

流路の安定縦断形状に関する研究*

土 屋 義 人

STUDY ON STABLE PROFILES OF THE BED OF A STREAM CHANNEL

by Yoshito TSUCHIYA

Synopsis

It may be one of the important problems in river and irrigation engineerings to estimate the stable profiles of beds of rivers and irrigation canals with movable beds. In this paper, the stable profiles of the bed of a stream channel are defined under the conditions that, the first is the case when the tractive force of flow is critical and the other, the total load of sediment transportation is constant at any section of a stream channel. The stable profiles for flows upstream of debris barriers constructed in a wide, rectangular open channel, an open channel with a gradually varied width and a prismatic open channel with a *U*-section, are considered theoretically by the analytical approach based on the both ideas of critical tractive force and of continuity of sediment transportation, and compared with the experimental results. It is cleared from the comparison that the theoretical curves for the stable profiles of beds are in good agreement with the experimental results, and the analytical results explain well the mechanism of establishing the stable profiles.

In addition, applications of the above basic considerations to the field data for the profiles of the river bed upstream of a debris barrier are described, and some problems in the application are briefly discussed.

1. 緒 言

自然の流路では一般に水とともに土砂が輸送され、流水の水利特性と流路を構成する土砂との間に適当なつり合い関係が保たれて、いわゆる安定断面を形成するものと考えられてきた。こうした安定断面に関する水理学的な考察は灌漑および河川計画において極めて重要なわけであるが、その現象が多少なりとも三次元的な流れを対象とすることおよび流砂の現象に関連することから、その発展はかなり困難といわねばならない。

1950年米国の開拓局 (Bureau of Reclamation) においては、安定流路の設計に関する一連の研究をはじめ、その実際的な方法を考察してきた^{1), 2), 3), 4)}。そうした研究における Lane⁴⁾ による安定流路 (stable channel) の定義はつぎのようである。すなわち安定流路は水を流送し、その流水によつて堤防および河床が洗掘されず、かつまた不都合な堆積を生じないような、素掘りのままの流路 (unlined earth channel) である。流路が安定であるという条件をいまいし水理学的に記述すると、上述の Lane による定義に基づいて、つぎの二つをあげることができる。第1は流路を構成している河床底質が移動しない場合であつて、このよ

* 昭和33および35年度土木学会中部支部研究発表会において一部発表

うな流路はいうまでもなく安定であるが、これを水理学的に論ずる場合には、まず河床の底質がすべて掃流限界以下にある場合を対象としなければならないであろう。第2は底質が移動している場合であつて、上述の Lane の定義を満たす必要があるわけであるから、流路の各断面における流砂量が距離的に変化しない場合であつて、こうした場合の水理学的な解明は流れの局所的な抵抗法則と流砂に関する研究成果に基づかなければならない。

以上のように定義づけられる安定流路の縦断形状を水理学的に考察しようとした著者の研究を述べるにあたり、まずこうした安定流路に関する従来の研究の概略を説明すればつぎのようである。

従来安定流路に関する研究は、主として Lacey⁵⁾ によつて提案され、その後多くの研究者がその実際的な方法としてとりあげてきたいわゆる regime theory に基づいている。これは安定流路に関する水理学的な考察が前述した理由によつて極めて困難であることから、実際上の設計に対して適用しうるなんらかの資料を既設の流路に関する実測結果から求めようとするものであつて、1930年 Lacey がインドおよびパキスタンの灌漑用水路に対して検討して以来、Pettis⁵⁾、Inglis⁵⁾、King⁵⁾、Blench^{6),7)}、Forlier および Scobey⁸⁾らによつて多くの自然の流路に対して試みられてきたが、その水理学的根拠においては多くの問題点を残していることはいうまでもない。こうした取扱いによつて、既設の安定流路における水理量たとえば流量、勾配、水深、流積、流路幅、河床底質の特性などから、それらの間のなんらかの統一した傾向を見出すことができれば、一応対象とした水路と同様な特性をもつ流路の設計に適用しうる公式や図表をつくることができるわけであつて、最近でもこのような取扱いによる Lane, Ning Chien⁹⁾、Terrell および Borland¹⁰⁾、Maddock および Leopold¹¹⁾、Leopold および Wolman^{12),13)}あるいは Simons^{14),15)}などの研究をあげることができる。

これらの諸研究において対象とした流路は比較的勾配の緩やかなものが多く、したがつてまた流路の縦断形状そのものについての考察は直接には論議されていないようである。しかしながら、縦断形状のみならず流路の横断形状に対する水理学的な考察は、古く Forcheimer⁵⁾、Niezery および Kelchein⁵⁾、あるいは Fan⁵⁾らによつてなされてきたが、こうした流れの特性に関する研究がほとんど進められていなかったため、その考察は妥当なものとはいいがたく、基礎的な問題点を残していることはいうまでもない。1953年 Lane^{6),17)}は限界掃流力に及ぼす斜面勾配の効果を以上と同様な考え方によつて考察した。これは流路斜面の安定を議論する場合の一つの定性的な資料となりうるであろうが、定量的な議論にはなお問題点があるといわねばならない。また1959年 Lane, Lin および Liu⁸⁾は Forcheimer⁵⁾と全く同様な取扱い方によつて計算を進め、実際問題に役立てるための安定横断形状の特性をあらわす資料を提示したが、実在流路における形状との比較は行なつておらず、またその水理学的な取扱い方にはなんらの進歩も示していないといつてよい。

一方、流路の安定縦断形状については、諸外国では Shulits^{19),20),21)}の研究以外はあまり考察が進められていないようである。しかしわが国のように急流な河川でとくにその上流部に設けられる砂防ダムなどの河川横断構造物などによつて人為的に河床変化を余儀なくされる場合、あるいはそうした河川の一貫性ある改修計画を樹立するにあつては、流路の安定縦断形状に関する研究が極めて重要となるわけである。このことから従来、物部および安芸^{22),23)}によつて河川の平衡勾配として限界掃流力の概念に立脚した実際的な方法^{24)~33)}が提案され、また考察が進められてきた。

最近流砂に関する研究の進展とあいまつて、流路の安定縦断形状に対する水理学的な検討が行なわれ、前述したような Lane と同様な考え方に基づいて、たとえば杉尾³⁴⁾、矢野および大同^{35),36)}、あるいは増田および河村^{37),38)}らによつて考察が進められてきたが、流路が安定であるという概念の実際問題への適用と安定であると考えられる流路の水理学的な条件に対する検討などにおいて、いまだ極めて多くの問題点を残しているようである。

以上のような流路の安定断面に関する研究の現状において、著者³⁹⁾らはまず流路の安定な横断形状を水理学的に解明するにあつて、すでに述べた Lane の定義に基づき、限界掃流力に関する研究の一つの応用として、流路の床面上の砂礫がすべて掃流限界にあるような断面を理論的に解析し、Simons および Bender¹⁴⁾

によつて実測された米国における実在の灌漑用水路の横断形状と比較検討して理論的結果の妥当性を明らかにするとともに、安定流路の設計上の基礎資料を作成して実際問題に役立てようと試みた。そしてまた、一般に流路には流砂をとまうが、流路の岸部の形状に対してはむしろ以上の解析による成果がかなりよく適合することを明らかにした。

さらにまた流路の安定縦断形状に関する研究を進めてきたので、本論文には現在までに得られた成果について述べるつもりである。著者は流路の安定縦断形状に関する研究を進めるにあつて、まず一般に流路延長が比較的短い砂防ダム上流における安定な堆砂形状を対象として考察を行なつてきた。そしてそのような安定な堆砂形状を考察するにあたり、Lane と同じ考えに基づいて前述したようにその水理学的な条件として、河床底質がすべて掃流限界にある場合を静的に安定な堆砂形状と名づけ、またこれに対して流砂は存在するが、流路のどの断面においても堆積や洗掘を生ぜしめないような場合を動的に安定な堆砂形状と定義し、さらにそのような状態にある流路の縦断形状をそれぞれ静的あるいは動的に安定な縦断形状ということにした。こうした安定な縦断形状に関する理論的手法は杉尾³⁴⁾の研究と同様であり、その後発表された矢野および大同^{35),36)}あるいは増田および河村^{37),38)}の研究も全く同じ方法に基づいているが、ここでは実際問題への適用を考え、実用上の観点に立つてなるべく一般的に数式を展開することにし、さらに河谷の形状をとり入れて堆砂形状の解析とともに、堆砂にともなう流路幅の変化をも追求できるような方法によつて考察を進める。以上のような考えに基づいて理論的に考察した結果を実在の砂防ダム上流における安定な堆砂形状に適用し、その方法を説明するとともにそうした場合の問題点を明らかにするつもりである。

2. 流路の安定縦断形状の理論的考察

流路の縦断形状は流水の作用と流路を構成している砂礫あるいは流送される砂礫の特性との複雑な関連において形成されるものであり、とくに自然の河川におけるような流量がしばしば変化する場合に、縦断形状がいかなる状態のもとで形成されるかということは極めて複雑な現象である。自然の流路では一般に砂礫は混合砂礫であつて、流水によるフルイ分け作用(sorting)をとまうことから、なおさら現象は複雑である。したがつて、そのような状態においてしばしば論議されてきた河川の平衡勾配あるいは安定な縦断形状というものが存在するかということに対する本質的な議論については明確な解答は与えられていない。むしろ後述する考察において安定であるという条件として、全流砂量がどの断面においても一定であるということは、とくに流水のフルイ分け作用を考えて議論すれば、流砂機構に関するこれまでの研究成果を適用した範囲内では不都合な現象が現われてくるようである⁴⁰⁾。このことは流砂現象に対する水理学的な取扱いが十分でないことによるのは当然かもしれないが、また一方流路が安定であるという条件の数式的な表現にも問題点があるようである。

しかしながら、あまり荒唐していない河川における縦断形状は流量がしばしば変化するにもかかわらず、ある一つの形状のまわりに変動を示しているようであり、こうしたことからむしろ従来より河川の平衡勾配が仮定され、また考察されてきたことを考えると、緒言において述べたように安定な縦断形状の存在も実際上は仮定してもよいようにみうけられる。このように河川の安定縦断形状の存在に対する議論が確定的なものでなく、多くの問題点を残していることは、流水の作用と砂礫の特性との深い関連における現象であるためであつて、こうした形状を解明するにあたり理想的には流水のフルイ分け作用を考慮して流砂現象を考察し、安定な縦断形状を求めるべきであろう。

一方、河川および灌漑工学上の実際問題において、なんらかの方法によつて縦断形状や堆砂形状を推定することは、前述した事情から明らかなように、計画樹立にあたつて極めて重要であることはいうまでもなく、従来こうした研究が数多く行なわれてきたのもこのような理由によるのであろう。

以上のような理由から、流路の安定縦断形状を考察するにあつては数多くの問題点があるわけであるが、前述した実際上の要求に応ずるための一手段として、こうした現象を極めて大胆な仮定のもとに取り扱うことによつて現実を少しでも説明することができれば、工学上十分有意義であるといつてよいであろう。

(1) 幅広の矩形断面の一樣流路における安定な縦断形状

河幅が水深に比して十分広く、水流が二次元的であると考えられる場合においても、一般にその流路床勾配や砂礫の大きさはともに距離によつて変化する場合が少なくない。しかしながら、こうした場合の水面形や安定な縦断形状は、とくにその区間においてそれらの基礎方程式に特異点が現われない場合には、適当な境界条件のもとに、水路床勾配や砂礫の大きさが一定であるような区間に分けて逐次計算を進めればよいであろう。また前述したように対象とする河谷の範囲が比較的短かい場合には、むしろ第1次近似としての取扱ひでは、砂礫の大きさは一定と考えてよいであろう。

こうした理由から、以下においては流路床勾配が一定でかつ砂礫の大きさが変わらない場合における安定な縦断形状について考察する。まず水流に対する基礎方程式は、座標を Fig. 1 のようにとることにすれば、河床の変動が十分小さい場合次式によつてあたえられる。

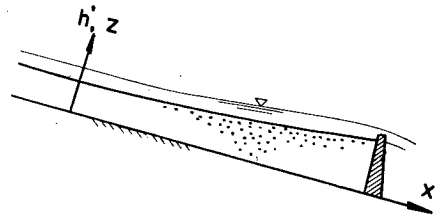


Fig. 1 Schematic sketch of sedimentation and flow upstream of debris barrier in wide stream channel

$$\left(1 - \frac{\alpha Q^2}{gh^3}\right) \frac{dh}{dx} = J_0 - \frac{dz}{dx} - \frac{\tau_0}{\rho gh} \quad (1)$$

ここに、 h ；水深、 Q ；流量、 α ；流速分布に対する補正係数、 J_0 ；流路床勾配、 z ；堆砂高さ、 τ_0 ；掃流力、 ρ ；水の密度、 g ；重力の加速度である。

一方、流砂に関する方程式としては Kalinske および Brown の結果に限界掃流力を導入した次式が用いられるものとする。

$$\frac{q_s}{U_*^* d} = K \{ (U^*/V_s)^2 - (U_c^*/V_s)^2 \}^m \quad (2)$$

ここに、 $V_s^2 = (\sigma/\rho - 1)gd$ であり、また q_s ；単位幅当りの流砂量、 U^* ；摩擦速度 $\sqrt{\tau_0/\rho}$ 、 U_c^* ；限界掃流力に対応した摩擦速度、 σ ；砂礫の密度、 K および m ；実験定数であつて Kalinske および Brown によれば $K=10$ および $m=2$ 、である。さらに水流の抵抗法則として、流砂のある場合に対しても、Manning の式が適用されるものと仮定する。

$$\tau_0 = \rho g n^2 Q^2 / h^{7/3} \quad (3)$$

さて、河床が動的に安定であるためには、任意の断面において流砂が一定でなければならない。流路全体にわたつて砂礫の特性が同一であり、かつ (2) 式における実数 K および m がともに一定であるとすれば、その条件は

$$U_*^2 = \text{const.} (= U_0^{*2}) \quad (4)$$

ということになる。もし $U_*^2 = U_c^{*2}$ であれば、河床砂礫は掃流限界にあることになつて静的に安定といえる場合であるが、この条件は (4) 式に含まれるから、ここでは両者を一緒に取り扱うことにする。

以上の諸式を用いることによつて、 h および z のいずれにもその境界条件を導入できるように、 h および z と x との関係をうることであれば、安定な縦断形状とそのときの水面形とが求められるわけである。ところが (4) 式の関係を (3) 式に適用すれば当然 $h = \text{const.}$ となり、したがつて (1) 式から $z = \text{const.}$ ということになるので、水面形の変化に応じた縦断形状を求めることができない。これは安定な縦断形状をあらわす未知数 z が (1) 式にのみ入つており、他の式には入つていないので、このようなことになるわけであるが、(2) あるいは (3) 式にたとえば流路床勾配による補正項を付加することはいまのところでは不可能であることから、以上の諸式に基づく限りではさけられない欠点といわねばならない。従来砂防ダム上流における安定勾配や河川の平衡勾配に対する考案として行なわれてきた諸研究も根本的に以上と同じ欠点をもっていることになる。

そこでここでは以上の欠点をいまいし修正するための一つの便法について考える。(3)式は流れの抗抵法則を与える関係であるから、(4)式を満足すべきものはむしろこの式ではなく、流路床上の掃流力をあらわす(1)式右辺の第3項であろう。すなわち(3)式は水面形を計算する場合に最も適切に用いられる抗抵法則であつて、流路床の形状までもこれを用いて求めるには、前述したように不十分であるといわねばならない。以上のような考えに基づいて、水面形の変化に応じた関係を求めることを考える。まず(1)式において、(1),(3)および(4)式からえられる $dz/dx=0$ の場合の水面形は、抗抵法則として(3)式を適用すれば求められるが、簡単のために Chézy の係数を一定と仮定すれば、つぎの Brésse の関係になる。

$$J_0\xi = \xi_1 - \xi + (1 - \xi_1^3)\{\theta(1/\xi) - \theta(1/\xi_1)\} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $x = -x'$ とかき、 h_c , h_0 および h_1 ; それぞれ限界水深、等流水深および $x'=0$ における水深、また $h/h_0 = \xi$, $h_c/h_0 = \xi_c$, $h_1/h_0 = \xi_1$, $x'/h_0 = \xi$ であり、 $\theta(1/\xi)$ は Brésse の背水関数である。

つぎに、この関係を(1)式中の h に用い、さらに流路床が安定であるということから、(1)式右辺の第3項に(4)式を適用して z をあらわす関係を求めると、つぎようになる。

$$\frac{dz}{dh} = \frac{\left(1 - \frac{\alpha Q^2}{g h^3}\right) \left(\frac{n^2 Q^2}{h^{10/3}} - \frac{U_0^2}{g h}\right)}{J_0 - \frac{n^2 Q^2}{h^{10/3}}} \dots\dots\dots(6)$$

上式は Chézy 係数を一定と仮定すれば容易に積分されて、つぎようになる。

$$\eta_1 - \eta = \xi_c^3 \left\{ \log \frac{\xi}{\xi_1} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\xi^2} - \frac{1}{\xi_1^2} \right) \right\} - (1 - \xi_1^3) \left\{ \frac{1}{2} \log \frac{\xi^2 + \xi + 1}{\xi_1^2 + \xi_1 + 1} - \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(\xi - \xi_1)}{(2\xi_1 + 1)\xi + \xi_1 + 2} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 $h=h_1$ における z を z_1 として、 $z/h_0 = \eta$ および $z_1/h_0 = \eta_1$ である。

以上によつて、一応 h と z につきそれぞれ境界条件を導入しうる式を展開することができたが、さらにこうした取扱いをくり返すことによつて精度を高めることができるであろう。しかし、これ以上解析的に計算を進めることはできないが、水面形が等流と非常に相違する場合を除いて、以上までの取扱いで十分であろうと考えられる。

(2) 幅が漸変する流路における安定な縦断形状

一般に砂防ダムにおける流路幅は一定ではなく、下流ほど広がっている場合が多い。これは砂防ダムを設ける河谷がU字形をなしていることに依存するわけであつて、こうした点については、次節において考察するので、この節においては流路幅が距離とともに変化する場合を対象として論ずる。河谷が比較的複雑な形状をしており、また河岸に段丘が発達しているような場合には、砂防ダム上流を幅の広がる流路と仮定して考察する方が便利な場合が少なくない。安定な縦断形状を理論的に考察するに当たり、静的に安定は場合と動的に安定な場合とに分けて論ずれば、つぎのようである。

(i) 静的に安定な場合：幅が広い矩形断面とみなしてよいときには、水流の基礎方程式および抗抵法則は(1)および(3)式に対応してそれぞれ次式であたえられる。

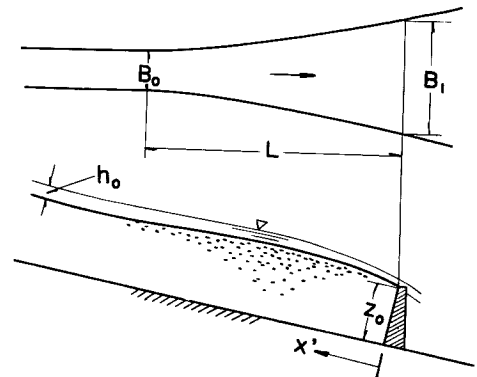


Fig. 2 Schematic sketch of sedimentation and flow upstream of debris barrier in wide stream channel having gradually varied width

$$\frac{\alpha Q^2}{g h^2 B^3} \frac{dB}{dx'} - \left(1 - \frac{\alpha Q^2}{g h^3 B^2}\right) \frac{dh}{dx'} = J_0 + \frac{dz}{dx'} - \frac{\tau_0}{\rho g h}, \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\tau_0 = \rho g n^2 Q^2 / h^{7/3} B^2, \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 B は水路幅であり、 x' は **Fig. 2** に示すように下流から上流方向にとる。また河床の砂礫がすべて掃流限界にあるわけであるから、(9) 式から次の関係を満足すべきことになる。

$$\rho g n^2 Q^2 / h^{7/3} B^2 = \tau_c (= \rho U_c^{*2}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

さて、対象とする流路全体について砂礫の特性が同一であるとし、さらに n が一定であるものと考えて、前節に述べた第1近似に対応した結果として、(10) 式を (8) 式に代入することにより、 $x'=0$ において $z=z_0$ を満足する次式がえられる。

$$z_0 - z = J_0 \left\{ x' - \int_0^{x'} \left(\frac{B}{B_0} \right)^{6/7} dx' \right\} + h_0 \left\{ \left[\left(\frac{B_0}{B} \right)^{6/7} - \left(\frac{B_0}{B_1} \right)^{6/7} \right] + \frac{1}{2} \frac{\alpha Q^2}{g h_0^3 B_0^2} \left\{ \left(\frac{B_0}{B} \right)^{2/7} - \left(\frac{B_0}{B_1} \right)^{2/7} \right\} \right\}, \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 h_0 は **Fig. 2** に示すように、砂防ダム上流に流路幅 B_0 の部分における等流水深であり、また B_1 は $x'=0$ における流路幅である。

さらに、流路幅が直線的に変化する場合を取り扱うことにすれば、

$$\left. \begin{aligned} z/z_0 &= \eta, \quad x'/z_0 = \xi', \quad h_0/z_0 = a, \quad B_1/B_0 = b, \\ z_0/L &= c, \quad B/B_0 = b - (b-c)\xi', \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

なる無次元量を用いることによつて、(11) 式はつぎのように変形される。

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - J_0 \left[\xi' + \frac{7}{13} \frac{1}{c(b-1)} \{ [b-c(b-c)\xi']^{13/7} - b^{13/7} \} \right] \\ &\quad - a \{ [[b-c(b-1)\xi']^{-6/7} - b^{-6/7}] + \frac{1}{2} F_{r_0}^2 [[b-c(b-1)\xi']^{-2/7} - b^{-2/7}] \}, \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 $F_{r_0}^2 = \alpha Q^2 / g h_0^3 B_0^2$ である。

またこのときの水面形は $B=B_1$ における水深を h_1 とし、 $h/h_1 = \xi'$ を用いて (10) 式から、

$$\xi' = (B_1/B)^{6/7} \quad \dots\dots\dots (14)$$

によつて与えられるが、前節に述べたように以上は一つの近似法であることはいうまでもなく、とくに幅の広がる直線流路においてみられるように、境界条件が流路の途中で入るような場合や、水深がかなり大きくてたとえ下流端で境界条件が入つたとしても、(14)式がほとんど成立しないと考えられるような場合には、前節と同じ手法によつて水面形に境界条件を入れうるような計算を進める必要があるわけである。

(ii) 動的に安定な場合：この場合に対しては、最近矢野および大同あるいは杉尾らによつて理論的な考察が行なわれ、また実験や実在砂防ダムへの適用が試みられているので、ここではこうした場合の堆砂形状をあらわす関係をなるべく一般的にあらわすことを考える。まず基礎方程式は (8) および (9) 式によつてあたえられ、また流砂量に関しては (2) 式が成立するものと仮定すれば、河床が動的に安定であるという条件は、 $q_s B = \text{const.}$ であたえられるから、(2) 式によつて、

$$K dU^* \{ (U^*/V_s)^2 - (U_c^*/V_s)^2 \}^m B = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (15)$$

となる。対象とする流路を通じて砂礫の特性が同一で定数 K および m が一定であつても、(9) 式を適用して (15) 式を満足する水面形の関係を直接うことは困難であるので、 $U^{*2} \gg U_c^{*2}$ の場合を対象とすることにして、(15)式右辺カッコ内の第2項を省略し同様な計算を行なえば、(14)式に対応した次式がえられる。

$$\xi' = (B_1/B)^{12m/7(2m+1)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

したがって、(16) 式を (8) 式に代入して (11) 式に対応した関係をつくれば、つぎようになる。

$$z_0 - z = J_0 \left\{ x' - \int_0^{x'} \left(\frac{B}{B_0} \right)^{\frac{2(6m-7)}{7(2m+1)}} dx' \right\} + h_0 \left\{ \left(\frac{B_0}{B} \right)^{\frac{12m}{(2m+1)}} - \left(\frac{B_0}{B_1} \right)^{\frac{12m}{(2m+1)}} \right\} \\ + \frac{h_0}{2} \left(\frac{\alpha Q^2}{g h_0^3 B_0^2} \right) \left\{ \left(\frac{B_0}{B} \right)^{\frac{2(2m+1)}{7(3m+1)}} - \left(\frac{B_0}{B_1} \right)^{\frac{2(2m+1)}{7(3m+1)}} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

また Kalinske および Brown のように $m=2$ の場合は、上式はつぎようになる。

$$z_0 - z = J_0 \left\{ x' - \int_0^{x'} \left(\frac{B}{B_0} \right)^{2/7} dx' \right\} + h_0 \left\{ \left(\frac{B_0}{B} \right)^{24/35} - \left(\frac{B_0}{B_1} \right)^{24/35} \right\} \\ + \frac{h_0}{2} \left(\frac{\alpha Q^2}{g h_0^3 B_0^2} \right) \left\{ \left(\frac{B_0}{B} \right)^{22/35} - \left(\frac{B_0}{B_1} \right)^{22/35} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

さらに、流路幅が直線的に変化する場合を取り扱うことにすれば、(12) 式の関係をも (17) 式に適用して次式がえられる。

$$\eta = 1 - J_0 \left[\xi' + \frac{7(2m+1)}{2m+21} \frac{1}{c(b-1)} \left\{ \left\{ b - c(b-1)\xi' \right\}^{\frac{2m+21}{7(2m+1)}} - b^{\frac{2m+21}{7(2m+1)}} \right\} \right. \\ \left. - a \left\{ \left\{ b - c(b-1)\xi' \right\}^{-\frac{12m}{7(2m+1)}} - b^{-\frac{12m}{7(2m+1)}} \right\} + \frac{a}{2} F_{r_0}^2 \left\{ \left\{ b - c(b-1)\xi' \right\}^{-\frac{2(2m+7)}{7(2m+1)}} \right. \right. \\ \left. \left. - b^{-\frac{2(2m+7)}{7(2m+1)}} \right\} \right] \dots\dots\dots (19)$$

また上式において $m=2$ の場合はつぎようになる。

$$\eta = 1 - J_0 \left[\xi' + \frac{7}{9} \frac{1}{c(b-1)} \left\{ \left\{ b - c(b-1)\xi' \right\}^{9/7} - b^{9/7} \right\} \right] \\ - a \left\{ \left\{ b - c(b-1)\xi' \right\}^{-24/35} - b^{-24/35} \right\} + \frac{a}{2} F_{r_0}^2 \left\{ \left\{ b - c(b-1)\xi' \right\}^{-22/35} - b^{-22/35} \right\} \\ \dots\dots\dots (20)$$

以上によつて動的に安定な縦断形状をあらわす関係式がえられたわけであるが、前節において述べたような考慮が必要な場合には、前述したような便法を遂行しなければならないであろう。

(3) U 字形河谷における安定な縦断形状

一般に河川の上流部で砂防ダムが設けられるようなところでは、河谷はU字形を呈している場合が多い。こうした河谷における安定な縦断形状は前述した取扱によつては、その現象をすべて説明することはできない。とくに、普通砂防ダム上流における流路幅が下流ほど広くて、距離とともに変わつていくことは、河谷がU字形をなしていることに原因しているものと考えられるので、こうした現象を含めて説明しようという安定な縦断形状の計算方法について述べてみたい。

(i) 静的に安定な場合：まず河谷をU字形断面をもつ一つの *prismatic channel* と考えることにし、その形状を Fig. 3 に示すように、次式によつてあらわすことにする。

$$B = \beta z^\gamma \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 β および γ はともに一つの河谷について一定であると考えられる定数である。もし砂防ダム上流の河谷が一つの *prismatic channel* と考えることができない場合は、(21) 式中の定数 β および γ が一定と考えられるような適当な区間に分けて逐次計算を進めればよいであろうから、ここでは (21) 式であらわされる場

合のみを対象として考察を進める。

水流の基礎方程式および掃流力との関係式は、(8)、(9) および (10) 式がそのまま用いられるので、まず (14) 式に対応した関係を (21) 式を用いてかきかえれば、次式ようになる。

$$\xi' = \eta^{-6\gamma/7} \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 ξ' は $z=z_0$ における水深を h_1 としたとき $h/h_1=\xi'$ であらわされる。

(22) 式を (8) 式に代入して安定な縦断形状をあらわす次式がえられる。

$$\xi' = \int_{\eta}^1 6 a' \gamma \frac{(1 - F_{r_1}^2 \eta^{2\gamma/7}) - 7\eta^{(6\gamma/7+1)}}{7\eta^{(6\gamma/7+2)} (H\eta^{2\gamma/7} - J_0)} d\eta \dots\dots\dots (23)$$

ここに、

$$a' = h_1/z_0, F_{r_1}^2 = \frac{\alpha Q^2}{g(\beta z_0^\gamma)^2 h_1^3}, H = \frac{n^2 Q^2}{(\beta z_0^\gamma)^2 h_1^{10/3}} \dots\dots\dots (24)$$

である。(23) 式の右辺は仮定した **prismatic channel** の特性によつて (24) 式の諸量を求め、適当な方法たとえば図式積分などによつて容易に計算することができる。

(ii) 動的に安定な場合：河谷の断面形をあらわす (21) 式を (8)、(9) および (15) 式に適用することによつて、この場合の安定な縦断形状を求めることができる。まず前述した場合と同様な取扱いのもとに (12) 式を (15) 式に適用すれば、(16) 式に対応する水深の関係として次式がえられる。

$$\xi' = \eta^{-\frac{12m}{7(2m+1)}\gamma} \dots\dots\dots (25)$$

上式を (8) 式に代入して動的に安定な縦断形状をあらわすつぎの関係がえられる。

$$\xi' = \int_{\eta}^1 \frac{12m}{7(2m+1)} a' \gamma \eta^{-\left\{\frac{12m}{7(2m+1)}\gamma+1\right\}} \left[1 - F_{r_1}^2 \eta^{-\frac{2(\gamma-4m)\gamma}{7(2m+1)}}\right] - 1}{H\eta^{-\frac{2(\gamma-4m)\gamma}{7(2m+1)}} - J_0} d\eta \dots\dots\dots (26)$$

さらにまた、Kalinske および Brown のように $m=2$ の場合には、つぎようになる。

$$\xi' = \int_{\eta}^1 \frac{24a'(1 - F_{r_1}^2 \eta^{2/35}) - 35\eta^{59/35}}{35\eta^{59/35} (H\eta^{2/7} - J_0)} d\eta \dots\dots\dots (27)$$

このときの水面形は (25) 式から、

$$\xi' = \eta^{-24/35} \dots\dots\dots (28)$$

によつてあたえられる。

以上静的および動的に安定な縦断形状をあらわす関係について述べたが、これらはその取扱いからして前述した場合と同じく第 1 近似というわけであるから、さらに水面形に対してとくに距離的な加速度の項が大きく影響する場合、たとえば下流をせきあげたような場合や水路の途中に支配断面を生ずるようなときには、(1) において述べたような方法によつて計算する必要がある。しかし、一般に砂防ダム上流の流れは水深が小さく Froude 数がかかなり大きい場合が多いので、以上述べた取扱いによつてもかなりその安定な縦断形状を説明しうと思われる。

3. 安定な堆砂形状に関する実験

前章において述べた理論的考察を実験的に検討するために、つぎのような実験を行なつた。

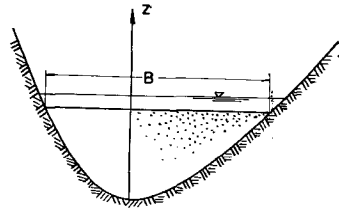


Fig. 3 Schematic sketch of river valley with U-shaped section

(1) 幅広の矩形断面一様水路における場合

(i) 実験水路および実験方法：実験

水路は、幅 20 cm、長さ 8.5 m の合成樹脂板製のもので、その最下流端に一辺 3.5 cm の正三角形断面をもち、その角にまるみをつけた模型のせきを設け、またせき上げの装置をつくり、任意に下流水深を変化しうるようにした。

まず水路床が一様な場合に与えられた勾配および流量に対して、輸送可能な流砂量をあらかじめ実験によつて求めておく。同じ勾配および流量に対して、その流砂量を上流から補給しながら堆砂形状の時間的変化を、下流端から 50 cm の間隔に取り付けたスケールによつて測定した。堆砂形状が時間的に変化しないようになったときをもつて、安定な堆砂形状と定め、そのときの水面形をも測定した。使用した砂は 5 mm のフルイを通過して 2.5 mm のそれにとどまるもので、比較的一様と考えられる。

(ii) 実験結果とその考察：Fig. 4

は下流端を段落にした場合の堆砂高さの時間的変化の一例を示したものであり、また同図にはこのときの下流端から流出

する流砂量の時間的変化をも示した。この場合の時間の原点は、堆砂がせきに到達したときを採用している。両者を比較して、堆砂高さがほとんど一定となつても、なお流砂量に著しい変動のあることがわかるが、これはもつぱら下流端付近の水理量とくに河床面の状態が流砂量に大きく影響するためであろう。Fig. 5 はこの場合の安定な堆砂形状と計算結果との比較であつて、このように十分 Froude 数が大きい場合には、第 1 および第 2 近似とも堆砂形状は水路床にはほとんど平行で、実験結果もよくこの事実を示している。Fig. 6 は、下流端をせき上げた場合における静的に安定な堆砂形状を示したものであつて、堆砂形状が水路床に平行でなく、水面形の変化に対応していることがわかる。これらの図中にはいずれも (2) において述べた理論的な考察にもとづく計算結果が示してあるが、とくに Fig. 6 から明らかなように、第 2 近似として計算した堆砂形状は、かなりよく実験結果と一致している。

以上の結果から、幅広矩形断面の一様水路における安定な縦断形状は Froude 数が十分大きい場合には、ほとんど水路床に平行であるということがわかる。また Froude 数が小さい場合で、たとえばせき上げ背水の場合に対しても前述した近似的な取扱いによつて、かなり実験結果を説明することができる。

(2) 幅が拡がる水路の場合

幅が拡がる水路のうち、その幅が直線的に変化する場合に対して動的に安定な堆砂形状については、すでに矢野および大同行が行なつており、解析の基礎にした方程式が同一であることや、またその堆砂勾配をあらわす関係が (20) 式と同一であることから、ここではその実験は省略し静的な場合のみを行なつた。

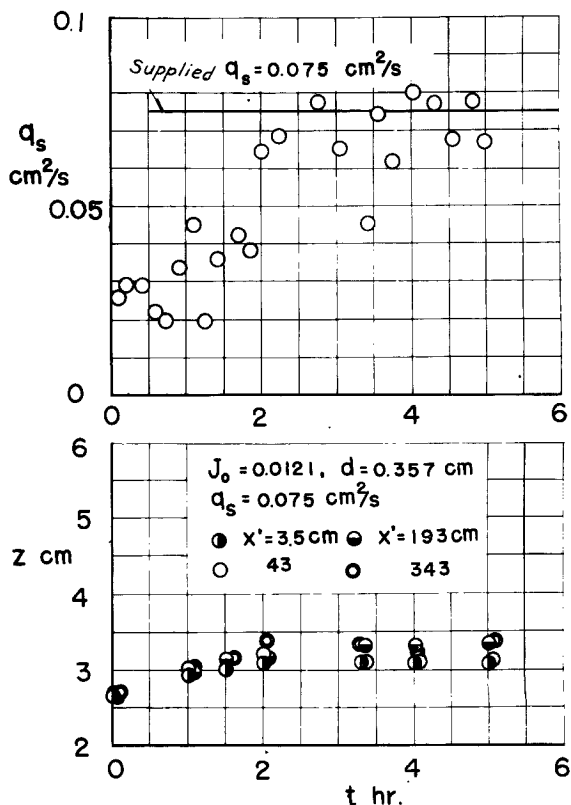


Fig. 4 Variations in height of sedimentation and rate of sediment transportation with time

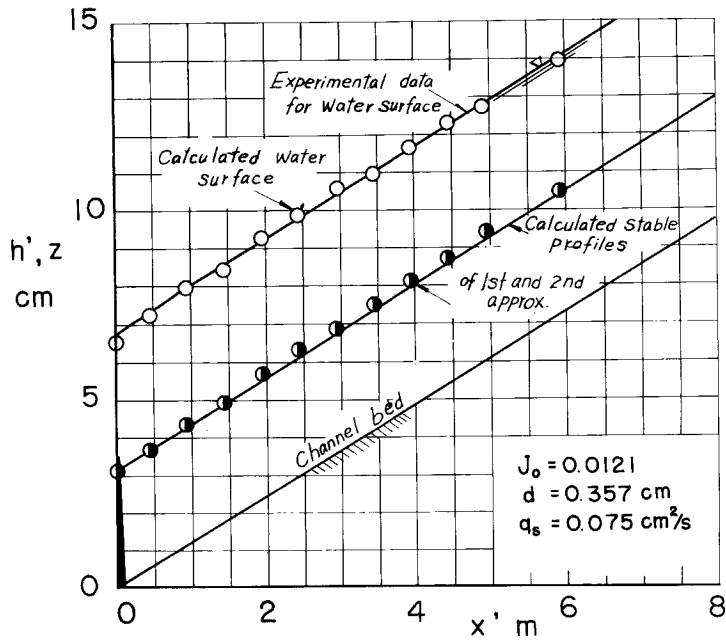


Fig. 5 Comparison of theoretical curve for stable profile and experimental result (1)

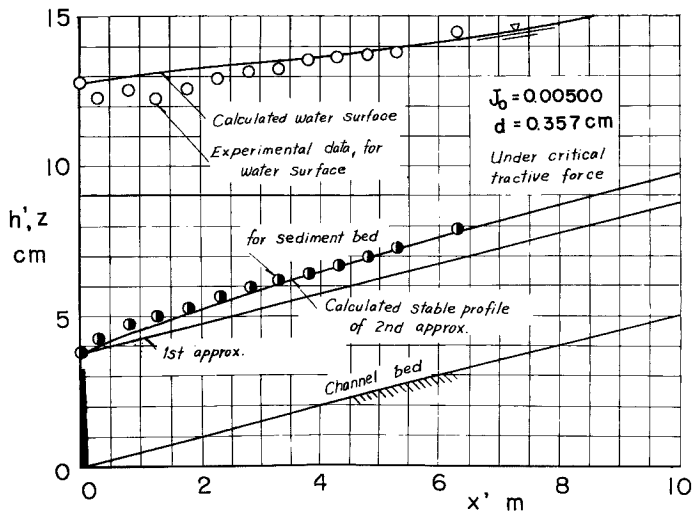


Fig. 6 Comparison of theoretical curve for stable profile and experimental result (2)

(i) 実験水路および実験方法：Fig. 2 において $B_1=19$ cm, $B_0=7$ cm および $L=200$ cm で水路幅が直線的に変化する総延長 8.5 m の水路を合成樹脂板でつくり，その下流端に高さ 3.7 cm の模型のせきを設けた。使用砂は 2.5 mm のフルイを通過し，1.7 mm のそれにとどまる比較的一様な大きさをもつものである。

上流の水深を限界掃流力に対応した水深に保ち，限界掃流力付近で流送される流砂量をあらかじめ同一勾配の一樣断面水路によつて測定し，これに相当した砂粒を上流より補給しながら堆砂形状の時間的変化を測定した。

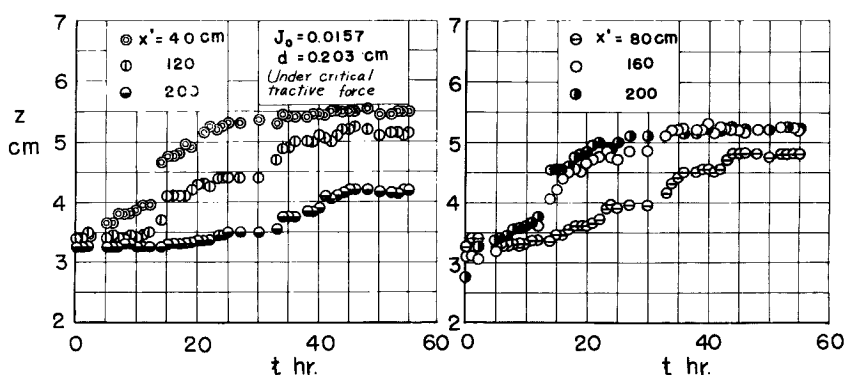


Fig. 7 Variations in height of sedimentation with time

(ii) 実験結果とその考察：Fig. 7 は各測定位置における堆砂高さの時間的変化を示したものである。この結果から最終的に一定となつたと考えられる 55 hr 後の堆砂高さをもつて安定な堆砂形状と定め，前節(2)で述べた計算結果と比較したものが Fig. 8 である。この場合，砂礫面は若干変動したが，実験値はそれらの横方向の平均値を示している。この結果によれば，両者は十分一致するものと考えられる。この計算結果は，すでに述べたように解析方法としては第1近似であるにもかかわらず，このような堆砂形状を説明するという事は，一樣水路の場合と同様に Froude 数が比較的大きく，水面形を支配する境界条件よりも，水路幅が広がるという効果の方が，より大きく安定な堆砂形状に影響を与えるということを示しているのであろう。

(3) V字形断面の水路における場合

三角形断面をもつ水路における安定な堆砂形状に関する実験結果について説明すれば，つぎのようである。

(i) 実験水路および実験方法：実験水路は Fig. 6 に

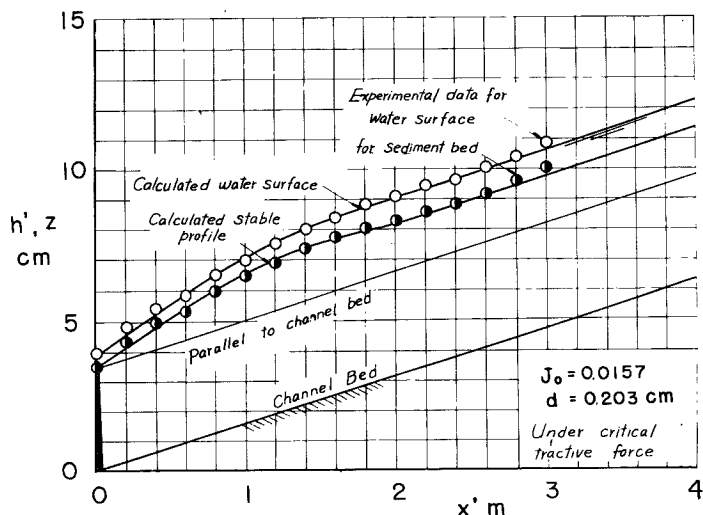


Fig. 8 Comparison of theoretical curve for stable profile and experimental result (3)

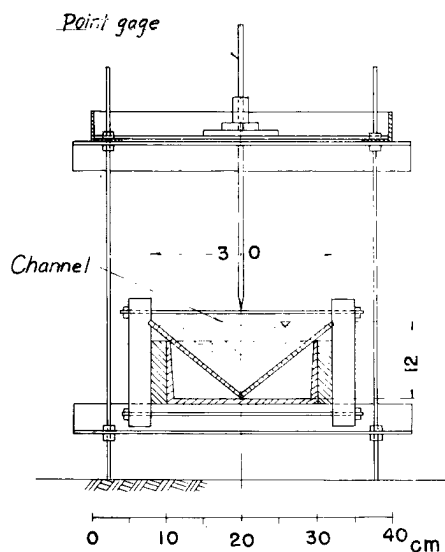


Fig. 9 Experimental stream channel having V-shaped section

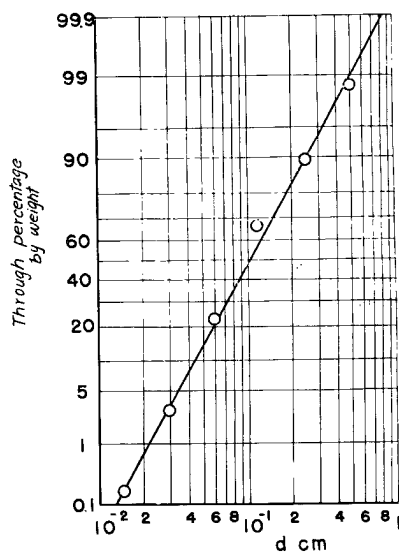


Fig. 10 Sieve analysis curve of used sands

示すような断面をもつ長さ 9m の木製水路であつて、上流には前述した場合と同じ給砂装置が設けられ、また下流端には模型のせきがとりつけられている。

使用した砂礫のフルイ分け結果は Fig. 10 に示すとおりであつて、かなり標準偏差の大きい混合砂礫である。これは砂防ダムの砂礫の質の調整すなわちフルイ分け作用と一緒に検討するために、こうした特性をもつ砂礫を用いたわけであつて、つぎに述べる実験結果に対する考察においては、この点についても簡単に述べるつもりである。実験方法は前述した場合と同様であるから、省略することにする。

(ii) 実験結果とその考察：

Fig. 11 はせきから流出する流砂量の時間的变化の一例

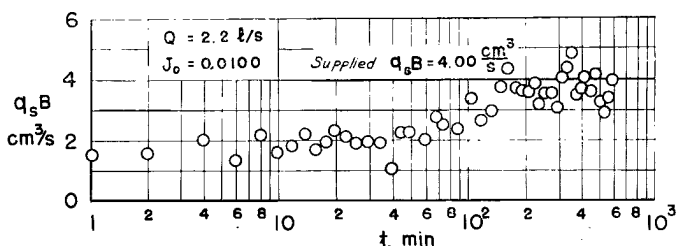


Fig. 11 Variation in rate of sediment transportation with time

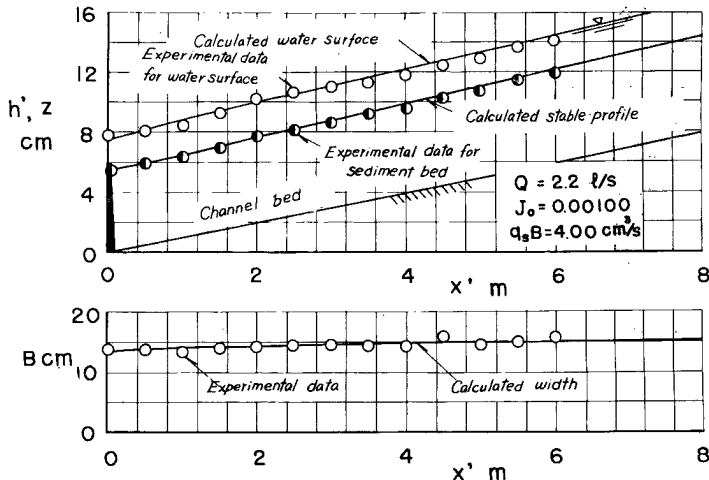


Fig. 12 Comparison of theoretical curve for stable profile and experimental result (4)

を示す。Fig. 12 は Fig. 11 において流砂量が給砂量にほとんど一致したと考えられる状態における堆砂形状と前節(3)でのべた方法による理論的な安定縦断形状とを比較した結果である。この結果によれば両者はかなりよく一致するようであり、また水深が小さく Froude 数が大きいので、堆砂形状は水路床にほとんど平行になることがわかる。また Fig. 13 はこのときの堆砂面を構成する砂礫の大きさの分布を示したものであり、水深があまり変化しないことから、この分布もほとんど一様であることがわかる。

なお Fig. 14 はせきから流出する流砂の特性の時間的変化を示したものの一例であつて、粒径は堆砂がせきに到達した直後において最大を示し、その後次第に減少して給砂のそれに近づくという傾向を示している。また標準偏差はせきに到達直後が小さく、漸次増大して一定値に近づくという傾向を示しており、こうした条件における水流のフルイ分け作用の一つを知ることができる。とくに前者の特性は通常いわれている砂防ダムにおける砂礫の質の調整作用とは全く相違した結果であるけれども、Fig. 10 に示したような砂礫で図中に示したような条件で堆砂させた場合には、砂面上におかれた礫の限界掃流力に関する著者らの研究⁴²⁾成果を参考にして考察した結果によれば、むしろ当然な結果と考えることができたが、この研究の主題と若干相違するので、ここではその説明やさらに詳しい実験結果については省略する。

以上砂防ダムの上流における終局的な堆砂形状を対象として、流路の安定縦断形状に関する若干の実験結果とその理論曲線との比較について述べたが、これらの結果からつぎのように結論してもよいであろう。流路の安定縦断形状を考察することは前節において述べたように極めてむずかしい問題であつて、とくに流水のフルイ分け作用を考えるべきであると考えられるが、以上の考察においてはこうした点についてはほとんど考慮していない。しかしながら、以上述べたような仮定に基づく理論的考察の結果でもかなりよく実験的現象を説明するようである。したがってこれらの考察の結果が実際に砂防ダムの上流における堆砂形状や河川の縦断形状とかなり一致するのであれば、また同時に終局的堆砂形状とともなう現象をうまく説明することができれば、工学上十分実用性があるものと考えてよいであろう。こうしたことから、

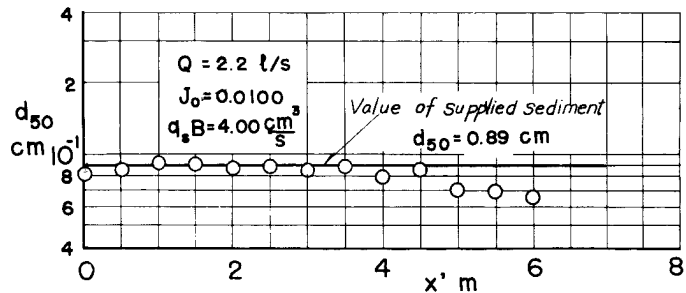


Fig. 13 Relation between median diameter of sands constituting movable bed and distance

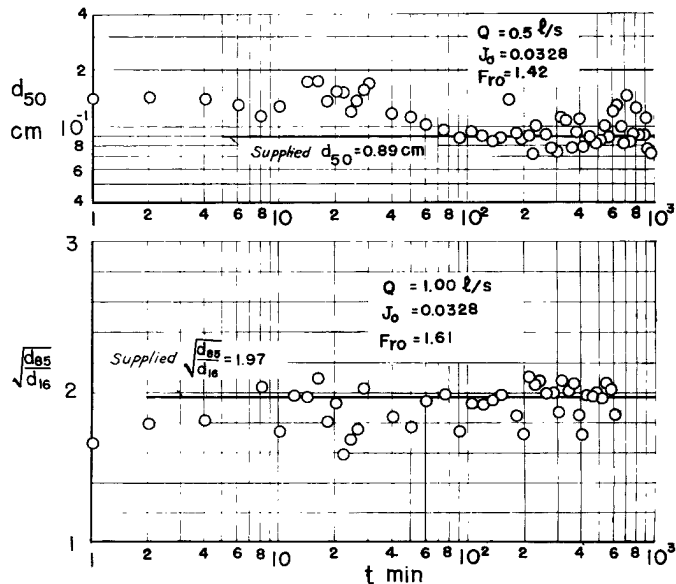


Fig. 14 Variations in characters of transported sediments with time

次章においては実際問題への適用について説明するつもりである。

4. 砂防ダム上流における堆砂形状への適用

以上考察した諸結果を実在砂防ダムの上流における終局的な堆砂形状に適用した結果について述べよう。ここでとりあげた砂防ダムは矢野および大同によって考察された宇治川の支川犬打川に設けられているものと、著者が実測をした黒部川の小屋平堰堤の二つであつて、その上流における堆砂形状を考察しようとするわけである。なお前者は河床砂礫の大きさがかなり小さく、これに反して後者はかなり大きな礫で河床面が構成されている。そしてまた砂防ダムの堆砂形状に対しては従来第2章(2)において述べたと同様な方法による考察がなされてきたことから、ここでは主として(3)で述べた方法の適用という点についてのみ考察し、最後に全体的な議論、とくにこうした取扱い方法の実際問題への適用における問題点について簡単に述べることにしよう。

(1) 犬打川の砂防ダムの上流における堆砂形状への適用

まずこの河谷の形状を求める必要があるので、砂防ダム設置前における旧河床の縦断図から、基準となる流路床を直線と仮定してその流路床からの高さや河谷の幅との関係を探る結果が Fig. 15 である。この結果から測点番号 5 付近を除いてはほぼ一つの単純な形状によつてあらわし得ることがわかる。

Fig. 16 は Fig. 15 に直線で示したようにこの河谷を三角形断面と仮定し、矢野および大同が推定した洪水流量と著者が床河砂礫の実測値から推定した粗度係数を用いて動的に安定な縦断形状を計算した結果と、河床砂礫の大きさとして 0.89 cm を用いて計算した静的に安定な縦断形状とを示したもので

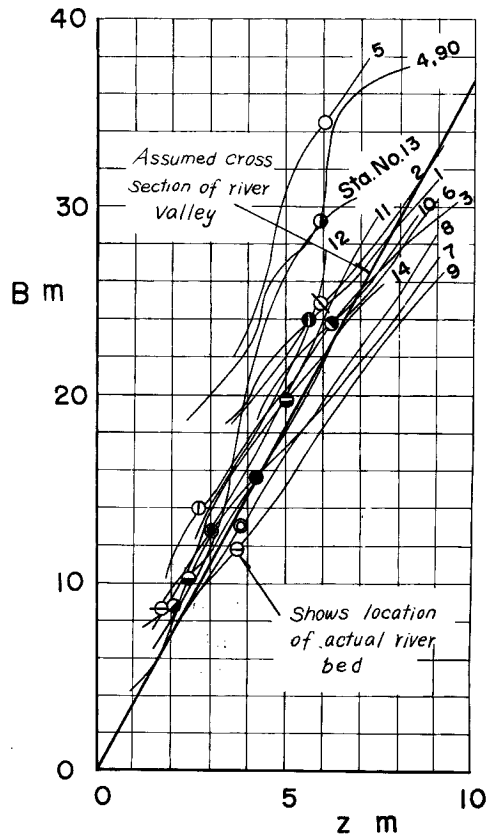


Fig. 15 Shape of river valley upstream of debris barrier in Inuuchi River

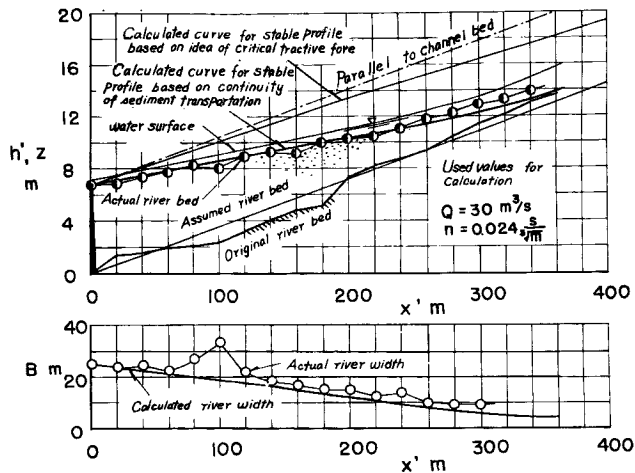


Fig. 16 Comparisons of theoretical curves for stable profiles of bed and width of stream channel corresponding to stable profile with sediment transport and observed data

ある。この結果から、以上による計算方法によつてかなり終局的な堆砂形状を説明できることがわかる。また図中には動的に安定な場合の流路幅の距離的な変化に対する理論結果と実測結果すなわち現在の流路幅との比較を示したが、この結果から堆砂にともなう流路幅の変化を一応推定することができることがわかるであろう。なお、Fig. 16 には動的に安定な場合の他に静的に安定な縦断形状を示したが、後者は実測値に較べてかなり上方にあらわれており、また静的に安定であるという水理学的な条件から、結局的な堆砂形状に対する一つの極限的な形状に相当しているとも考えられるのが、この点については後述するつもりである。

つぎに Fig. 17 は流路面を構成している砂礫の大きさの距離的な変化を示したものである。砂防ダム上流における砂礫の大きさは、前述した堆砂形状および流路幅の距離的变化にともなう水流の変化とくに掃流力の変化に起因するフルイ分け作用に左右されるものであつて、前述したように理想的には堆砂形状の推定とともに、この問題も解明されなければならない。こうした考察の第1歩として、ここでは河床砂礫の大きさの距離的变化の傾向について、簡単につぎのように考えることにした。後述するように、洪水の終りにおいては、近似的に限界掃流力の条件に一致して流送砂礫が堆積するものと考えて、流路床面を構成している砂礫の大きさの距離的变化を考察したのである。図中 $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$ に対応した曲線は動的に安定な堆砂形状の場合、その流量で掃流限界にある砂礫の大きさの分布を、限界掃流力に関する研究をもとにして推定した結果であり、また $Q=0.192 \text{ m}^3/\text{s}$ として示したものは、同様に動的に安定な堆砂形状において、ダム地点で掃流限界にある砂礫の大きさが

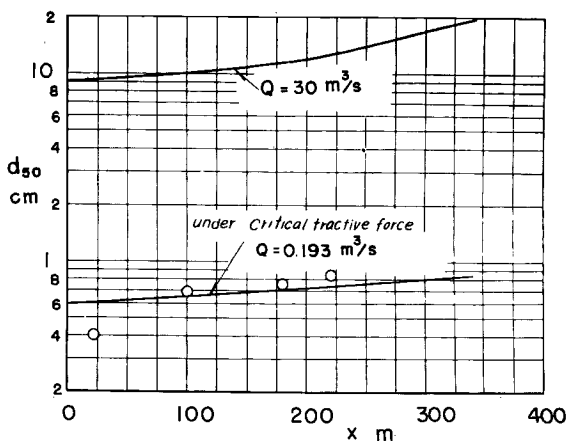


Fig. 17 Variation in median diameter of sands and gravels constituting bed of stream channel with distance

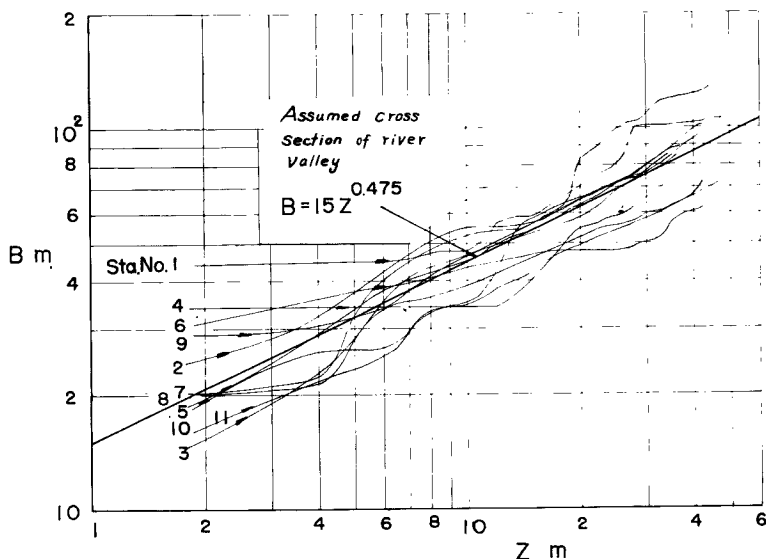


Fig. 18 Shape of river valley upstream of Koyadaira Dam in Kurobe River

0.6 cm であるとして、距離的な変化を計算した結果である。これらから、一応砂防ダム上流の堆砂面における砂礫の大きさの変化を見出すことができるが、これは水流のフルイ分け作用に深く関連するわけであるから、極めて興味深いことといえよう。

(2) 黒部川小屋平堰堤上流における縦断形状への適用

この小屋平堰堤は黒部川本川に設けられている発電用堰堤であつて、高さ 31 m、堤頂幅 102 m である。現在貯水池内はほとんど土砂が堆積し、堤頂まで堆砂が及んでいる。(1)で述べたと同様に、この堰堤の上流における河床の縦断形状について考察すれば、つぎのようである。

まず Fig. 18 は堰堤上流における河谷の形状を Fig. 15 と同様に求めた結果である。この結果によれば各測点においてかなり河谷の横断形状が相違しているけれども、近似的に図中に直線で示した関係によつてあらわすことにする。また、Table 1 は河床面に存在する砂礫の大きさを測定した結果であるが、通常いわれているような系統的な距離的な変化はみられないようである。

Table 1 Relation between median diameter of sand gravels and distance from Dam

Distance from Dam x (m)	Median diameter of sand gravels d_{50} (cm)
460	11.2
560	17.6
850	17.1
950	13.6
1150	13.7

Fig. 19 は Table 1 に示した種々の砂礫の大きさと洪水流量 1940 m^3/s を用いて、Fig. 18 に示した横断形状をもつ流路における静的な安定縦断形状を計算し、実測結果と比較したものである。また Fig. 20 は同様な流路に対して動的に安定な縦断形状を計算して、実測結果と比較した結果であるが、この場合 Manning の粗度係数の値は砂礫の大きさに対応して推定したものである。これらの結果から静的または動的に安定な縦断形状をそれぞれ砂礫の大きさおよび粗度係数によつて大きく変化することがわかる。たと

えば、Fig. 19 に示した静的に安定な場合には砂礫の大きさとして $d_{50}=17.6$ cm を用いた理論曲線はかなり実測結果と一致していることがわかる。そして砂礫の大きさを大きくすると堆砂が増し勾配が急になる。

つぎに Fig. 20 の場合には $n=0.0408$ sec/ $m^{1/3}$ を用いた理論曲線が最も実測値に一致しているようであり、また n の値による堆砂形状の変化はかなり大きいことがわかる。しかしながら、Fig. 19 と Fig. 20 を較べると、河床砂礫からあまり多くの問題点なく推定できる前者の方がよく実測結果を説明するようにみうけられる。

また Fig. 21 は以上の理論的考察から得られた縦断形状に対応した流路幅の変化と実測値とを比較したものである。実測した流路幅はかなり複雑な変化を示しているが、 $d_{50}=17.6$ cm を用いて計算した上述の理論曲線に対応したものはかなり実測値に一致していると考えてよいであろう。なおこの場合に対する河床砂礫の大きさの距離的变化に関しては考察をしなかつたけれ

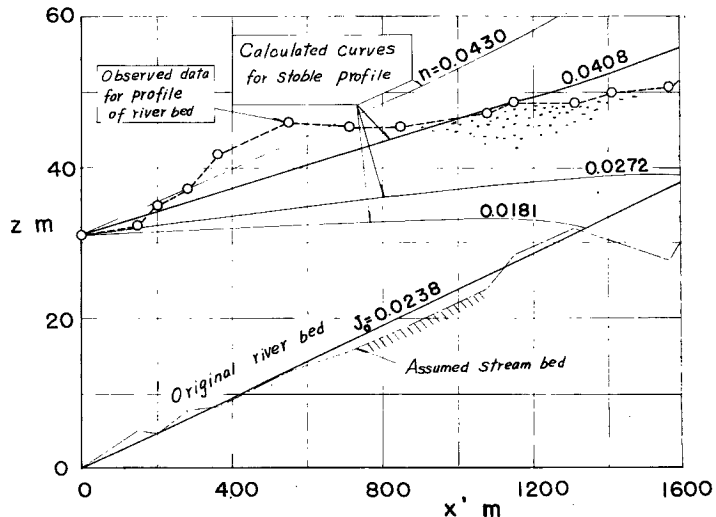


Fig. 19 Comparisons of theoretical curves for stable profiles of bed under critical condition for sediment movement and observed data of Koyadaira Dam

ども、Fig. 17 の場合と同条に取り扱えば、かなり Table 1 に示した実測値の傾向を明らかにすることができるであろう。

(3) 実際問題への適用における二、三の問題

以上実在の流路における安定な縦断形状の解明に対して適用した結果について述べたが、ここではそうした適用における問題点について簡単に考察しておきたい。

第2章のはじめに述べたように流路の安定縦断形状に関する研究は、当然水流のフルイ分け作用も考慮に入れて考察を進めなければならないが、現状では極めて困難であるから、以上のような方法で追求してきたのである。したがって根本的な問題においては不明確な点が極めて多いので、ここではそうした実用的な方法の適用という点について簡単に考えてみよう。

以上説明した二つの適用例から明らかなように、第2章で述べた方法によつてかなりこの問題を実用的に解明することができる。とくに適用例においては第2

章(3)において述べた方法だけを適用したが、他の方法でもたとえば杉尾あるいは矢野および大同のように、実用的にはかなり満足な結果を得ることができるであろう。しかしながら、以上の適用に当つては、静的に安定な場合には代表的な砂礫の大きさを、また動的に安定な場合には Manning の粗度係数の値をいかに定めるかということが問題になつてくるわけである。これらに関しては前述したように、前者に対しては河床を構成している砂礫のの大きさの平均値を用いることによつて十分満足な結果を得ることができるようであるが、一方後者の場合においては直接流砂の問題と関連することからそこには多くの問題点がある。しかしながら、流れの抵抗法則に関する最近の成果を適当に応用することによれば、適用例(1)において述べたように、かなり適確に現象を説明することができる。

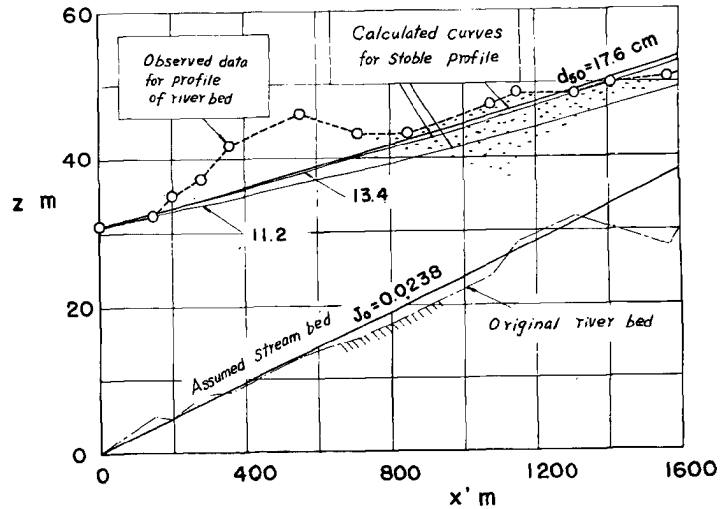


Fig. 20 Comparisons of theoretical curves for stable profiles of bed with sediment transport and observed data of Koyadaira Dam

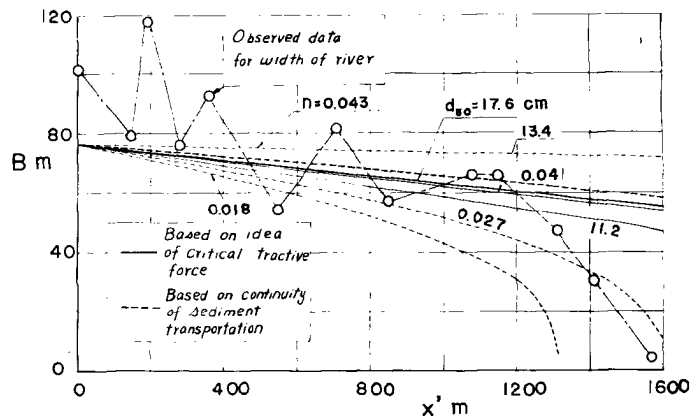


Fig. 21 Comparisons of theoretical curves for width of stream channel corresponding to stable profiles and observed data of Koyadaira Dam

つぎに実際問題への適用にあたって、前述した静的あるいは動的に安定な堆砂形状が、たとえば砂防ダム上流における終局的な堆砂形状とどのような関係にあるかという点について考察してみよう。このうち動的に安定な堆砂形状の場合は、流砂が存在して河床が安定であるというわけであるから、たとえばある洪水流が十分長い間継続して河床が形成される場合に相当する。しかしながら一般には流量がしばしば変化することから、そうした意味での代表的な流量すなわち支配流量を決定することは極めてむずかしいので、前述した適用例においては一応洪水流を推定して用いたのだが、以上のような取扱いによれば、一応動的に安定な堆砂形状を説明することができるであろう。

一般に砂防ダム上流における堆砂面を構成している砂礫は、洪水中に移動するものよりその大きさがかなり小さいものと考えられる。これは一つの洪水中、その逓減部のある時期において、流送されてきた砂礫が流量の減少によつて停止するわけであるから、その限界はそれまでに形成された堆砂形状に依存するはずである。また移動していた砂礫が停止する限界の条件は、限界掃流力の場合とは当然本質的に相違するが、実用的には限界掃流力の条件と一致するものと考えてよいであろう。このような条件に規定されて、堆積した砂礫の特性は距離的に特徴づけられるということの他に、もし洪水の逓減部がその付近の流量で堆砂形状が安定なものに近づくほど十分に長ければ、砂防ダム上流における堆砂形状は、動的に安定な場合よりも静的に安定な場合に近くなるであろう。さらに両者の考え方の相違から、一般に後者の条件による堆砂形状は前者に較べてかなり急となり河床が上昇することが、前述した適用例によつても明らかであるから、このような点を考慮すると、従来砂防ダムの調節勾配あるいは洪水勾配として考えられてきた堆砂の上限に対応した一つの極限的なものを与えるであろうことが推論される。

以上のように考えてみると、前述した二つの適用例は結果的にはそれぞれ動的に安定な場合および静的に安定な場合に相当しているように考えられるが、それがどのような原因に基づくかは明確ではない。むしろ静的に安定な場合の理論曲線に実際の堆砂形状が一致するということは、堆砂の経過に依存するのであつて、たとえば砂防ダムの上流における崩壊の大小によるのであろう。これらの議論についてはなお多くの問題点があるわけであり、したがつて実際の応用を主目的にして考える場合にも、数多くの砂防ダム上流における堆砂形状に適用して、十分な考察を行なわなければ、明確な結論を得ることはできないであろう。

5. 結 語

以上流路の安定縦断形状に関する研究の二、三の成果について述べた。この場合水理学的に満足な結論をうるためには、安定な縦断形状の形成にともなう流路床砂礫の粒度変化とくに水流のフルイ分け作用との関連において考察すべきことはいままでもないが、そうした取扱いが極めて困難であることから、実際的な要求に応じられる手法によつて、安定縦断形状を理論的に考察したのである。一方実験を行なつて、そうした取扱いの妥当性を確かめたが、実際問題への適用にあたってはなお多くの問題点があることから、二つの適用例について説明し、その適用方法を明らかにするとともに、問題となる二、三の点について考察を行なつて、一応実際面への適用が可能であることを示した。

最後にこの研究を行なうにあたって終始御指導を賜つた石原藤次郎教授および岩垣雄一教授、ならびに名工大橋本規明教授に深く謝意を表するとともに、実験および計算に熱心に協力していただいた高木、青野、須山および安藤の諸君に感謝する次第である。またこの研究が昭和32年度文部省各個研究費による研究の一部であることを付記する。なお、この研究は昭和33年11月土木学会中部研究発表会において発表して大部分の研究成果をとりまとめたのであるが、都合で論文の投稿をのばしていたことをつけ加えておきたい。

参 考 文 献

- 1) Lane, E.W. : Stable Channels in Erodible Materials, Trans. A.S.C.E., Vol. 107, 1937, pp. 123-142.
- 2) Lane, E.W. : Progress Report on Studies on the Design of Stable Channels by the Bureau

- of Reclamation, Proc. A.S.C.E., Vol. 79, Sept. No. 280, 1953, pp. 1-31.
- 3) Lane, E.W. : The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering, Proc. A.S.C.E., Vol. 81, Sept. No. 745, 1955, pp. 1-17.
 - 4) Lane, E.W. : Design of Stable Channels, Trans. A.S.C.E., Vol. 120, 1955, pp. 1234-1279.
 - 5) Bruun, P. and Gerritsen, F. : Stability of Coastal Inlets, North-Aolland, Amsterdam, 1960.
 - 6) Blench, T. : Hydraulics of Sediment-Bearing Canals and Rivers, Evens, Vancouver, B.C., Canada, 1951.
 - 7) Blench, T. : Regime Theory for Self-Formed Sediment-Bearing Channels, Trans. A.S.C.E., Vol. 117, 1962, pp. 383-408.
 - 8) Fortier, S. and Scobey, F.C. : Permissible Canal Velocities, Trans. A.S.C.E., Vol. 89, 1926, pp. 940-984.
 - 9) Ning Chien : Graphic Design of Alluvial Channels, Trans. A.S.C.E., Vol. 121, 1956, pp. 1267-1292.
 - 10) Terrell, P.W. and Borland, W.M. : Design of Stable Canals and Channels in Erodible Materials, Trans. A.S.C.E., Vol. 123, 1958, pp. 101-115.
 - 11) Maddock, T.Jr. and Leopold, L.B. : The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications, Professional Paper 252, Geological Survey, U.S. Dept. of the Interior, 1953, pp. 1-56.
 - 12) Leopold, L.B. and Wolman, M.G. : River Channel Patterns ; Braided, Meandering and Straight, Geological Survey, Professional Paper 282-B, 1957, pp. 39-84.
 - 13) Wolman, M.G. and Leopold, L.B. : River Flood Plains ; Some Observations on Their Formation, Geological Survey, Professional Paper 282-C, 1957, pp. 87-107.
 - 14) Simons, D.B. : Theory and Design of Stable Channels in Alluvial Materials, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng., Colorado State Univ., Colorado, 1957, pp. 1-394.
 - 15) Simons, D.B. and Albertson, M.L. : Uniform Water Conveyance Channels in Alluvial Materials, Proc. A.S.C.E., Vol. 85, No. HY 5, 1960, pp. 33-99.
 - 16) Lane, E.W. and Carlson, E.J. : Some Factors Affecting the Stability of Canals Constructed in Course Granular Materials, Proc. Minnesota Int. Hyd. Conv., I.A.H.R., 1953, pp. 37-48.
 - 17) Carter, A.C., Carlson, E.J. and Lane, E.W. : Critical Tractive Forces on Channel Side Slopes, Hydraulic Laboratory Report No. Hyd-366, U.S. Bureau of Reclamation, 1953, pp. 1-4.
 - 18) Lane, E.W., Lin, P.N. and Liu, H.K. : The Most Efficient Stable Channel for Comparatively Clear Water in Non-Cohesive Materials, Colorado State Univ., Research Foundation, Civil Eng. Section, Colorado, 1959, pp. 1-49.
 - 19) Shlits, S. : Fluvial Morphology in Terms of Slope, Abrasion, and Bed Load, Trans. A.G.U., Vol. 17, 1936, pp. 440-444.
 - 20) Shlits, S. : Rational Equation of River-Bed Profile, Trans. A.G.U., 1941, Vol. 22, 1941, pp. 622-631.
 - 21) Shlits, S. : Graphical Analysis of Trend Profile of a Shortened Section of River, Trans. A.G.U., Vol. 36, 1955, pp. 649-654.
 - 22) 物部長穂 : 水理学, 岩波書店, 昭26, p. 260.
 - 23) 安芸皎一 : 河相論, 岩波書店, 昭26, p. 66.
 - 24) 鷺尾鰲龍 : 荒廃河川処理の一例としての常願寺川改修計画, 新砂防, 6, 昭26.11, pp. 1-59.

- 25) 広住富夫：安定勾配の実用式に就いて，新砂防，7，昭27.2，pp. 8-10.
- 26) 谷 勲：堰堤背後貯砂勾配について，新砂防，7，昭27.3，pp. 25-29.
- 27) 谷 勲：特殊な場合の堰堤貯砂勾配について，新砂防，18，昭30.8，pp. 17-20.
- 28) 谷 勲：砂防堰堤の土砂調節機能について，新砂防，18，昭30.6，pp. 21-24.
- 29) 戸塚 誠：赤谷砂防堰堤に於ける堆積に関する実験的研究（第1報），新砂防，18，昭30.8，pp. 10-16.
- 30) 鷺尾蟄龍：貯砂勾配と貯砂量，新砂防，20，昭31.2，pp. 19-22.
- 31) 鷺尾蟄龍：常願寺川の土砂移動調査及び之に基づく改修計画の大綱，東北大学工学部土木教室研究報告，創刊号，昭32.3，pp. 1-58.
- 32) 柿 徳市：砂防と河川の関連基本式について，新砂防，23，昭31.12，pp. 24-29.
- 33) 木村喜代治：貯砂勾配の一推定法，新砂防，23，昭31.12，pp. 16-18.
- 34) Sugio, S. : On the Equilibrium Bed Slope in a Steady Nonuniform Flow, Jour. of the Faculty of Eng., Shinshu Univ., 1957, pp. 31-43.
- 35) 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33.11，pp. 1-6.
- 36) 矢野勝正，大同淳之：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33.12，pp. 51-57.
- 37) 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35.9，pp. 8-16.
- 38) 増田重臣，河村三郎：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35.9，pp. 17-25.
- 39) Iwagaki, Y. and Tsuchiya, Y. : An Analysis of the Stable Cross Section of a Stream Channel, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Bulletin No. 29, pp. 1-27.
- 40) 西平福宏：混合砂礫の二，三の特性とその流砂機構に関する研究，京大修士卒業論文，昭36.
- 41) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，昭31.12，pp. 1-21.
- 42) 岩垣雄一，土屋義人：砂面上におかれた礫の限界掃流力について，土木学会論文集，第41号，昭31.12，pp. 22-38.