

砂れき床の抵抗則に関する実験的研究

齋藤 隆*・羽田野 袈裟義*・蒲地 政文*・佐賀 考徳**・大成 博文**

Experimentae Study on Flow Resistance over Gravel Surface

Takashi SAITOU, Kesayoshi HADANO, Masafumi KAMACHI, Takanori SAGA, and Hirofumi OHNARI

Abstract

Resistance law of the open channel flow with a small relative water depth is remarkably different from that with a sufficiently large relative water depth. Investigations about the resistance law have not been confirmed. There are many phenomena not to be revealed.

In relation to the resistance law, wall shear stress has been obtained inferably in consideration of the mean velocity distribution or the resistance formula deduced from the logarithmic velocity-distribution law. For flows of thin shear layer with roughness, strong turbulent field attributed to the roughness plays an important role to the resistance law, there are some questions about the deduction of the wall shear stress with preceding considerations,

According to the above point of view, the wall shear stress is measured directly with a servo typed shear stress meter. Using the measured wall shear stress, the virtual wall height, the friction factor of Darcy-Weisbach, Manning's roughness coefficient and Chezy constant are obtained. Using these factors it is shown that the resistance law depends primarily on the roughness Reynolds number for the flow in the completely rough region, although the resistance law depends on the relative water depth under the logarithmic velocity-distribution law.

1. 緒 言

豪雨時、山腹斜面上には薄層流としての表面流出が生じる。この流れの抵抗則は、表面粗度に対して水深が十分大きい流れの抵抗則とはその挙動が著しく異なり、Darcy-Weisbachの抵抗係数が層流流れのような挙動を示し、その絶対値は数桁大きな値であることが明らかにされている^{1)~4)}。急勾配粗面上の薄層流れの抵抗則は流出解析、地表面浸食、土砂輸送などの問題における根本的課題の一つであり、近年、多種多様な粗度形態に対して多くの研究がなされているが、従来の考察が必ずしも妥当でなく、不明確な点が多く残されている。

流れの抵抗則は水工学における基礎的命題として、古くから数多くの研究がなされ、現在は抵抗係数の式形も実用上ほぼ固まり、対数則、Moody図、Manning式、Chezy式などのように広く用いられる結果が得られている。しかし、これまでの研究の大部分は緩勾配

で、しかも相対水深が大きい場合を対象にしており、山腹斜面上や急勾配の溪流で見られるような、粒径と水深とが同程度の大きさである相対水深が小さい粗面薄層流れにおいては、粗度形状、配列によって複雑な挙動を提示するであろうところの粗度に起因する乱れ場が流れの場全体に対して相対的に重要な役割をもつことになる^{5)~7)}と考えられる。粗度近傍の粗度に起因する乱れによる流れ場における平均流速分布、乱れ特性は、現在のところ、十分に解明されているとは云えない。抵抗則に及ぼすこの流れ場の役割を明らかにすることによって、より統一的な抵抗則の表示方法が確立されることになるはずである。この際、粗度に起因する乱れの流れ場は粗度と同程度の大きさであると推定⁸⁾されるので、理論的底面をいかなる高さに定義することによって、各種特性量の分布特性が大きく変わり、結果に対する解釈に大きな影響を与える可能性が強いと考えられる。

粗面水路の抵抗則を検討する場合、抵抗係数の評価値は水深評価値の誤差の3倍の誤差となつてあらわれるので、相対水深が小さい流れではどのような高さを基準にして水深を定義するのが重要な問題となる。

*建設工学科

**徳山工業高等専門学校 土木建築科

この点に関して、半球ならびに均一砂粒粗度の場合、対数分布則を前提とした結果では砂粒上端より粒径の0.25倍下側に理論底面をとるのが適当であるとの結果が報告されている。この結果は相対水深が比較的大きく、平均流速分布の流れの大部分において対数分布則に従う場合であって、相対水深が小さい均一球形粗度に対しては、Chezy 式、Manning 式を適用して、理論河床は粗度頂より0.15倍の粗度径だけ下方にとることが適当であるとの研究成果が得られている。これらの研究は、河床せん断力の直接測定が困難であることから、理論的河床位置の定義が抵抗則に大きな影響のない、相対水深の大きい流れにおいて適合性が確認されている抵抗則でもって理論河床位置を推定している。前述した、粗度近傍における極めて複雑な流れ場が相対的に重要な役割を持つことになるであろうと推測される相対水深の小さい流れにおいては、壁面せん断力、すなわち粗壁面に作用する流体力はその近傍における流れによって規定されるはずであることから、従来の方法によって壁面せん断力、換言すれば、理論河床(仮想壁面位置)を評価することは大きな疑問が持たれる。

上述の観点によれば、粗面開水路抵抗則の普遍的な表示方法としては、粗度近傍における粗度に起因する強い乱れの流れ場の特性を明らかにし、その表示が取り込まれたものであることが必要であると考えられる。この場合、粗度近傍の流れ場を表わす特理量の一つである壁面せん断力は、この外の物理量を規定する基本量の一つであるから、その値の評価は正確であることが必要である。

本研究は、粗面開水路抵抗則の普遍的な表示方法を確立するための基礎資料を得ることを目的としている

もので、仮想壁面位置を直接測定した壁面せん断力から定め、これと流れの代表スケールとの関連、ならびに、抵抗係数、Manning と Chezy の粗度係数の値が流れの場の代表特理量によってどのように挙動するのかを検討したものである。

2. 実験装置, 測定方法, 実験方法

実験水路は、可変勾配式の鉄枠製架台上に設置された。巾が60cm、深さが20cm、長さが600cmの総アクリル樹脂板製の開水路である。

床面の粗度は平均粒径 d が10.0mmのほぼ均一な軽料骨材である。この粗度を水路床全面にわたってペイントで一層に張付けた。粗度粒の下側がペイントで充たされないように、最少限度のペイントで粗度は注意深く張られている。

水面形状は、流れ方向の6断面において、横断方向の3点の床面に設置した静圧管を内径25mmの鉛直マンノメーターヘビニール管を導き、その水位を1/20mmバーニヤ付のフックゲージによって測定することによって求めた。壁面せん断力の測定位置における水深、ならびに水面勾配は、測定した6断面の水位を最少2来法で2次曲線で近似して求めた。

床面せん断力の測定は、水路上流端より350cmの水路中央に設置された零位法によるサーボ式液体せん断力計を用いて行なった。せん断面の大きさは巾8cm長さ8cmの矩形断面で、せん断面上には粗度粒子が周辺の粗度粒子と連続的に配置されるように約70粒子が張付けられている。せん断力計の検定は、床面粗度が張付けられる前の滑面水路で行ない、エネルギー勾配を用いた摩擦速度 $U_* = \sqrt{gHie}$ と出力電圧 E

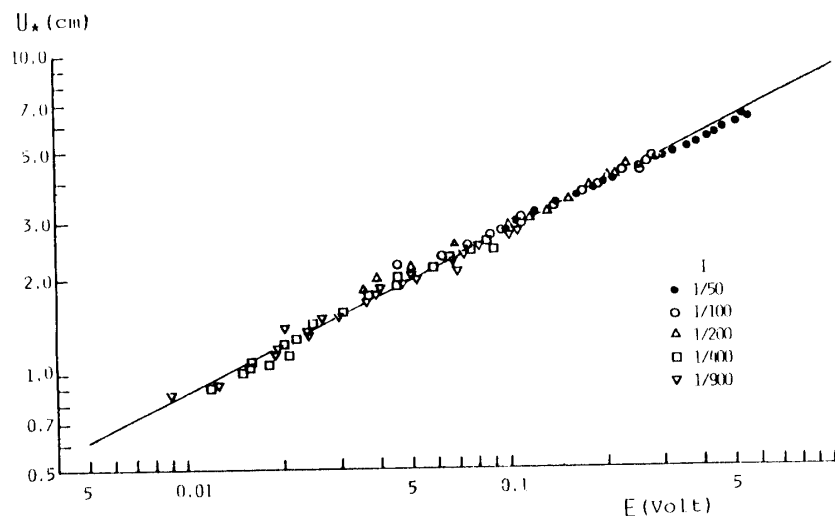


Fig. 1 Calibration curve of shear meter

(Volt)との関係が fig. 1 のように得られた. 図中の直線は次式で表わされる.

$$U_* = 8.75 \sqrt{E} \quad \text{for Range 5gr} \quad (1)$$

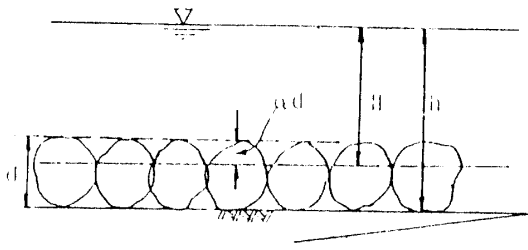


Fig. 2 Definition sketch of virtual wall height and notation

本文中で用いられる水深ならびに仮想壁面位置の定義は fig. 2 に示すとうりである.

3. 実験結果と考察

3.1 仮想壁面位置 (理論河床位置)

砂粒を密に敷きつめた水路の等流流れにおける水深を定義する位置, すなわち仮想壁面位置を砂粒粗度頂から ΔH だけ下方にあるものとする. ΔH に関する物理量は, 水深 H , 断面平均流速 V あるいは単位巾当りの流量 $q = VH$, 河床粗度粒径 d , 河床勾配 I , 動粘性係数 ν , 重力の加速度 g であるとして次元解析を行なうと, 次式が得られる.

$$\alpha = \frac{\Delta H}{d} = \varphi_1 \left(\frac{H}{d}, \frac{VH}{\nu}, \frac{U_* d}{\nu}, I \right) \quad (2)$$

直接測定した摩擦速度 U_* と水面形状とからエネルギー勾配を用いて試算によって求めた水深 H から得られた α の値を式(1)の無次元量に対して描点したものが Fig. 3~Fig. 5 である.

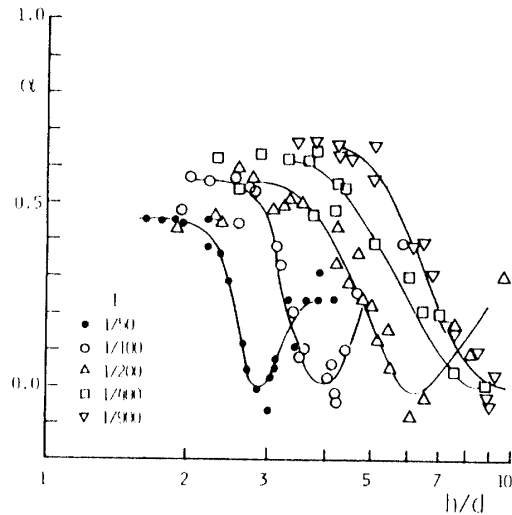


Fig. 3.1 Relation between virtual wall height and relative roughness h/d

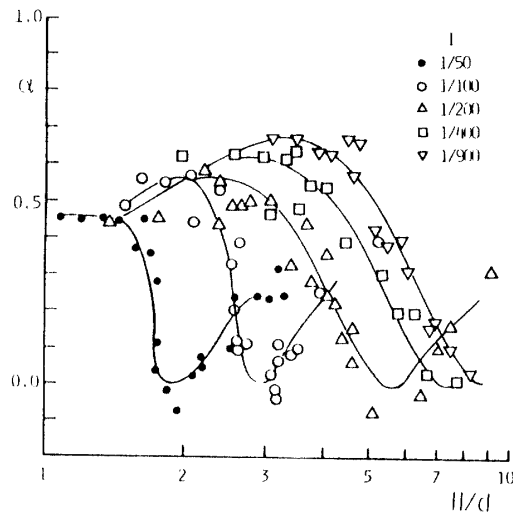


Fig. 3.2 Relation between virtual wall height and relative depth H/d

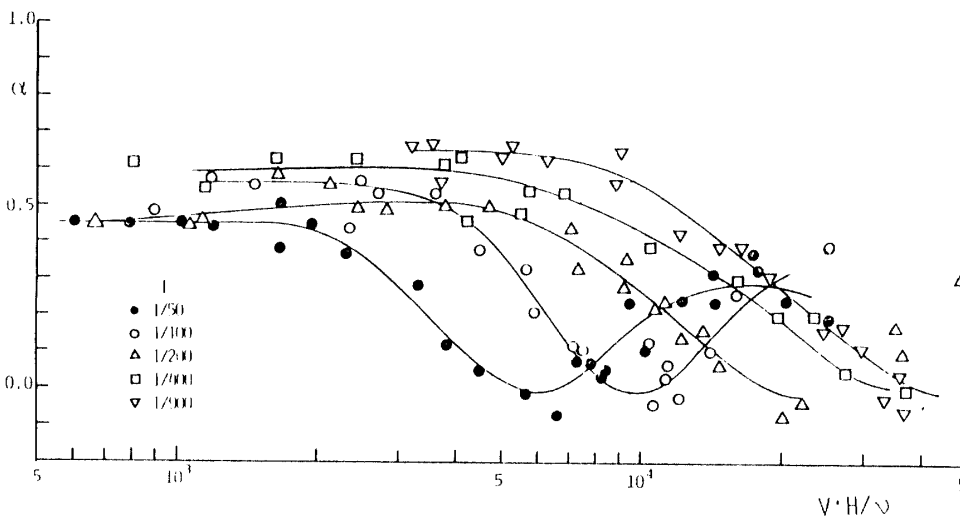


Fig. 4 Relation between virtual wall height and the Reynolds number

Fig. 3 は、河床勾配をパラメーターとして、実用上便利なように粗度粒子の下端から測った水深を用いた相対水深に対して α を描点したものである。従来、理論河床位置は流速分布から推定され、河床勾配が比較的緩やかな場合には、粗度粒子頂より下側へほぼ $0.2 \sim 0.25d$ の位置に、河床勾配が急で相対水深が比較的小さい場合には、砂粒頂より $0.15d$ 程度下方の位置にとるのが適当であるとされていた。実験範囲が限定されていて Re 数、相対水深の大きい場合についての確認実験が必要であるが、全描点の平均値は従来推定されていた $0.2 \sim 0.25$ の値とほぼ一致はしているが、 Re 数、相対水深によってきわめて複雑な挙動を呈し、河床勾配によって系統的に変わり、 α が零となる極少値をとることが注目される。 α が零であることは、仮想壁面位置が砂粒頂にあることで、仮想の床面は見掛け上滑面的であるように考えられる。しかしながら、後述するが、抵抗係数の値は滑面のそれよりもはるかに大きい値である。この結果は、何らかの方法でもって確認することが必要であるが、粗度粒子間に、粒子後方に形成される渦の放出がきわめてまなな状態にあるが、この付着渦を維持するために平均流れから大きなエネルギーが供給されているのではないかと想像される。

Fig. 3・2 は、仮想壁面位置から測った水深による相対水深を用いて描点したもので、 ΔH の修正値だけ Fig. 3・1 と異なるだけで、本質的には同じ結果である。

Fig. 4 は、 Re 数に対する α の挙動を調べたもので、Fig. 3 の場合と同様に河床勾配によって系統的に変わっている。

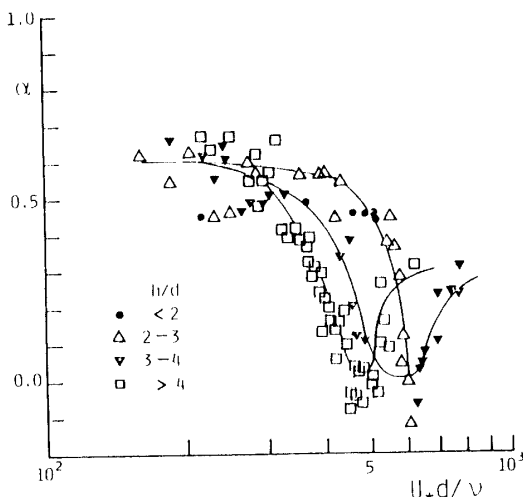


Fig. 5 Relation between virtual wall height and roughness Reynolds number

Fig. 5 は、相対水深 h/d をパラメーターとして、粗度 Re 数 $U_* d / \nu$ に対する仮想壁面位置の挙動を調べたものである。実験は相対水深が10程度まで行っているが、図でみられるように、相対水深が4以上の描点はほぼ一つの曲線によって表わすことが出来、仮想壁面位置は粗度 Re 数によってほぼ規定されるようである。一方、相対水深が4以下になると、仮想壁面位置は相対粗度の大きさによって系統的に変わっている傾向が明らかに認められる。

底面の粗度近傍における流れは、粗度から剝離した渦による強い乱れが主要な役割をもち、床面から少しく離れるとその影響は消えて、外側の流れ場の大きさに対応する混合距離をもった速度勾配の存在のために生じる乱流機構によって支配される乱れ場に接続するはずである。したがって、砂粒粗度から剝離した渦による強い乱れ場の拡がりの大きさは、剝離した渦の大きさの程度、換言すれば、砂粒粗度の径程度の大きさのものであると考えられる。砂粒後方からの渦の放出状態は、砂粒の形状、配列、大きさ、ならびに、砂粒にあたる代表流速によって規定されるであらうことから、粗度の状態が同じであるならば、粗度 Re 数が重要な支配要素である。上記の考察から、相対水深が比較的大きい場合には、砂粒粗度近傍における流れの特性を表わす一指標である仮想壁面位置を規定する重要な特性量は粗度 Re 数であると考えられる。相対水深が小さい場合には、砂粒から放出される渦の大きさと流れ場の大きさとが同程度となるため、放出渦は境界面の影響を受けて大きさ、形が変えられることになり、その変形の度合は、放出渦径に対する流れ場の大きさが小さくなるほど、すなわち、相対水深が小さいほど強くなるはずである。

仮想壁面位置は粗度近傍における流れが粗壁面に作用する流体力（壁面せん断力）を評価する一つの指標である。上述の粗度近傍における流れに対する考察より、 α の値を規定する支配要素は、相対水深の大きい場合には粗度 Re 数で、相対水深が小さくなると、放出渦の変形、変質によって、相対水深による影響が顕著に現われて来ることになると考えられる。

3.2 抵抗係数

固定床・粗面開水路の平均流速 V は、水深 H 、粗度粒径 d 、河床勾配 I 、動粘性係数 ν 、ならびに、重力の加速度 g の関数であるとして次元解析を行なうと、次式が行られる。

$$f_r = 8 \left(\frac{U_*}{V} \right)^2 = \varphi_2 \left(\frac{d}{H}, \frac{VH}{\nu}, \frac{U_* d}{\nu}, I \text{ or } \frac{V}{\sqrt{gH}} \right) \quad (3)$$

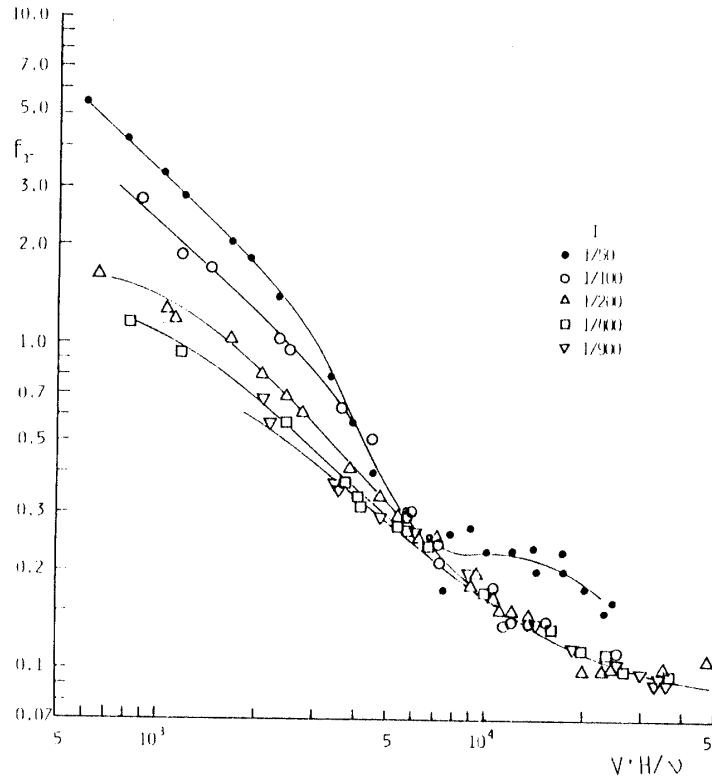


Fig. 6.1 Relation between the Reynolds number and the friction coefficient over gravel roughness (l)

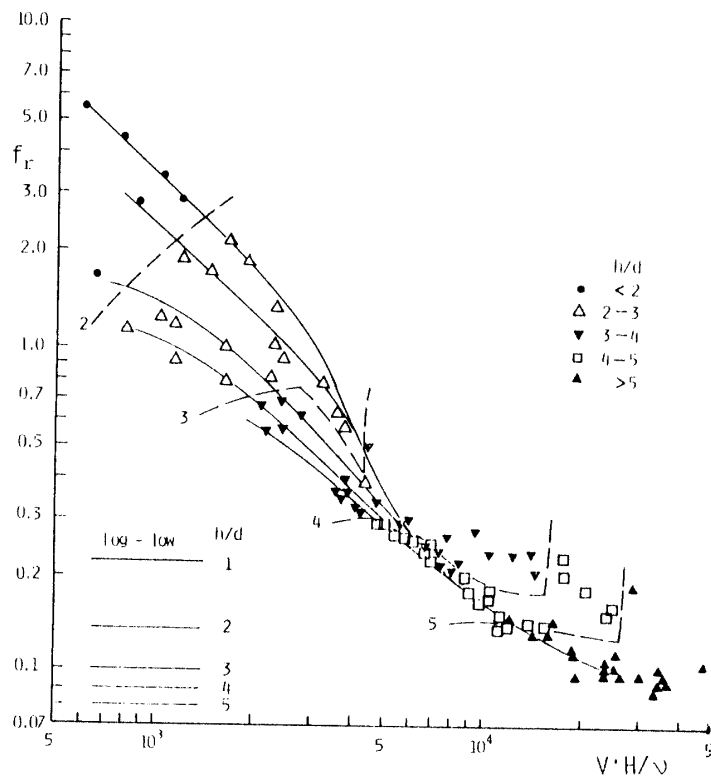


Fig. 6.2 Relation between the Reynolds number and the friction coefficient over gravel roughness (h/d)

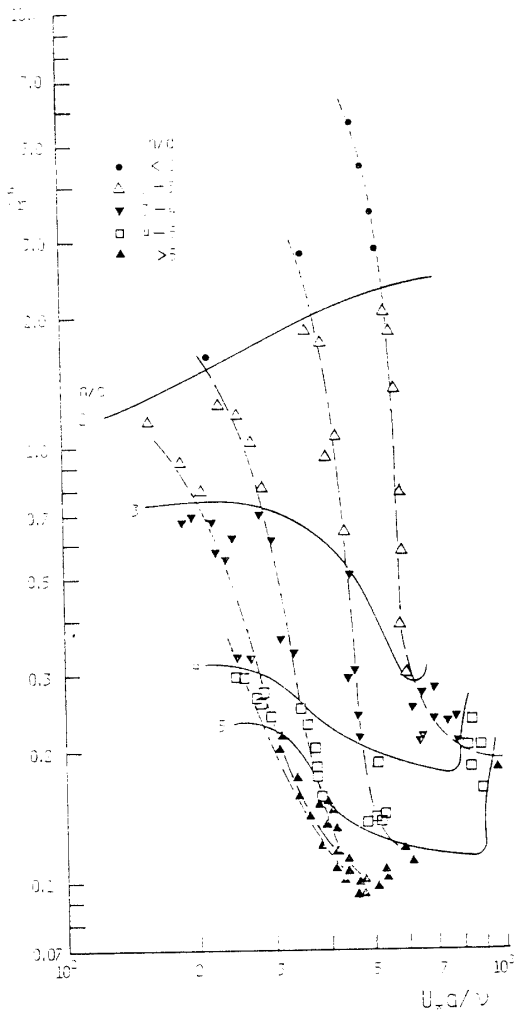


Fig. 7 Relation between the Reynolds number and roughness Reynolds number (h/d, I)

Fig. 6・1 は河床勾配 I を, Fig. 6・2 は相対水深 h/d をパラメーターとして, 抵抗係数 f_r を Re 数に対して描点したものである。両図中の実線は各河床勾配ごとの実験描点の平均を連ねたもので, Re 数が $3 \sim 5 \times 10^3$ 以下の場合では, 従来行なわれている定実験結果と同様に, 抵抗係数はほぼ Re 数に逆比例していて, 河床勾配が $1/50$ の場合を除くと, Re 数が 10^4 以上では河床勾配による系統的な違いは認められなくなっている。

Fig. 6・2 は相対水深 h/d をパラメーターとして f_r と Re 数の関係を描点したものである。図中下方にある水平な直線は完全粗領域における対数則より得られる f_r の値である。図中に破線で示した f_r の h/d による挙動はきわめて複雑で, 対数則で値られる f_r の値よりも h/d が小さいほど大きい値となっている。

Fig. 7 は相対水深 h/d をパラメーターにとり, 抵抗係数を粗度 Re 数に対して描点したものである。図中の破線は河床勾配が同じである実験描点の平均曲線で,

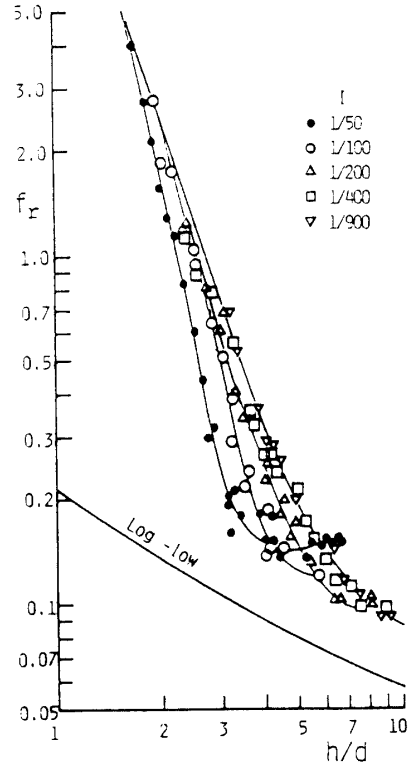


Fig. 8 Relation between the Reynolds number and Relative roughness (I)

実線は相対水深が一定値であると推定される場所を連ねたものである。

Fig. 8 は, 河床勾配をパラメーターとして, 抵抗係数を相対水深に対して描点したものである。図中下方の曲線は完全粗領域における対数分布則によって与えられる抵抗係数の値である。実験描点は, 対数則で与えられる値よりも大きく, h/d による変化も大きい。河床勾配が $1/400$ と $1/900$ の場合の実験描点は一つの曲線によって近似することが可能であるが, 河床勾配が $1/200$ よりも急な場合は河床勾配によって系統的に変化し, 抵抗係数は相対水深だけでなく, 河床勾配が関係している。今後, 実験範囲を広げて, 相対水深が大きくなるに伴ない対数則に漸近していく挙動を確認することが必要である。

3.3 Manning の粗度係数

Manning の平均流速公式より, Manning の粗度係数は次のように書くことができる。

$$\frac{n\sqrt{g}}{d^{1/6}} = \left(\frac{h}{d}\right)^{1/6} \cdot \frac{U_*}{V}, U_* = \sqrt{gh\tau_e} \quad (4)$$

完全粗領域においては, 対数分布則によると V/U_* は相対水深 H/d のみの関数であるから, Manning の粗度係数の無次元表示 (式(4)の左辺) は左辺) は H/d だけの関数となる。

Fig. 9・1, Fig. 9・2 は Manning の粗度係数を河床を粗度粒子の下端からと仮定壁面位置から測った水深を用いた相対水深に対して描点したものである。図中の下方にある曲線は完全粗領域における対数則の関係である。抵抗係数の場合と同様に、対数則で評価される粗度係数の値よりもかなり大きく、相対水深による変化が大きく、相対水深が小さい程、両者の差は急激に大きくなっている。描点の傾向をみると、仮想壁面位置を与える α の値が極少値となる付近において、粗度係数の値が極小となる傾向がみられ、両者が密接に関連していることが推測される。

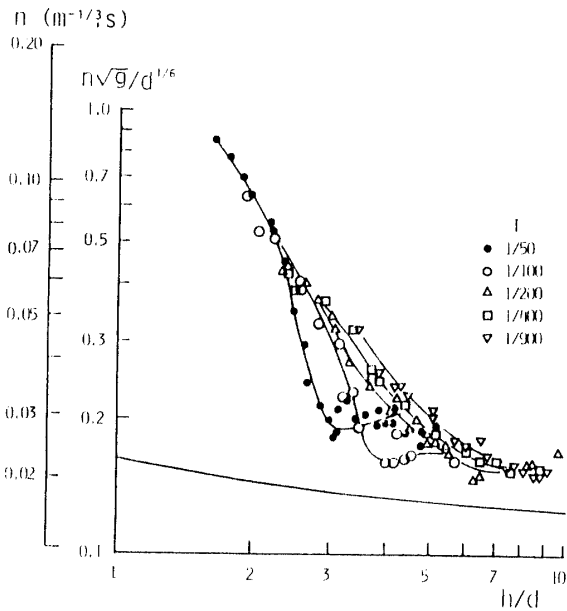


Fig. 9・1 Relation between relative depth and Manning's roughness coefficient

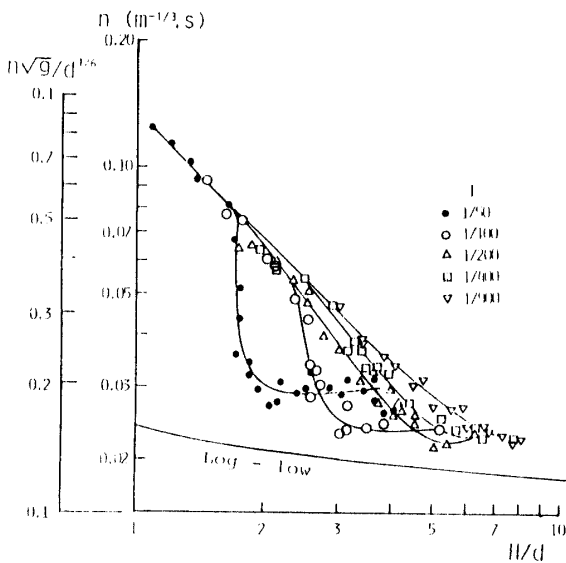


Fig. 9・2 Relation between Manning's roughness coefficient and H/d

Fig. 10, Fig. 11 は、粗度 R_e 数、ならびに R_e 数による Manning の粗度係数の挙動を調べたものである。

Fig. 10 において、粗度 R_e 数が 5×10^2 程度で最少値となっていることと Fig. 5 の α の値が同じ粗度 R_e 数の値のところ極少値をとることが対応していることが注目される。図が複雑になるために記入していないが、相対水深が一定値をとる曲線を推定すると、Fig. 7 の実線と類似な曲線が得られる。

粗度 R_e 数の代りに R_e 数を用いた Fig. 11 もほぼ同じ挙動を示しており、河床勾配が 1/400 と 1/900 の実験描点の一つの曲線でまとめても良いようである。この結果から、河床勾配が 1/400 よりも緩やかな場合、相対水深がかなり小さくとも河床勾配の影響は無視出来るものとみられる。

粗領域における流れの抵抗則として適合性が優れているとされている Manning の平均流速公式であるが、本実験におけるような粗面薄層流れに適用する場合、河床勾配ならびに粗度 R_e 数によって粗度係数の値が数倍異なることに注意する必要がある。

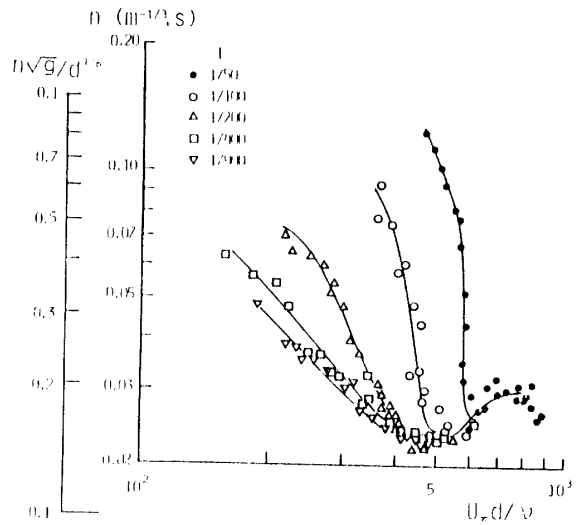


Fig. 10 Relation between the roughness Reynolds number and Manning's roughness coefficients

3.4 Chezy の粗度係数

Chezy の平均流速公式は式形がきわめて単純であるがため、設計時における概算値を求める際とか、適切な粗度係数の値を用いることを前提として理論的検討を行なう際によく用いられている。

Chezy の平均流速公式を無次元形に書くと、

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{V}{U_*} = \sqrt{\frac{8}{f_r}} \quad (5)$$

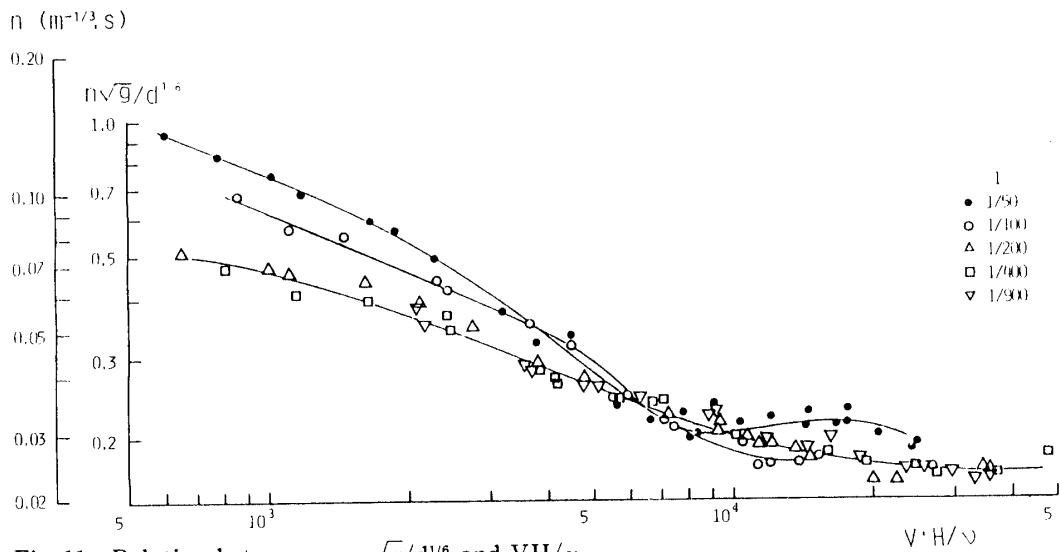


Fig. 11 Relation between $n, n \sqrt{g}/d^{1/6}$ and VH/ν

完全粗領域における対数則に従えば、 C/\sqrt{g} は相対水深だけの関数である。

Fig. 12は C/\sqrt{g} と相対水深 h/d との関係に描点したものである。図中の中央の勾配が緩い曲線は完全粗領域の対数則から求めた C/\sqrt{g} の値である。 C と n とは逆数関係にあるので、 α が極少値をとる相対水深のところで C の値が極大値をとる傾向が認められる。極大値と包絡する曲線は対数則で与えられる曲線とほぼ平行な曲線であるが、その値は対数則のもの約2倍大きい値である。

Fig. 13, Fig. 14は粗度 R_e 数、ならびに R_e 数による

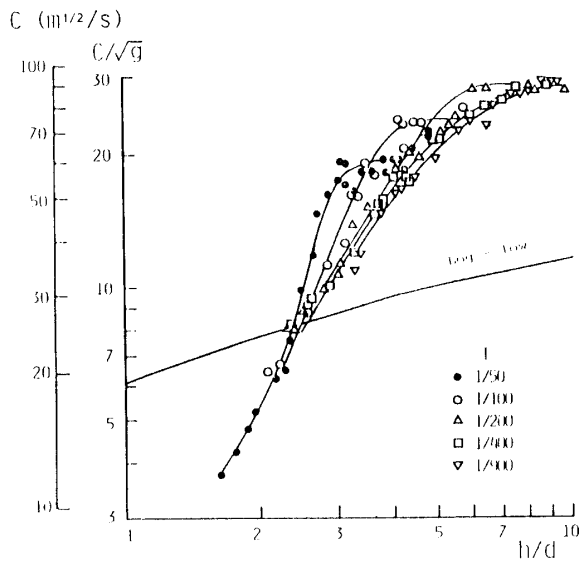


Fig. 12 Relation between $C, C/\sqrt{g}$ and h/d

C/\sqrt{g} の挙動を調べるために描点したものである。河床勾配によって異なるが、粗度 R_e 数がある限界値以下になると、Chezyの粗度係数の値が急激に減少して、流れの抵抗が急激に大きくなることが明らかである。粗度係数の値が急激に減少する粗度 R_e 数の値は河床勾配が急なほど大きな値となっていて、流れの抵抗が急激に大きくなる粗度 R_e 数の値が河床が急であるほど大きい値から生じることが明らかとなった。

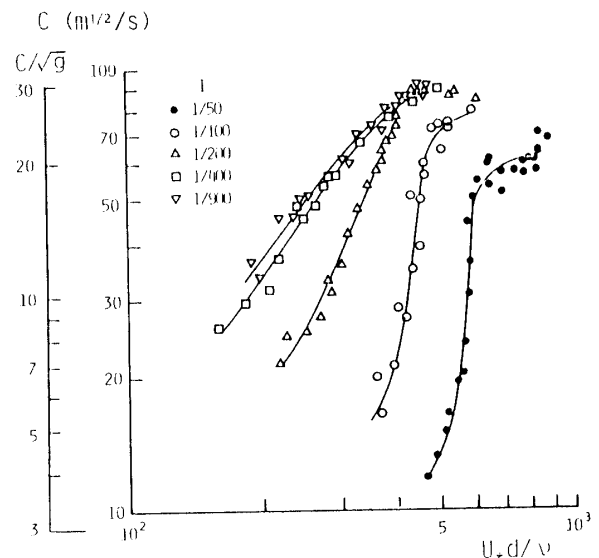


Fig. 13 Relation between $C, C/\sqrt{g}$ and U_*d/ν

4. 結 語

河床勾配が急で、相対水深が小さい場合における抵

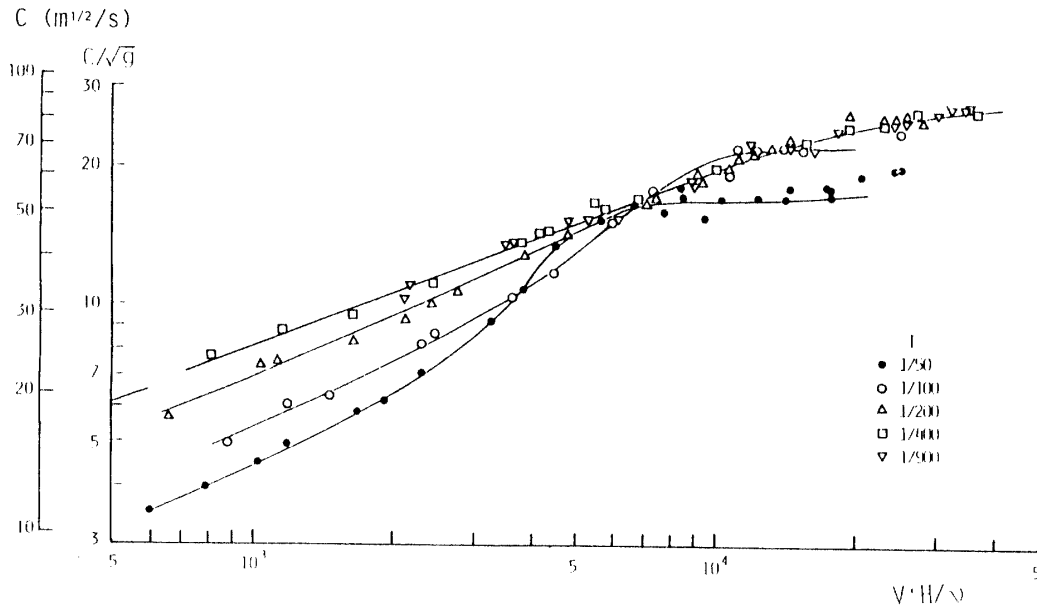


Fig. 14 Relation between the Chézy constant and the Reynolds number

抗則の挙動を明らかにするため、壁面せん断力を直接測定して、仮想壁面位置、Darcy-Weisbachの抵抗係数、ManningならびにChezyの粗度係数について検討した結果を要約すると次のとおりである。

1. 仮想壁面（理論河床）位置は、Fig. 5に示したように、相対水深 h/d が4よりも大きい場合には、ほぼ粗度 R_e 数によって規定され、粗度 R_e 数が300~500の範囲で α の値は急激に減少し、極小値の零をとり、粗度 R_e 数の増大によって α の値が0.2程度の値になる。相対水深が小さくなると、 α の粗度 R_e 数に対する変化の挙動は相対水深の大きい場合と類似であるが、粗度 R_e 数の大きい側に移動し、仮想壁面の高さは粗度 R_e 数だけでなく、相対水深によって変わる。

2. 本実験は粗度 R_e 数が100以上の完全粗領域において行なわれ、対数則に従えば、抵抗係数は相対水深だけで規定されるのであるが、Fig. 8で明らかなように、抵抗係数の値は相対水深が小さくなるほど、対数則で推定される値に較べて著しく大きいばかりでなく、河床勾配によって違っている。また、抵抗係数と仮想壁面位置とは密接に関連していることは明らかで、相対水深が小さく、 α の値が大きいところでは抵抗係数が大きく、 α が極少値をとるところでは抵抗係数も極少値となっている。

3. 粗面水路における適合性が優れているとの評価を受けているManningの粗度係数も抵抗係数と同様に複雑な挙動を示す。相対水深、あるいは粗度 R_e 数の値がある値以上であると、粗度係数の値はほぼ一定値となる傾向があつて、式の特性が現われているが、河床勾配によってその漸近値が若干異なるようで、河床

勾配が大きいほど大きい漸近値となるようである。相対水深、粗度 R_e 数が上記の値よりも小さくなると、粗度係数の値は河床勾配に関係なく、粗度係数が相対水深の逆数に比例する直線の値までその値が数倍急激に大きくなる。

流出解析、土砂浸食などの問題の根本的命題についての基礎資料になるものと考えられる。

参考文献

- 1) 神田徹, 土井和吉: 粗面水路における浅い流れの抵抗則, 第25回水理講演会論文集 105~112 (1981)
- 2) 端野道夫, 猪熊秀之: 急勾配粗面上の雨水流実験と抵抗則の推定, 第23回水理講演会論文集, 331~338 (1979)
- 3) Cheng-lung Chen: Filow Resistance in Broad Shallow Grassed Channels, A. S. C. E. HY-3, 307~233 (1976)
- 4) Reichard D. Hey: Filow Resistance in Gravel-Bed River, A. S. C. E., Hy 4, 365~379 (1979)
- 5) 栗原道徳: 粗滑遷移領域における管流の抵抗則について(I), 九州大学流体工学研究報告, 第7巻第3号, 23~41 (1951)
- 6) 芦戸和男, 大同淳之, 高橋保, 水山高久: 急勾配流れの抵抗と限界掃流力に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第16号B, 1~14 (1973)
- 7) 神田徹, 喜久里政宏: 粗面上の薄層流の抵抗則に関する実験的研究, 第32回土木学会年次学術講演会, 390~391 (1971)
- 8) 本名元, 斎藤隆, 赤司信義: 開水路粗面抵抗則, 第40回土木学会年次学術講演会, 309~310 (1985)

(昭和60年10月15日 受理)