態に近づくと考えてよいから、停止する砂礫の量はほぼ限界掃流力によって規定される。従ってその地点を通過する砂礫の量に比べて、停止する砂礫の量は極めて少ないと考えられる。従ってこの附近の河床は、これより粒径の小さい土砂の動的平衡によって支配される。即ちある流量について近似に静的平衡と動的平衡とが同時に成立つ筈である。ただしその場合静的平衡を支配する河床砂礫の選び方には問題がある。

吉野川の河床材料について、粒径別に縦断的な分布を求めたのが図-6である。これを見ると小粒径と大粒径の分布は、下流部及び上流部に集中が見られるが中間粒径については、ほぼ一様な分布を示し、支配

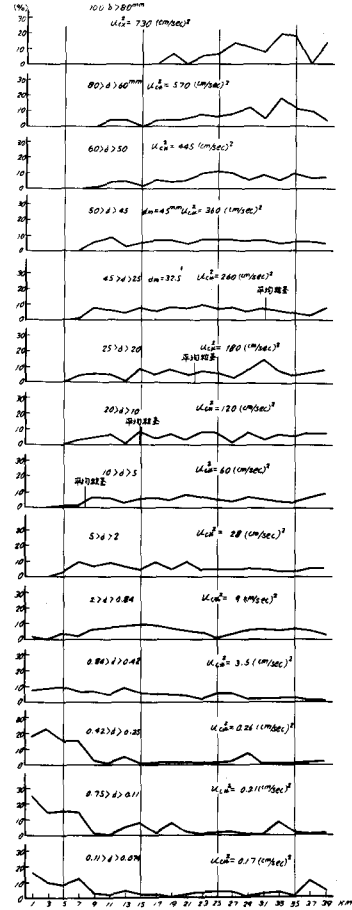


図-6 吉野川粒径別粒度分布

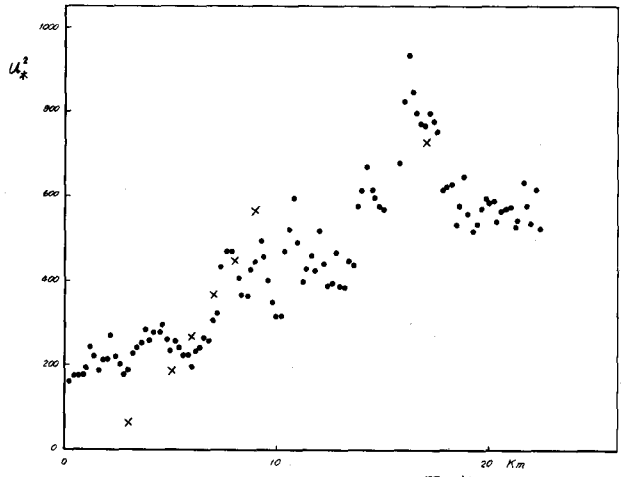


図-7 掃流力縦断図

流量の存在を示すようなピークは認め難い。

前に求めた静的平衡の各粒径の位置を図中に示すが、これは平均粒径ということでこの位置にきただけであって、支配流量によってこの粒径がこの附近に停止したと考えられる理由は見出し難い。

吉野川の流量 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合について不等流計算より求めた掃流力分布図が図-7であるが、図-6の各粒径の最下流端の位置と限界掃流力を図-7の中に×印で示した。3 km 附近の下流部を除けば、両者はほぼ一致していると見ることができる。即ち吉野川の最大洪水流量はほぼ $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ と推定される。

以上の様な考察から、静的平衡についても、河床砂礫の粒径と位置、および流量の間に一定の法則があり、これらの組合わせによってどの流量でも同一の河床形状を与え得ることが考えられる。

このように、土砂のふり分け堆積機構によって河床が形成されると考えると、その河床形状に最も関係のあるのは、上流から供給される土砂の粒度構成および混合粒径のふり分け機構であって、混合粒径に対する流砂量公式の適用、移動層厚の問題など研究すべき課題が多い。

4 平衡理論と河道計画

現状河道に対する平衡理論の適用性は、すでに吉野川の例でも見たように縦断的に粒度分布の変化する河川では、動的平衡理論の適合性が悪い。しかし、縦断的に粒度変化の少ない河川では、動的平衡理論の適合性は大体よいが、静的平衡理論の適用は不可である。

計画河道にこれらを適用する場合には次のような問題点がある。

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| I) 支配流量の決定 | III) 将来における河床粒度分布の予測 |
| II) 将来における流量-流砂量関係の予測 | IV) 計画河道と在来河道との接合点の処理 |

支配流量については、杉尾⁽⁴⁾は年超過確率と流域面積との関係で求まるとしているが、河床材料の粒径のとり方そのものに問題があり、決め難いと思われる。ただ、仮りに支配流量が現状河道で決められるとすれば、流出機構に変化のない限り、計画河道に対しても適用の可能性がある。

流量-流砂量関係や、粒度分布の変化の予測は平衡理論からは求められず、河床変動計算を必要とする。

計画河道の境界では、下流端の水位の影響や、上流端での河道条件が影響して、計画流砂量が計画通りに供給されるとは限らない。

以上の様な問題点から、河道計画における平衡理論の適用は、かなりせまい分野に限られてくると思われる。

5 あとがき 現在建設省では、多くの河川で河道計画の問題にとり組んでおり、平衡理論も複断面水路への適用を含めて現状解析という意味で広く利用されている。しかし、計画河道への適用の点では多くの問題があり、ここに行った考察もそれらを解決する1つの試みである。

なお解析に協力を頂いた石崎勝義、本間久枝両君に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 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
" " : 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70号
- 2) 土屋義人：流路の安定縦断形状に関する研究、京都大学防災研究所年報、第5号
- 3) 須賀勉三：河川の変断面水路における平衡縦断形状について、土木学会論文集第144号
- 4) 杉尾捨三郎：Channel Gradients above Gully-Control Structures, Proceedings of A.S.C.E. 1966