

## 礫床水路の流水抵抗に関する研究\*

### Study on the Flow Resistance in Coarse Gravel Bed Channel

重光世洋<sup>1)</sup>      宮島昌弘<sup>2)</sup>  
Seiyo SHIGEMITSU      Masahiro MIYAJIMA

Quantitative prediction of the resistance to flow in natural open channel with a coarse gravel bed is one of the important problems in hydraulic engineering. Flow resistance or friction factors are used principally to derive depth-discharge relation necessary in the waterway design for the water utilities of these hydraulic power use, irrigation and so on, especially in the mountain districts.

In this paper, two kinds of study are performed: (1) Experimentary study on the resistance to flow in a straight rectangular channel with some coarse gravel bed materials and the channel is rigid and rough; and (2) the effect of the thickness of permeable gravel bed layer on the flow resistance.

The writers found that the resistance to fully developed turbulent flow in straight and in rigid regular reaches of coarse gravel bed channel is dependent, largely, on the relative roughness, provided that the surface bed materials are described by the grain size of 50%, or more than 50%, of the weight in size distribution curve.

On the other hand, the resistance to flow is increase considerably with the thickness of gravel layer increase.

A statistical model of this form is  $1/\sqrt{f} = c \log(a R/k_s)$ , where,  $a = \text{antilog}(E \kappa/2.30)$ ;  $c = 2.30/(\kappa\sqrt{8})$ ;  $\kappa = 0.4$  (von Kármán constant); and  $E =$  a coefficient and is function of the thickness of gravel bed layer, channel configuration, characteristic of bed materials, and dynamics of flow properties.

In this study, we have obtained that the friction factor of the gravel bed with permeable layer for the rigid bed may be expressed by the following form:

$1/\sqrt{f_b} = 2.03 [\log(11.09 h/d_i) (h/\Delta)^\eta (I_e)^\xi(\zeta)]$ . where,  $d_i$  is a representative diameter of gravel bed materials; coefficients  $\eta$ ,  $\xi$  and  $\eta$  are function of the parameter  $d_{10}/\Delta$ ;  $d_{10}$  is the effective grain size and  $\Delta$  is the thickness of the permeable gravel bed layer.

---

\*昭和59年3月26日原稿受理

1), 2) 大阪産業大学工学部土木工学科

## 1. 緒 論

自然河川水路において、完全に発達した乱流域における流水抵抗を量的に推定することは水工学および土砂水理学の分野においての重要な課題の一つである。流水の抵抗あるいは水理学的粗度係数は水路の設計および流送土砂量の推定においての水深と流量の関係を導びくために欠くことのできないものである。

自然河川水路の水理学的粗度は一般には次に示す3つの要素に分類される。：(1)表面摩擦抵抗；(2)形状抵抗；そして(3) spill抵抗。表面摩擦抵抗は表面的な河床材料の粗さの関数であり、形状抵抗は砂礫、弯曲、河床波、砂洲のように流れに対して渦および2次流を形成するような特別な境界様相によって起因される抵抗であり、spill抵抗は流れの減加速度に関連するものである。これら各種の形をもった粗度と各種の変数間における関係は複雑多様であり、したがって、それらに対する理解の度合いはいまだに乏しいのが実情であろう。完全に発達した乱流域における流れが等流に近く、水路が対称的であつ直線水路に近い礫床水路で流砂量が少ない場合にあっては、後者の spill 抵抗は一般には無視してもさしつかえがない。

移動床水路の流水抵抗に用いられている接近法は数多くあるが、これらを分類すると、概ね次に示す2つのカテゴリーに分けることができよう<sup>1)</sup>：(1)水路床を固定床として取扱って処理する方法と；(2)移動床をそのまま取扱って処理する方法。後者のカテゴリーにおいてのほとんどは対数式の形で表現している。これまでの多くがこの対数形式でもって表現する理由としては、おそらく土砂水の流れである二相流現象をそのまま式中に取り入れると、その式を用いて実際に計算する場合に、非常に煩雑となり、かつ各種変数を含んでいるため、それを一般化することの難しさにあるものと考えられる。それに加えて、Manning または Chèzy の平均流速公式のように単純ではなく、多くの試行錯誤の段階を経ないとその解が求められないことにも起因する。他方では、移動床の流れに対するすべての現象を包含した適当な資料を入手する困難さと信頼のできる精度の高い現場および実験資料の少なさなどにもよる。

本研究は、工学的な見地から実用性を考え、前者の固定床として取扱って処理する方法について着目し、まずその基本となる表面抵抗の特性を比較的粗い砂礫によって構成された水路床の場合について検討した。この場合の水路の幾何学条件および水理条件は取扱いの容易な矩形断面直線水路とし、かつ流砂量のない平坦な河床を、そして流れは定常等流の場合を対象とする。また、礫床は一般に透水性を有するものであるから、礫床層厚の流水抵抗に及ぼす影響についても検討した。この種の研究は理想化した浸透層モデルを風洞および開水路に用いた実験成果<sup>2),3),4),5)</sup>が発表されているが、自然河川の砂礫材料を用いて検討したものは著者らの知る限りにおいて、著者らが先に行った初歩的実験検討<sup>6)</sup>の外にはいまのところ見当たらないように思われる。

本文は、以上に述べた2つの課題について、粒径の分布の異った数種類の自然河川の河床砂礫を用いて実験室での剛性矩形水路を使用して検討した二、三の結果について報告するものである。

## 2. 抵抗則の表現式

### 2.1 固定床で浸透層がない場合

表現式の展開にあたっての主な考え方としては、まず固定床流水の条件を規定または支配する変数を見出すことである。これらの変数は少ない程都合が良いので、できうれば少ない変数で流水の抵抗が定義できるものが望ましいことは言うまでもない。

Keulegan<sup>7)</sup>によれば、浸透層の存在がなく、かつ粗面乱流域における平均流速 $U$ の基本式は、

Prandtl- von Kàrmàn の速度分布則を適用すると、次式のように書き表わされる。

$$\frac{U}{U_*} = E + \left(\frac{1}{\kappa}\right) \ln\left(\frac{h}{k_s}\right) \quad (2.1)$$

ここに、 $U_*$ =摩擦速度で、 $U_* = \sqrt{ghI}$ である。 $g$ =重力加速度、 $h$ =水深、 $I$ =エネルギー勾配で、定常等流の場合にあっては動水勾配および水路勾配とに等しい。 $E$ =係数で、 $\kappa$ =乱流交換における Kàrmàn の定数で、清水場合  $\kappa=0.4$ である。 $k_s$ は河床表面からの粗度要素の高さで、一般には相当粗度と呼んでいる。

摩擦抵抗係数 (friction factor) として Darcy-Weisbach の式を用いて表現すると、

$$f' = \frac{8ghI}{U^2} = \frac{8U_*^2}{U^2} \quad (2.2)$$

となる。簡単のためにこの  $f'$  を以降において抵抗係数と略称する。

式 (2.2) により

$$\frac{U}{U_*} = \sqrt{\frac{8}{f'}} \quad (2.3)$$

であるから、これを式 (2.1) に代入して、一般式に書きなおすと、

$$\frac{1}{\sqrt{f'}} = c' \log\left(\frac{a'h}{k_s}\right) \quad (2.4)$$

となる。ここに、 $a' = \text{antilog}(E\kappa/2.30)$ ;  $c' = 2.30/(\kappa\sqrt{8})$  である。この式は固定床の粗面水路に対して一様に発達した乱流の Colebrook-White の公式に対応する。清水の場合には、 $\kappa=0.4$ 、したがって  $c' = 2.03$  である。 $a'$  は  $E$  に伴って変化する係数で、水路の幾何学的形状に従属する。Keulegan の理論および諸実験の結果によれば、粗面乱流域における  $a'$  の値は広矩形水路の  $a' = 11.09$  から円形断面管路の  $a' = 14.83$  の範囲に変化する。Keulegan の仮定に基づき、水面幅と水深との比が非常に小さいものを除いた場合、 $a'$  の値は水面幅と水深との比  $B/h$  の一価関数で表わされることが Hey によって検討された。したがって、浸透層のない場合の礫床水路での係数は  $B/h$  によって一義的に決まることになる。礫によって構成される水路は、一般には上流部の山間部に存在することが多く、かつ水面幅と平均水深との比は20以上のものが多いことから、浸透層のない河床の場合にあっては、 $a'$  の値は11.0の近傍になることが予想される。このことから、河床を構成している混合砂礫の代表粒径を相当粗度  $k_s$  で表わすにはどのようにすれば良いかが問題となる。

## 2.2 固定床で浸透層が存在する場合

一般に、粗い砂礫で構成されている自然河川の河床はルーズな粗面であって、河床面下には主流と平行な浸透流を伴い、また河床面を通して水流の出入りが可能となるから、主流と浸透流との間に相互作用が働いているものと考えられる。

礫床の透水係数が小さい場合には、浸透流の影響は無視されうるから、前述の通常の粗面乱流となるが、浸透層が存在する場合には、河床の境界面を通して主流と浸透流との間に動的な作用が生じ、同じ水理条件であっても粗面乱流に較べて浸透層内での乱流によりそれだけの運動量の交換・輸送が活発となり、これによって付加的な応力が発生する。したがって、浸透層<sup>5)</sup>の存在する河川水路での抵抗係数は Nikuradse による粗面乱流での値に比べてかなり大きくなる。このことは透水境界面近くでは、主流の影響を受けて浸透流は相当速く、かつ乱されていることによる付加的な応力の作用に起因するものと考えられる。

このような浸透層上の乱流場において、主流から浸透流へとその境界面を通じて乱れを誘起し、かく乱を与えるのは、まず第一次的には境界面の圧力変動があり、浸透流内へ圧力エネルギーが拡散していくためと考<sup>3)</sup>えている。この動的な作用を理論的および実験的に解明していくことは容易ではない。

ここでは、主流と浸透流との間の動的作用の結果による誘導応力を前節で示した係数  $a'$  の浸透層の存在による値として実験結果から検討することにする。

主流の流速分布を通常の粗面乱流の場合の対数則のかわりに近似的に次式に示す形の対数則を用いることにする。

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y+\delta}{\delta} \right) + \frac{u_p}{U_*} \quad (2.5)$$

ここに、 $u$  = 河床面上  $y$  点における流速； $u_p$  = 浸透層内任意点の水平方向の流速； $\delta$  = 流速分布を対数則に合わせるための移動量で、次式 (2.6) に示す速度欠損則を表わす対数則分布に適合させ得るように選ばれる実験定数であって、“displacement height” に相当するものである<sup>9)</sup>。

$$\frac{u - U_{\max}}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y+\delta}{h+\delta} \right) \quad (2.6)$$

ここで、 $U_{\max}$  は最大平均流速、 $h$  = 水深である。式 (2.5) において、 $y = 0$  とすれば、 $u_p$  は礫床頂での速度となり、いわゆる slip velocity に相当する。また、 $y + \delta = y$ 、 $\delta = k_s$  とした場合には通常の粗面乱流の場合の式に相当する。

式 (2.5) を平均流速で表わし、さらに簡略して表現すると、式 (2.7) のようになる。

$$\frac{U}{U_*} = A + B \log \frac{h}{k_s} + C \frac{U_p}{U_*} + D \quad (2.7)$$

ここで、 $U$  = 主流の平均流速； $U_p$  = 浸透層内の平均流速； $h$  = 水深； $A, B$  = 粗面乱流の修正係数； $C, D$  = 浸透層の存在による修正係数である。

さらに、前述の Darcy-Weisbach の抵抗係数でもって式 (2.7) を書き直すと、次式のようになる。

$$\frac{1}{\sqrt{f_b}} = c' \log \left( \frac{a'h}{k_s} \right) + m \left( \frac{U_p}{U_*} \right) + n \quad (2.8)$$

ここで、 $c' = 2.30/\kappa\sqrt{8}$ ； $a' = \text{antilog}(A \cdot \kappa/2.30)$ ； $m = C/\sqrt{8}$ ； $n = D/\sqrt{8}$ ； $f_b$  = 浸透床を有する場合の礫床の抵抗係数。

<sup>10)</sup> 武内は空隙モデルを用いて、乱流領域における平均浸透流速  $U_p$  を次式のように導びいている。

$$U_p = (\sqrt{K} \cdot N \cdot g \cdot I_e)^{1/2} \quad (2.9)$$

ここで、 $K, N$  は礫床材料の特性および層厚等に対する比例定数で、実験的に求められるものである。

$I_e = \sin\theta - \cos\theta \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$  で、 $\theta$  = 水路の傾斜角； $x$  = 水路と平行に下流へ向って測った距離。

今、簡単のために、式 (2.9) を次式で表わされるものとする。

$$\frac{U_p}{U_*} = \phi \left( \frac{h}{\Delta}, I_e, S_r, C_r, \lambda \right) \quad (2.10)$$

ここに、 $\Delta$  = 礫床層厚； $S_r$  = 礫床材料の形状係数； $C_r$  = 混合礫の粒度分布特性を表わす係数； $\lambda$  = 突隙率。

同一礫床材料に対しては、式 (2.10) は次式のように書き表わされる。

$$\frac{U_p}{U_*} = \left(\frac{h}{\Delta}\right)^\alpha (I_e)^\beta (\gamma) \quad (2.11)$$

Keulegan<sup>1,7)</sup>の実験によれば、固定床でかつ粗面乱流域における広矩形水路の場合に対する水路形状に対する修正係数  $a'$  は前述のとおり 11.09一定であることと、 $\kappa=0.4$ 一定とすると、 $c'=2.03$ 一定であることを利用して、式 (2.8) と (2.11) から  $k_s \approx d_i$  と置けば、

$$\frac{1}{\sqrt{f_b}} = 2.03 \log \left(11.09 \frac{h}{d_i}\right) + m \left[\left(\frac{h}{\Delta}\right)^\alpha (I_e)^\beta (\gamma)\right] + n \quad (2.12)$$

となる。結局、係数  $m$ ,  $n$  は実験資料を用いて統計解析的に求めることができる。なお、均一粒径の礫床については  $k_s \approx d_{50}$ 、混合礫床については  $d_i > d_{50}$  を取れば良い (後述)。

別法として、浸透床を有する抵抗係数は、前述の固定床の式 (2.4) で表現できるとすると、相当粗度  $k_s$  は同一粒径の礫床に対して、

$$\frac{k_s}{d_i} = \phi \left(\frac{h}{\Delta}, I_e\right) \quad (2.13)$$

$$\text{あるいは } \frac{k_s}{d_i} = \left(\frac{h}{\Delta}\right)^\eta (I_e)^\xi (\zeta) \quad (2.14)$$

の関係が存在するとの仮定を利用すれば、

$$\frac{1}{\sqrt{f_b}} = 2.03 \log \left[ \left(a' \frac{h}{d_i}\right) \left(\frac{h}{\Delta}\right)^\eta (I_e)^\xi (\zeta) \right] \quad (2.15)$$

広矩形水路に対して、

$$\frac{1}{\sqrt{f_b}} = 2.03 \left[ \log \left(11.09 \frac{h}{d_i}\right) + \log \left(\frac{h}{\Delta}\right)^\eta (I_e)^\xi (\zeta) \right] \quad (2.16)$$

として書き表わされる。

ここに、指数  $\eta$ ,  $\xi$  及び定数  $\zeta$  は浸透性礫床材料の特性を表わす値である。

### 2.3 側壁影響の補正方法

本研究は2次元定常等流の場合を対象としているので、幅の狭い実験水路における水理実験の結果に対する水理諸量を側壁の影響のない河床面に関係した諸量、例えば河床の摩擦速度や剪断応力など、と対比できるように処理する必要がある。側壁の影響を補正する方法は数々提案されているが、ここでは次式に示す Vanoni-Brooks<sup>11)</sup>の方法を用いる。

$$f_b = f + \frac{2h}{B} (f - f_w) \quad (2.17)$$

(矩形断面の場合)

ここで、 $f$  = 全抵抗係数； $f_b$  = 床面の抵抗係数； $f_w$  = 側壁の抵抗係数； $h$  = 水深； $B$  = 水路幅。

なお、本実験に用いた実験水路に対する予備実験の結果、 $f_w$  はほぼ次式で表わされることが検討されたので、以降の解析はこの式を用いることにする。

$$f_w = 0.457 \left(\frac{gI\nu}{U^3}\right)^{1/4} \quad (2.18)$$

ここに、 $I$  = 動水勾配； $\nu$  = 動粘性係数； $g$  = 重力加速度； $U$  = 平均流速。

### 3. 実験装置・方法及び条件

#### 3.1 実験装置

実験水路は大阪産業大学工学部土木工学科水理実験室に設置してある幅50cm、高さ50cm、長さ15mの矩形断面を有する勾配可変の鋼製水路である。水路の中央部9m区間は両面ガラス張りで、側面により観察できるもので、水路の下流端には水位調節ゲートが設けられている。流量は高架水槽により管路で水路の上流端に設置してある流量測定堰水槽に導びき、そして流量測定堰を越流して、水路上流端の整流水槽に導びき、整流した後に対象とする実験水路内へ導水するようになっている。

流量測定堰の越流水深、実験水路内の水位・水深等は精度 $\pm 0.1\text{mm}$ のポイント・ゲージによった。流速は直径5mmのプロペラ式微流速計を用いて測定した。測定範囲は3～150cm/sec、精度 $\pm 2\%$ 以内である。

礫床内の浸透流量は礫床層厚に対応してボックス形の矩形集水柵（長さ2m）を水路下流端に設置し、主流と浸透流とを分離できるようにした。浸透流量の集水柵による影響を少なくするために、集水柵のボックス内に礫床との接合部分から約1.0m程度の区間に実験対象とする礫床材料と同じものでもって充填した。

#### 3.2 実験方法

まず水路を水平に調整し、所定の礫床材料を所定の層厚になるように水路床上に均一に敷き、次いで層厚に対応する水深になるように水を注入した。この水面上に露出する礫の面積を床面積の50%程度になるように礫床面を平坦になることを留意して調整した。

次に、水路全体を対象とする勾配にセットした後、所定の流量を上流端により導水し、等流状態になるよう下流端の主流量導水壁の角度により調節した。

水位は水路側壁の天端に水路と平行に設置してあるレール上にある移動可能なポイントゲージ測定台を水路中心線に沿って25cm間隔で測定した。

流速分布は水路のほぼ中央に設けた検査断面に垂直方向に5点、水平方向に5点、合計25点を前述の流速計により測定した。浸透流量は水路下流端の浸透流集水柵ボックスより導びき出した水量とそれに対応する時間を用いて算出した。なお、この測定は5回以上繰り返してその平均値とした。

主流流量は上流端に設置してある流量堰により所定の流量に調節した全流量を先に求めた浸透流量で差引いた値とした。

浸透層内の流況を見るために、側壁の所定の数箇所から色素を注入し、その拡散状況をビデオにより撮影した。

#### 3.3 実験条件

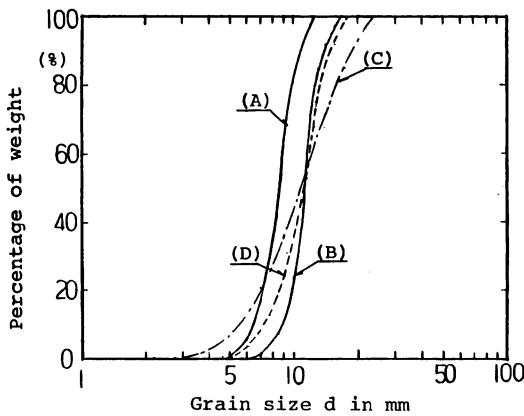
本研究で実施した実験条件は Table. 3.1 に示すように水路勾配4種類、流量6種類、礫床材料4種類、層厚3種類である。

Fig. 3.1 は礫床材料の短軸径に対応する粒度加積曲線を示す。これらの特性を示す数値は Table. 3.2 に示すとおりである。このうち礫床材料、A、Bは比較的均一な粒径で構成されている。

**Table 3.1** Experimental conditions.

Items	Conditions and ranges
Total discharges $Q$ (1/sec)	5, 8, 14, 20, 26, 32
Channel slope $I_b$	1/500, 1/250, 1/100, 1/50
Mean grain size $d_m$ (mm)	9.20, 12.03, 13.00, 11.77
Thickness of gravel bed layer $\Delta$ (cm)*	4, 8, 12
Flow depths $h$ (cm)	2.6 ~ 14.7
Froude Number $F_r$	0.2 ~ 1.08
Reynolds Number $Re$	27000 ~ 231000

\* The thickness of gravel bed layer for the cases of bed material B, C and D are performed only for 4cm.



**Fig. 3.1** Size distribution curves of the gravel bed materials.

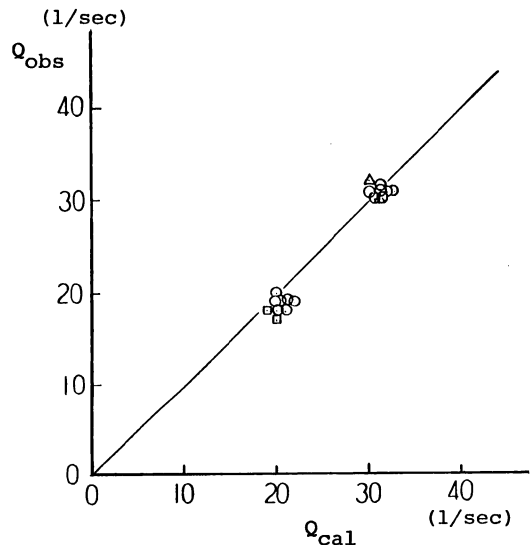
**Table 3.2** Characteristics of gravel bed materials.

Gravel bed materials	A	B	C	D
Mean grain size $d_m$ (mm)	9.20	12.03	13.00	11.77
Medium grain size $d_{50}$ (mm)	8.70	11.40	10.80	10.70
Effective grain size $d_{10}$ (mm)	6.40	8.90	5.60	7.20
Standard deviation $\sigma$	1.239	1.150	1.672	1.297
Specific gravity $r_s$	2.62	2.62	2.62	2.62
Void ratio (%)	40.2	40.2	40.2	40.2
Sphericity	0.708	0.699	0.714	0.705
Sorting Coefficient	1.143	1.118	1.410	1.197

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 浸透流量の検討

前節で述べたように、浸透流量  $Q'$  は水路の下流端で集水桝により測定したため、下流端の低下背水の影響を若干受けるものと考えられるので、その測定精度を検討するため、主流流量を流速分布の測定により推定した値  $Q'_{cal}$  と水路の上流端で供給した全流量  $Q$  を集水桝により測定した浸透流量  $Q'$  との差  $Q'_{obs}$  について比較した。その結果を Fig. 4.1 に示す。この Fig. から判るように  $Q'_{cal}$  と  $Q'_{obs}$  はほぼ同程度であることが推察されよう。このことから、以降の解析検討に用いる浸透流量  $Q'$  は下流端で測定した値とする。したがって主流流量  $Q'$  は  $Q - Q'$  として求めた値とする。



**Fig. 4.1** Comparisons of the observed main flow discharges with the calculated main flow discharges from the measured velocity distributions.

## 4.2 礫床の抵抗係数について

浸透流の存在によって礫床面に発生する付加的な応力による流水抵抗をも含めた主流流量に対応する礫床面に対する抵抗係数  $f_b$  と  $h/d_{50}$  の関係を各礫床材料と層厚についてプロットしたのが Fig. 4.2 ~ 4.7 である。なお、 $f_b$  は前述式 (2.17) に基づいて側壁の影響を除外した値である。図中に示す実験は式 (2.4) に示す固定床の場合の式を適用して、 $f' = f_b$ 、 $c' = 2.03$ 、 $k_s \approx d_{50}$  とした場合の次式に示すフィット曲線である。

$$\frac{1}{\sqrt{f_b}} = 2.03 \log \left( a \frac{h}{d_{50}} \right) \quad (4.1)$$

式中の係数  $a$  は礫床材料の特性と礫床層厚によって異なる値を示すが、全般的には式 (4.1) の形式で表現しえることが判る。広矩形水路で固定床の場合は前述のように  $a = 11.09$  となることから、浸透層の存在に伴う相当粗度  $k_s$  と中央粒径  $d_{50}$  の比は Table. 4.1 に示した値となる。

一般に浸透流の存在しない固定床の場合では  $k_s \approx d_{50}$  (均一粒径に近い砂礫材料の場合) であるから、前表に示すように  $k_s/d_{50}$  の値は 4.0 以上となっていることは、浸透層の存在により流水抵抗が増大することを意味する。

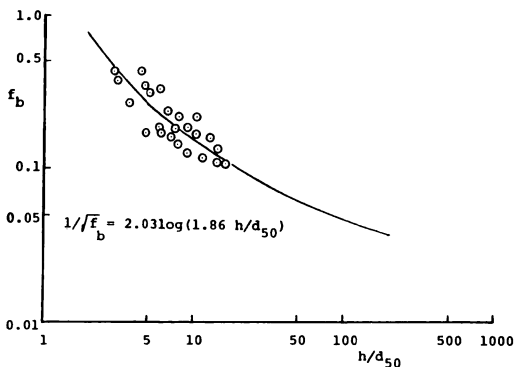


Fig. 4.2 Relationships between the observed friction factors and the relative depths (gravel bed material : A; thickness of the permeable bed layer : 4 cm) .

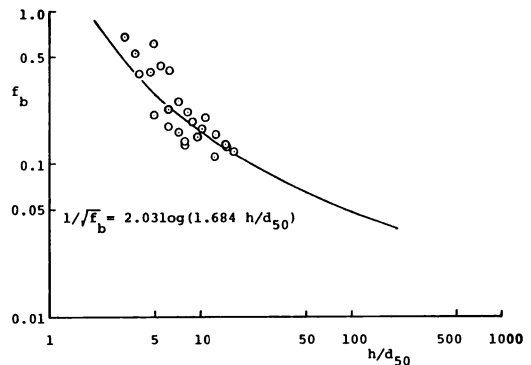


Fig. 4.4 Relationships between the observed friction factors and the relative depths (gravel bed material : A; thickness of the permeable bed layer : 12 cm) .

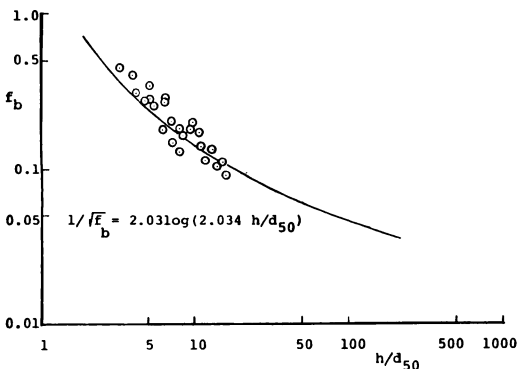


Fig. 4.3 Relationships between the observed friction factors and the relative depths (gravel bed material : A; thickness of the permeable bed layer : 8 cm) .

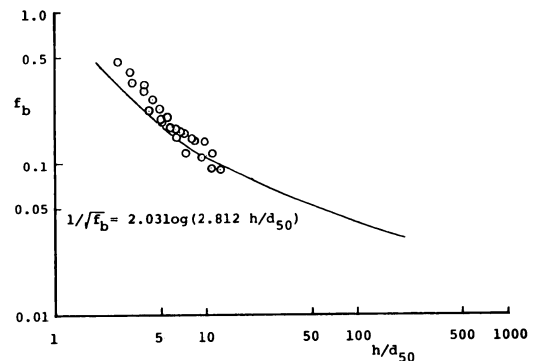


Fig. 4.5 Relationships between the observed friction factors and the relative depths (gravel bed material : B; thickness of the permeable bed layer : 4 cm) .



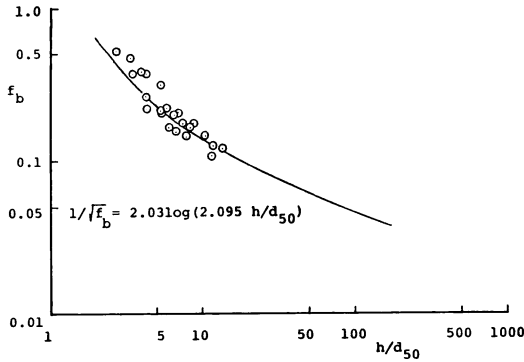


Fig. 4.6 Relationships between the observed friction factors and the relative depths (gravel bed material : C; thickness of the permeable bed layer : 4 cm) .

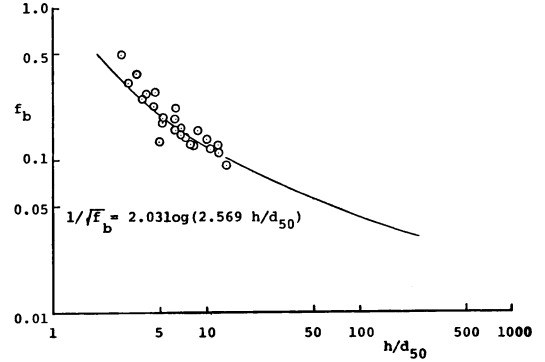


Fig. 4.7 Relationships between the observed friction factors and the relative depths (gravel bed material : D; thickness of the permeable bed layer : 4 cm) .

Table 4.1 The ratios of the equivalent roughness  $k_s$  to the medium grain size  $d_{50}$  : ( $k_s/d_{50}$ ).

Thickness of gravel bed layers (cm)	Gravel bed materials			
	A	B	C	D
4	5.452	3.944	5.294	4.169
8	5.962	—	—	—
12	6.586	—	—	—

12) 参考のために礫床河川について、礫の移動がない場合で、かつ粗面乱流領域にある実河川(35河川)の実測資料に基づいて整理した結果を Fig. 4. 8 に示す。礫床層厚が不明であるため、バラツキが大きくなっているが、 $f$  と  $R/d_{50}$  との関係は前述の式 (4. 1) に示す傾向を呈している。係数  $a$  は全資料で 2.14 となっている。ここに、 $f$  は式 (2. 3) に基づいて算定した  $f'$  に対応する値で、 $R$  は径深である。水深  $h$  に比して河幅  $B$  が広い場合の  $B/h \geq 30$  の資料のみを対象として解析すると、 $a = 2.62$  となり、本実験の礫床材料 D の場合に相当するものとなっている。

### 4.3 礫床層厚の効果

同一礫床材料で礫床層厚が流水抵抗にどの程度影響するかについて平均的に示したのが Fig. 4. 9 である。この図から明らかに浸透層が厚い程、同一の相対水深  $h/d_{50}$  に対して  $f_b$  が大きくなり、したがって流水抵抗も大きくなることが判る。

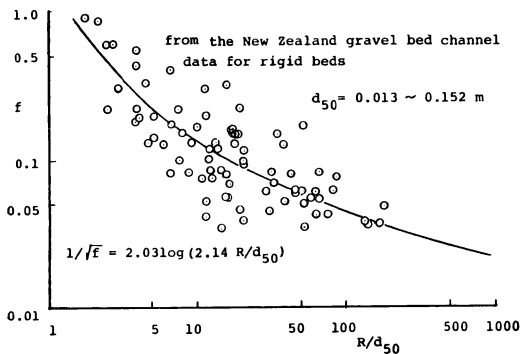


Fig. 4.8 Relationships between the observed friction factors and the relative hydraulic radius.

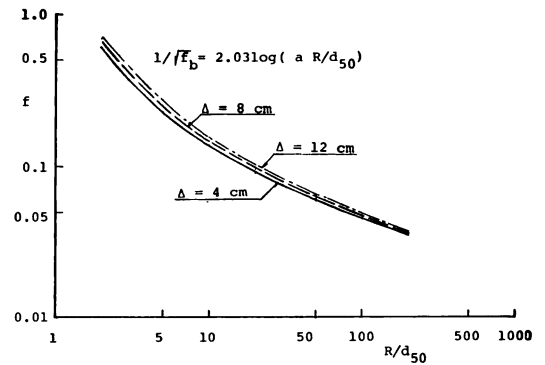


Fig. 4.9 Comparisons the effect of the thickness of permeable bed layer on the friction factors for the case of gravel bed material A.

#### 4.4 代表粒径について

前述のように同一の礫床層厚と中央粒径であっても係数  $a$  は同一の値を示さない。B, C, Dの礫床材料はほぼ中央粒径が等しいのであるが、粒度分布は Fig.3.1 および Table.3.2 に示したように異っている。この3種類の礫床材料のうち、B材料は比較的に均一粒径に近いものであるので、この礫床粒径  $d_{50}$  を用いて推定した係数  $a$  の値、 $a = 2.812$  を対象に、他の礫床材料C, Dの各代表粒径  $d_i$  に対して次式で算定した  $f_{b(cal)}$  の実測値の  $f_{b(obs)}$  に対する自乗平均誤差  $E_s(\%)$  について検討する。

$$\frac{1}{\sqrt{f_b}} = 2.03 \log \left( 2.812 \frac{h}{d_i} \right) \quad (4.2)$$

その結果を縦軸に  $E_s(\%)$ 、横軸に  $d_i/d_{50}$  をプロットしたのが Fig.4.10 である。ここに  $d_{50}$  は各種礫床材料の中央径である。この図から判るように  $E_s$  を最小ならしめる  $d_i/d_{50}$  が存在する。また、粒度分布の範囲が広い程、 $d_i/d_{50}$  の値が大きいところに  $E_s$  の最小値が存在する。このことは同一中央粒径であっても、ふるい分け係数または標準偏差が大きい河床材料程、大きい粒径  $d_i > d_{50}$  をもって代表粒径とすれば、均一粒径で求めた係数  $a$  をそのまま用いることができることを意味する。また、最小の  $E_s$  に対応する  $d_i/d_{50}$  の値は各種礫床材料のふるい分け係数にほぼ等しい値となっていることも興味深い。この問題に対しての定量的評価は今後の研究課題としたい。

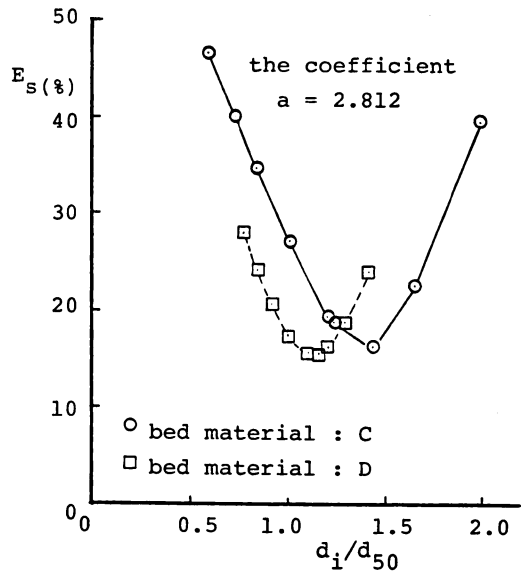


Fig.4.10 Relations between the root mean square errors  $E_s$  and the relative grain size  $d_i/d_{50}$  as the coefficient  $a$  is equal to 2.812 (obtained from the bed material B).

#### 4.5 浸透流速について

主流流速に平行して浸透層内に発生する平均浸透流速  $U_p = (Q^*/B \cdot \Delta)$  に対する表現式は前

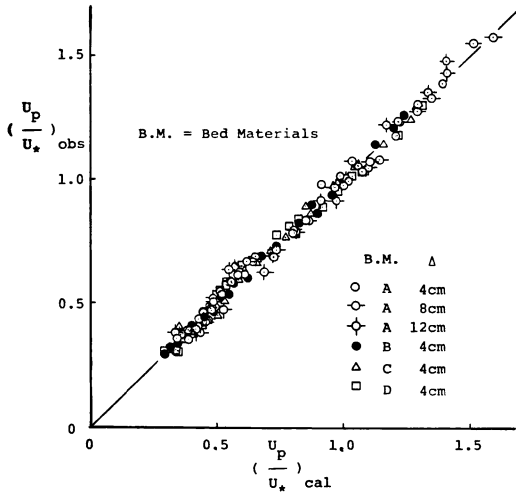
述の乱流領域における武内の表現式(2.9)を適用して検討した結果、適合性が良くなかった。ここで本研究で提示した式(2.11)を用いて検討した結果、各礫床条件に対しての指数  $\alpha$ ,  $\beta$  および係数  $\gamma$  を Table. 4.2 に示す。同表中に示す  $E_s$  はこの推定した指数と係数を用いて算定した  $(U_p/U_*)_{cal}$  の実験値  $(U_p/U_*)_{obs}$  に対する自乗平均誤差率である。この表から知れるように、式(2.11)でもって十分に表現していることが推察される。Fig.4.11 は一例として礫床Bの場合の適合性を示す。

Fig.4.12 は縦軸に  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  の値を、横軸に有効径  $d_{10}$  を礫床層厚  $\Delta$  で割った値、 $d_{10}/\Delta$ 、についてプロットしたものである。同図中に示す線は予想される推定線である。 $\alpha$  の値は  $d_{10}/\Delta$  の増大に伴って増大し、また  $d_{10}/\Delta = 2$  になると、すなわち浸透層が存在しない固定床の場合には  $\alpha = 0.5$  に漸近する。 $d_{10}/\Delta \approx 0$  になると、 $\alpha$  は 0 に漸近することも予想される。 $\beta$  については  $d_{10}/\Delta$  の変化に対して敏感ではないが、その絶対値はほぼ  $d_{10}/\Delta$  の増大に伴って減少する傾向にある。恐らく  $d_{10}/\Delta = 0$  において  $\beta = -0.5$  に漸近するであろう。係数  $\gamma$  については、 $d_{10}/\Delta$  がある値以上になると、 $d_{10}/\Delta$  に対する減小関数となり、 $d_{10}/\Delta = 2$  において 0 となろう。 $d_{10}/\Delta$  の値が前述の値より小さい領域にあっては定かではないが、現象論的には  $d_{10}/\Delta$  の減少に伴って増大する傾向にある筈と推察

されるが、この場合にあっては資料が一箇しかないので、早計ではあるが、逆に減少する傾向を示している。いずれにせよ、この問題については今後多くの資料を収集して検討する必要がある。

**Table 4.2** The obtained coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  in the equation (2.11) for various bed materials.

Gravel bed materials	Thickness of gravel bed layers $\Delta$ (cm)	Effective grain size $d_{10}/\Delta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$E_s$ (%)
A	4	0.16	0.268	-0.400	0.0807	3.95
A	8	0.08	0.212	-0.415	0.1006	4.67
A	12	0.053	0.219	-0.423	0.0927	6.67
B	4	0.223	0.349	-0.377	0.0743	2.01
C	4	0.140	0.259	-0.380	0.0860	4.76
D	4	0.180	0.324	-0.404	0.0649	4.74



**Fig. 4.11** Relationships between the observed relative mean permeable velocity  $(U_p/U_*)_{obs}$  and The calculated  $(U_p/U_*)_{cal}$ .

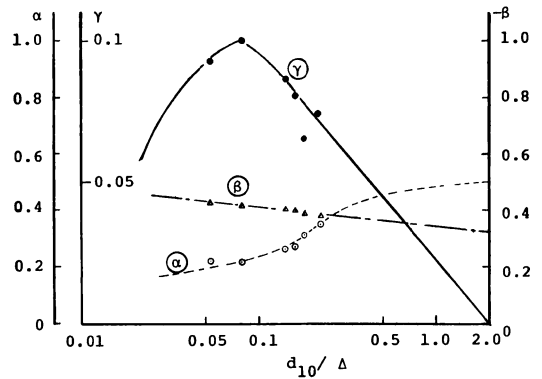
#### 4.6 主流の流速分布について

乱流境界層内における流れを適切に描述するのは流れの inner region と outer region とを識別して始めて可能である。この inner region, あるいは wall region (粘性底層を含む) の層厚は概ね Fig. 4.13 に示す最大流速  $U_{max}$  までの底面から高さ  $\delta_t$  の 0.15 倍で、この層内における流速分布は次式に示す対数流速分布則に従う。

$$\frac{\bar{u}_y}{u_*} = \frac{2.3}{\kappa} \log \left( \frac{y \cdot u_*}{\nu} \right) + C_1 \quad (4.3)$$

ここに、 $C_1$  は表面の粗さに従属する変数である。 $u_*$  は壁面の摩擦速度で、 $u_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$  によって与えられる。 $\tau_w$  は壁面の剪断応力。

Outer region における層厚は  $0.85\delta_t$  程度で、流速分布は近似的に速度欠損則によって表わされる。式 (4.4) は Coles の wake law によって与えられた式である。<sup>13)</sup> (圧力勾配が 0 の場合)



**Fig. 4.12** Relationships between coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  and the effective grain size  $d_{10}/\Delta$ .

$$\frac{U_{\max} - \bar{u}_y}{U_*} = -\frac{2.30}{\kappa} \log\left(\frac{y}{\delta_t}\right) + 1.38 \left[2 - f_n\left(\frac{y}{\delta_t}\right)\right] \quad (4.4)$$

ここに、 $U_{\max}$  は自由流れの最大流速； $f_n(y/\delta_t)$  は修正関数である。

Fig. 4.13 は本実験において測定した二、三の結果をプロットしたものである。同図中の実線は式(4.4)に基づいて作成したものである。この図から知れるように、 $y/\delta_t$  の大きい領域、すなわち河床近傍の領域にあってはほぼ実線に近い結果を示すが、 $y/\delta_t$  の小さい領域、すなわち床面から大きく離れる領域にあっては適合性がわるくなっている。このことは浸透流の存在により、礫床面に働く付加応力の増大に伴うエネルギーの損失の増大、したがって水深の増大に伴って摩擦速度が相対的に増大したためと考えられる。

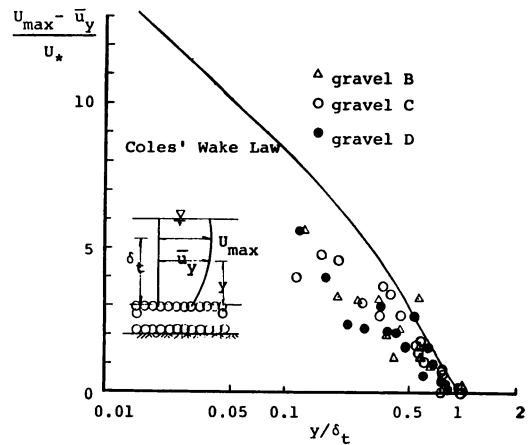


Fig. 4.13 Velocity-defect law after Coles; compared with the present experimental data for permeable rough surface.

#### 4.7 透浸床の存在による抵抗係数の表現式について

Table 4.3 は前述の 4.5 節で検討した無次元浸透流速、 $U_p/U_*$ 、が式 (2.11) で表わされることを利用して式 (2.16) に適用した場合の各種礫床材料と層厚のおのおのについて統計解析して求めた指数  $\eta$ 、 $\xi$  および係数  $\zeta$  を示したものである。同表中に示す  $E_r$  はこれら指数および係数を用いて算定した抵抗係数  $f_b(\text{cal})$  の実測値  $f_b(\text{obs})$  に対する自乗平均誤差率である。 $r$  は  $f_b(\text{cal})$  と  $f_b(\text{obs})$  の相関係数である。なお、礫床材料 C および D の代表粒径  $d_i$  は前述 4.4 節で検討した結果である最小自乗誤差率に対応する粒径、すなわち礫床材料 C の場合は  $d_{84}=1.79\text{cm}$ 、D 材料の場合は  $d_m=1.18\text{cm}$  を用いた。その他の A および B は均一粒径に近いので、 $d_i = d_{50}$  を用いた。この表から、自乗平均誤差率は 10% 程度のオーダーであり、かつ相関係数も 0.9 以上となっていることから、浸透流の存在する礫床水路の抵抗係数は式 (2.16) でもって十分表現できることが推察される。Fig. 4.14 は実測値と計算値との適合状態について示したものである。

Fig. 4.15 は統計解析した結果の指数  $\eta$ 、 $\xi$  と係数  $\zeta$  の有効径  $d_{10}$  と礫床層厚  $\Delta$  との比  $d_{10}/\Delta$  の関係についてプロットしたものである。この図から知れるように  $\eta$ 、 $\xi$ 、 $\zeta$  は  $d_{10}/\Delta$  に対して指数関数的に減少するといったシステマティックな関係が存在する。 $d_{10}/\Delta$  が大きくなると、恐らく  $d_{10}/\Delta \approx 2$  に近づくと  $\eta$ 、 $\xi$  は 0、 $\zeta$  は 1 となることが予想される。すなわち浸透層が存在しない場合には固定床の式 (2.4) または式 (2.16) の右辺第一項のみが存在する式に帰着する。

Table 4.3 The obtained coefficients  $\eta$ ,  $\xi$  and  $\zeta$  in the equation (2.16).

Gravel bed materials	Thickness of gravel bed layer $\Delta$ (cm)	$\eta$	$\xi$	$\zeta$	$r$	$E_r$ (%)
A	4	0.276	0.099	0.240	0.954	14.8
A	8	0.368	0.162	0.381	0.912	16.8
A	12	0.414	0.293	0.768	0.971	12.8
B	4	0.315	0	0.403	0.978	10.4
C	4	0.253	0.0874	0.256	0.948	14.3
D	4	0.205	0.0345	0.240	0.947	12.5

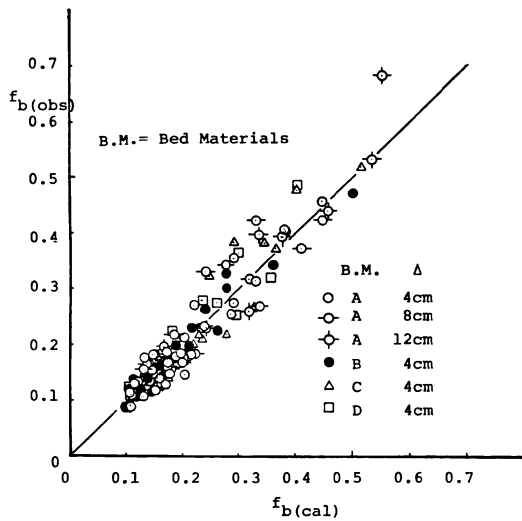


Fig. 4.14 Relationships between the observed friction factors  $f_{b(obs)}$  and the calculated friction factors  $f_{b(cal)}$  from the proposed equation (2.16) .

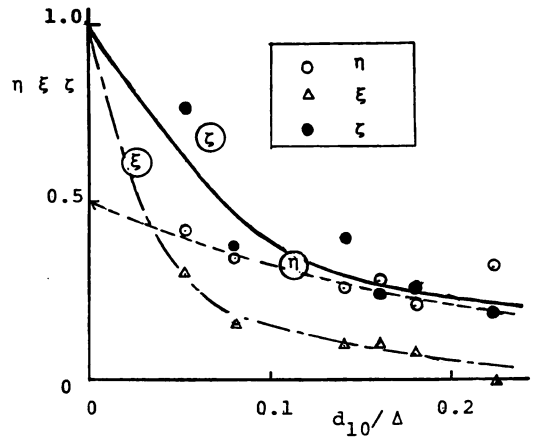


Fig. 4.15 Relationships between coefficients  $\eta$ ,  $\xi$ ,  $\zeta$  and the effective grain size  $d_{10}/\Delta$ .

## 5. 結 論

以上に示す浸透層を有する礫床固定水路についての基礎的な実験検討結果から、次のことが導かれる。

- (1) 浸透層上の礫床の流れの抵抗係数は、非浸透性の同じ粗度をもつ通常粗面上の流れよりも大きい。
- (2) 同じ礫床材料をもつ水路に対しての礫床の流れの抵抗係数は、浸透層厚の増大に伴って増大する。
- (3) 浸透層上の流れの抵抗係数は式 (2.16) によって表わされる。同式中の指数  $\eta$ ,  $\xi$  および係数  $\zeta$  は、概ね有効径と層厚の比の減少関数で表わされる。

今後、浸透層を有する礫床水路上の流れの抵抗係数に対する定式化を計るためには、なお多くの基礎実験資料並びに実河川の資料を収集し検討する必要がある。さらに、浸透層境界面に発生する乱れのエネルギー、浸透層内の流れの挙動等についての諸機構を詳細に調べ、上述の結論をより定量的に説明できるように検討していくつもりである。

最後に、本研究の遂行に当たり、実験資料の収集に御協力を頂いた大阪産業大学工学部土木工学科水理研究室学生(当時)、武内正俊、安田 学、久保勝治、林野浩行、木原博幸並びに鈴木康之諸君に対して感謝の意を表します。

なお、本研究の一部は、昭和58年度大阪産業大学産業研究所特別研究費を受けて行われたものであり、ここに記して謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 重光世洋：移動床水路の流水抵抗について，大阪産業大学論集，自然科学編，69号，1983.
- 2) Zippe, H.J and W.H. Graf : Turbulent Boundary-Layer Flow Over Permeable and Non-Permeable Rough Surfaces, Journal of Hydraulic Research, 21, 1983, No.1.
- 3) 中川博次・祢津家久：透水性開水路乱流場における主流と浸透流との相互作用，土木学会論文報告集，第224号，1975.
- 4) 山田 正・川端規之：浸透層上の流れの抵抗則に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第325号，1982.
- 5) 日野幹雄・山田 正・川端規之・太田明彦：滑面・粗面および浸透層上の流れの抵抗則と乱れの構造，第24回水理講演会論文集，1980.
- 6) 重光世洋・宮島昌弘：流水抵抗に及ぼす礫床層厚の効果について，土木学会関西支部年次学術講演会，講演概要，1983.
- 7) Keulegan, G.H. : Laws of Turbulent Flow in Open Channels, Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol.21, Research Paper 1151, Dec., 1938.
- 8) Hey, Richard D : Flow Resistance in Gravel Bed Rivers, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.105, HY9, 1979.
- 9) Monin, A.S. and Yaglom, A.M. : Statistical Fluid Mechanics, the M.I.T. Press, 1971.
- 10) 武内 等：浸透層内の流れに関する水理学的研究，京都大学学位論文，1972.
- 11) Vanoni, V.A. and Brooks, N.H. : Laboratory Studies of the Roughness and Suspended Load of Alluvial Streams, Report No.E-68, Calif. Inst. Technology, Pasadena Calif., 1957.
- 12) George A. Griffiths : Flow Resistance in Coarse Gravel Bed Rivers, ASCE, HY7, 1981.
- 13) J.O. Hinze : Turbulence, McGraw-Hill Copmany, New York, 1975.