

急勾配粗面水路の抵抗則について

On The Resistance Law of Steep Open Channel with
Large Relative Roughness

山口大学工学部 正員 斎藤 隆

山口大学工学部 正員 羽田野 袈裟義

1. 緒 言

我国の河川は、一般に河床勾配は急であり、河床は大転石から砂粒にいたる広い粒径範囲の石礫によって構成されている。したがって、我国の砂防工学や河川工学において、実際に対称となる流れは急勾配で相対粗度の大きい流れが多く、流水断面積の決定や土砂輸送量の評価に関連した抵抗則は重要な課題である。

開水路の抵抗則は水工学における最も身近な問題であることから、その表現式を実験的に見出そうとする努力が古来多くの研究者によって行なわれ、数多くの実験式が提案されている。円管乱流の流速分布についての Prandtl ならびに Kármán の理論的研究と Nikuradse の均一粗度を用いた実験的研究とによって対数速度分布則が確立され、対数速度分布則は流体力学の Corner Stone と呼ばれるほど確固たる地位を築いた。その後、対数速度分布則は開水路流れにも十分適用されることが実証され、Moody 図のように広く用いられる結果も得られている。しかしながら、これらの大部分の研究は河床勾配が比較的緩く、かつ相対水深の大きい場合の流れを対象としたもので、近年相対粗度の大きい開水路流れには対数速度分布則は適用できないことや^{1)~3)} 急勾配水路における流れにおいては河床勾配 (Froude 数) が抵抗則に重要な役割をもつことが明らかにされてきている。^{4)~6)}

対数分布則においては、上部の流れとははなはだしく内部機構を異にする壁面に沿う流れの層、すなわち Wall-layer の速度分布や抵抗則へ関与を仮想壁面高さでもって評価している。壁面粗度と水深が同程度であるような流れにおいては、粗度に起因する乱れの領域が相対的に重要な役割を演じ、場合によっては主要な役割をもつことになるものと考えられる。このような場合、対数速度分布則で行なっている Wall-layer の流体力学的特性をその上部の log-law region の補助項として取り込み抵抗則を表示する方法には疑問が持たれる。流れ場が明らかに異なった内部機構を持つ流れによって構成されているのであれば、抵抗則の普遍的表示にはそれぞれ異なった流れ場の流体力学的特性を表わす表現が包含されるべきである。したがって、抵抗則の普遍的表示法を確立するためには、粗壁面に沿う wall-layer と呼ばれる流れ場の厚さとその流体力学的特性を明らかにすることが必要である。

本研究は粗壁面に沿う対数速度分布則が適用出来ない壁面領域の規模、ならびに流体力学特性の一表示法であるところの渦動粘性係の鉛直方向分布を詳細な平均流速分布の測定結果を用いて検討したものである。

2. 実験装置と実験方法

実験は幅 40 cm、深さ 20 cm、長さ 8 m の鉄製勾配可変型の直線開水路において行なわれた。水路の勾配はジャッキによって行なわれ、水路床勾配は 2 m 間隔で設置されている 1/100 mm 読みのダイヤルゲージによって決定された。水深調節は水路下流端に設けられたフラッター型調節板で行なった。

水路床粗面は平均粒径 $d = 13.5 \text{ mm}$ のほぼ均一な砂粒を一層にペイントで貼付けて構成した。ペイントは砂粒をモルタル床面に接着するに必要な最少量となるように心掛けた。なお水路側壁はペイント塗りである。

平均流速の測定には、砂粒近傍における流れの局所性を平滑化するために、直径 10 mm の薄肉厚ステンレス管の先端を $0.5 \text{ mm} \times 14.4 \text{ mm}$ の矩形断面に磨き仕上げた全圧管と、直径 2 mm の硬質ステンレス管で作製した静圧管 2 本とからなるピトー管を用いた。ピトー管係数は実験前に検定されている。

粗度頂近傍における低流速を精度よく測定するために、ピトー管の水頭差は著者らが開発した自動制御型

天秤式差圧計でもって測定された。天秤式差圧計の原理は、水位測定用の円柱の径を大きくして上皿天秤に載せ、両円柱の水位差を重量差に変換して測定するものである。円柱断面積と天秤の感量とを適切に組合せることによって、水位差の読み取り精度を必要なまであげることができる。

自動制御型平秤差圧計の概略は次のとおりである。平秤の一端には差動トランスが、他端には永久磁石が取付けられている。永久磁石のところには、差動トランスからの電圧変化によって、動されるサーボモーターで上・下に移動するコイルが設置されている。円柱内の水位上昇に伴う重量変化に対応した電圧変化が差動トランスに発生し、増巾器で増巾された電圧変化によってサーボモーターが回転してコイルの位置を変わり、重量変化分だけの磁力が増加して天秤は初期の釣合位置が保たれるようにされている。コイルに流れる電流を電圧として Recorder に取り出す。実際に作製された差圧計には次のものが使われた。

上皿天秤； 感量 100 mgr

秤量 200 gr

円柱（アクリル製）； 内径 76 mm, 外径 80 mm

水測の測定は、水深が砂粒径の 5 倍以下と小さいために生じる水表面の荒れを除くためと、流れが等流状態であることを確認するために、流れ方向と横断方向とのそれぞれに 3 ケ所、計 9 ケ所に設置した静圧管で行なった。この静圧管の水位は荷重計型天秤式差圧計を用いた。荷重計型天秤式差圧計は、容量 50 gr、最大変位 ± 0.03 mm の微小荷重変換器を天秤の一端に取付けたのである。

3. 実験結果およびその考察

本実験のように、壁面粗度と水深とが同程度である場合には、水深を決定する河床位置をどのように定義するかということが重要な問題となる。これに関しては、対数速度分布則との適合性、Chezy 式および Manning 式の適用性を検討して、砂粒頂点より粒径の 0.15 ~ 0.2 倍程度下方に理論的河床を定めるのが適当であるとの報告もされているが、現時点において、適切な河床高さを決定する基準はみあたらない。

粗度近傍の領域とそれより上層の領域とにおける流速分布は異なることはすでに指摘されており、粗度領域（壁面領域）の厚さは粒子頂より粒径の 0.6 倍程度であるという実験結果⁵⁾があるが、Froude 数、相対水深などの影響は不明である。

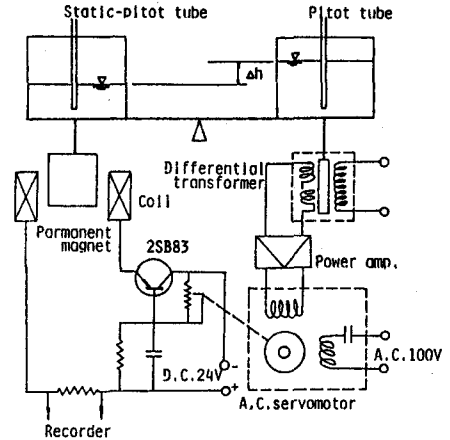


図-1 自動制御型天秤式差圧計の概要

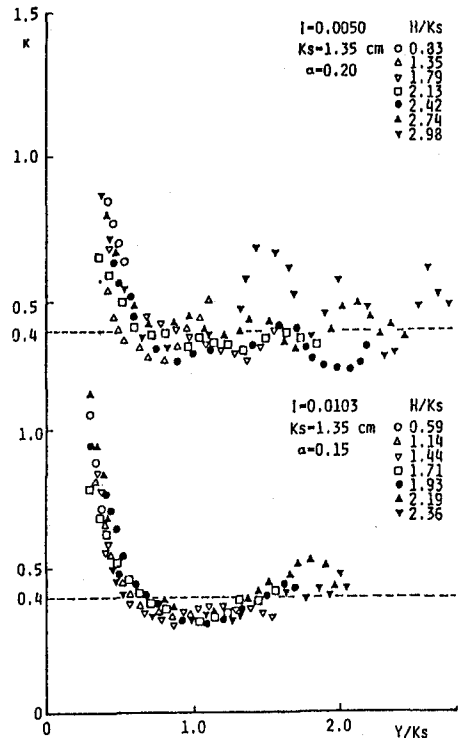


図-2 K の水深方向の分布

従来の開水路流れに対する対数速度分布則の適合性についての検討は河床位置を決定することのみを目的としていて、壁面領域と対数領域の境界面高さについての検討はほとんど行なわれていない。河床位置の違いによる対数速度分布則の適合性の度合、ならびに適合した場合にその範囲はどのような範囲であるのかを知るため、河床位置を系統的に変えて、各水深におけるKármán 常数 K ならびに Ar の値を次のようにして実測速度分布から求めた。すなわち、考慮点の上・下各3点ずつ計7点の実測流速値を用い、最少自乗法により考慮点における対数分布式を求め、その式の片対数紙上の傾きと $y/Ks=1$ との交点から K ならびに Ar を求めた。以上のようにして得られた K ならびに Ar の値を仮想河床面からの高さ y/Ks に対して 描点した1例が図-2、3である。図中の α は仮想河床を砂粒頂より αd だけ下げたときの値で、 y は仮想河床面からの高さ、 Ks は壁面粗度の大ききで、本研究では粗度粒径 d としている。

図-2は K がほぼ0.4となる範囲が最も広くなる場合のもので、河床勾配が大きいかほど α の値は小さく、すなわち仮想河床の位置は高くなっている。当然のことであるが、 α の値を大きくするほど、すなわち仮想河床の河床面位置を低くとるほど K の値は小さくなっていく。 K の分布をみると、実測値の微分値であることを考慮すれば、 $y/Ks=0.6\sim 0.7$ を境にして分布形が異なり、 $y/Ks>0.6\sim 0.7$ では K の値はほぼ一定値となっているとみなせるが、 $y/Ks<0.6$ においては K の値は y/Ks によって急激な変化を示し、明らかに $y/Ks=0.6\sim 0.7$ を境にして速度分布の特性が異なっている。適切に河床位置を決めることが出来ても速度分布が対数速度分布に従うのは $y/Ks>0.6\sim 0.7$ の領域で、水深が壁面粗度と同程度の流れにおいては速度分布が対数分布則に従う部分とそれとは異なった速度分布則になる部分との割合が同程度になり、山腹法面からの流出流れなどのような場合は考察する際に対数速度分布則に立脚した考察には無理が生じることになるのではないかと考えられる。

図-4は仮想の河床位置を系統的に変えて求めた Ar の水深方向の分布を河床勾配で分けて描点した1例である。 α の値を大きくしていくと、すなわち仮想河床位置を下げると、 Ar の値は単調に減少する。仮想河床位置が同じでとき、相対水深が大きいほど Ar は小さい値となっていて、同一大きさの粗度の水路でも水深が大きいほど、換言すれば相対水深が大きいほど、対数速度分布則を適用するには仮想河床位置を高くしなければならない。

Ar の深さ方向の分布をみると、 K の挙動と同様に $y/Ks=0.6\sim 0.7$ を境にして、 $y/Ks>0.7$ では Ar の値はほぼ一定値となっているが、 $y/Ks<0.6$ においては y/Ks の減少によって急激に小さくなっていく。

K 、 Ar の深さ方向の分布特性より、相対水深が十分

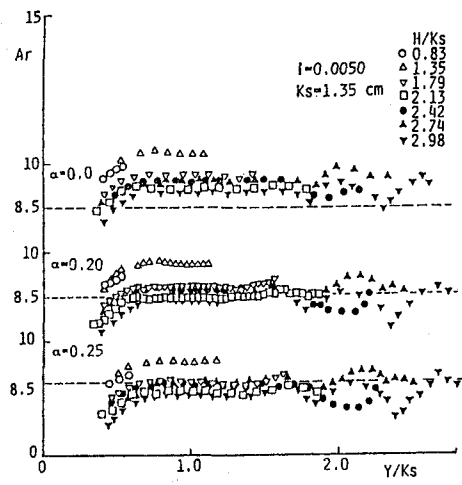
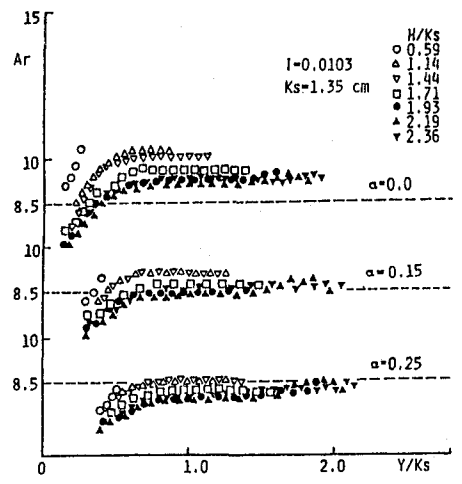


図-3 Ar の水深方向分布

大きい流れの場合には、適切に仮定の河床位置を決めたことにより流れの大部分における速度分布は対数速度分布によって表わされ、流れ場の特性速度である摩擦速度を対数速度分布則を用いて推定しても大きな誤りはないであろうが、相対粗度が大きい流れにおいては、速度分布が対数速度分布則で表わされる領域は少なく、極端な場合にはこのような領域は存在しなくなるので、対数速度分布則に基づいて摩擦速度を推定することは危険であり、全く誤った結果となることの可能性があるものと考えられる。

図-4は、 $y/K_s > 0.6$ の範囲における Ar の平均値が 8.5 となる仮定の河床位置を求め、河床勾配をパラメーターとして相対水深に対して描点したものである。河床勾配 $I = 0.01$ の場合には、相対水深 H/K_s が 2.5 以上の、 $I = 0.0026$ の場合には、 H/K_s が 3 以下の、 $I = 0.005$ の場合には $H/K_s = 3 \sim 4$ の範囲における描点が全くなく、全描点数も少ないので、現段階では定性的にも判断がしにくいのであるが、河床勾配が急であるほど、仮定の河床位置は高くとらねばならないことは云えるであろう。

河床勾配 $I = 0.005$ の描点をみると、相対水深が 3 以下のところでは相対水深が大きくなるに伴い α の値は小さくなっているが、相対水深 H/K_s が 5 附近における値は 0.5 と相対水深が 3 以下の場合の値の倍程度の値になっている。相対水深 $H/K_s = 3 \sim 5$ の範囲における α の値がどのような挙動を示すのかは今後の実験によらなければならないが、特異な挙動を示すのではないと思われる。

レイノルズ応力の分布を直線分布であるとして、実測した流速分布より後述する方法で求めた速度勾配から渦動粘性係数を求めて、 y/H に対して描点し

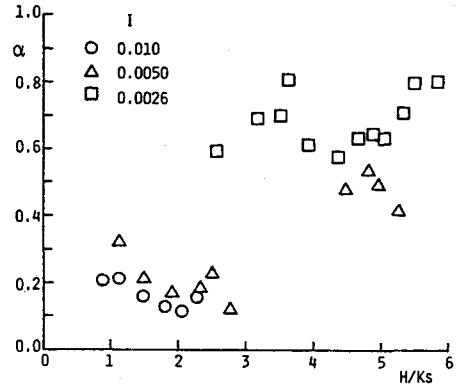


図-4 仮定河床位置と相対水深、河床勾配との関係

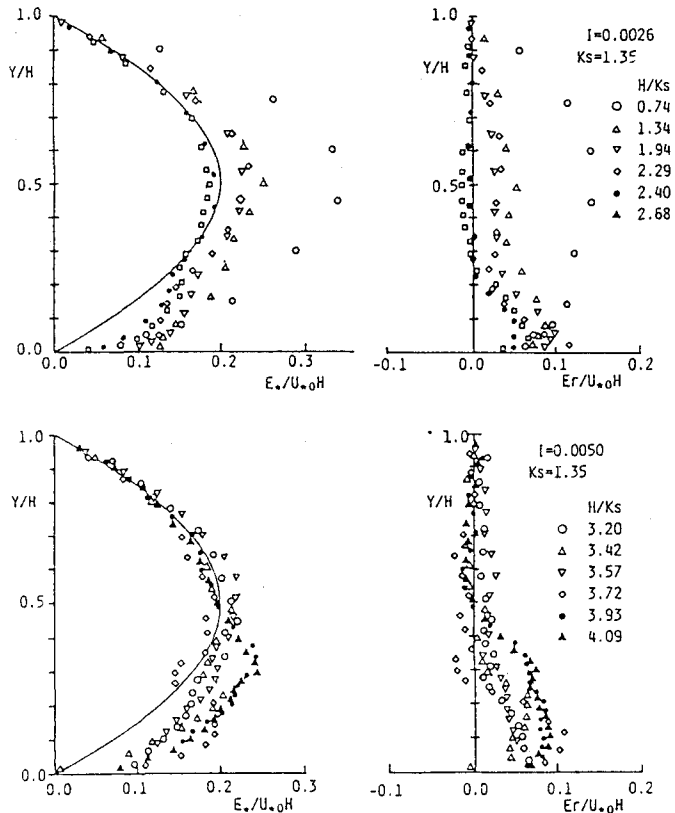


図-5 渦動粘性係数の水深方向分布

たものが図-5である。速度勾配は考慮点の上・下各3点、計7点の実測流速の分布を最少自乗法でもって2次曲線で近似し、この曲線を考慮点において微分して求めた。渦動粘性係数の絶対値とその分布形状が明らかになることが望ましいのであるが、現時点では河床位置をどのように決めるのかの適切な基準を持ちあわせてないので、渦動粘性係数の分布特性のみの検討にとどめることにして、渦動粘性係数を無次元化する特性速度は砂粒頂よりの水深Hを用いて定義した($U_*o = \sqrt{gHI}$)。

図-5の左側の描点は上述の方法で求めた渦動粘性係数で、図中の曲線は速度分布が対数速度分布則に従うものとしたときの渦動粘性係数の分布である。右側の図は実測速度分布より求めた渦動粘性係数が、流れ場全体の速度分布が対数速度分布則になっているものとして得られる渦動粘性係数とどの程度違っているのかを明らかにするため、両者の差を描点したものである。相対水深H/Ksが小さい場合には両者の差は水深全体にわたって分布しているが、相対水深が大きくなるほど両者の差は河床近くに限定され、その最大値は小さくなり、最大値の出現位置は河床に近くなっている。

図-5の渦動粘性係数を η/Ks に対して描点したものが図-6である。両図の右側の図とくに上段の図を比較してみると、分布の長さ尺度の基準として水深を用いた図-5の表示では分布形状が相対水深によって複雑に変わっているが、基準尺度として粗度径を用いた図-6の表示では形状はほぼ定まった分布形状となっている。

上述の渦動粘性係数を2つに分ける方法は人為的なものであって、図-5、6に示した渦動粘性係数 E_r は粗度に起因する乱れによるものの流れ場の特性を的確に表現するものとは云えないが、壁面領域における速度分布を対数速度分布則を基準として評価しようとするような場合には、この領域における流れ場の特性を表わす指標とすることができると考えられる。このような観点に立って、壁面粗度の存在によるものの渦動粘性係数の増分値 E_r/U_*oKs の最大値とその出現高さを図-5から読みとり図示したものが図-7、8である。

図-7より、粗度に存在によって増分した渦動粘性係数の最大値は河床勾配による系統的な変化は認め難く、大雑束には相対粗度によって規定されるようである。

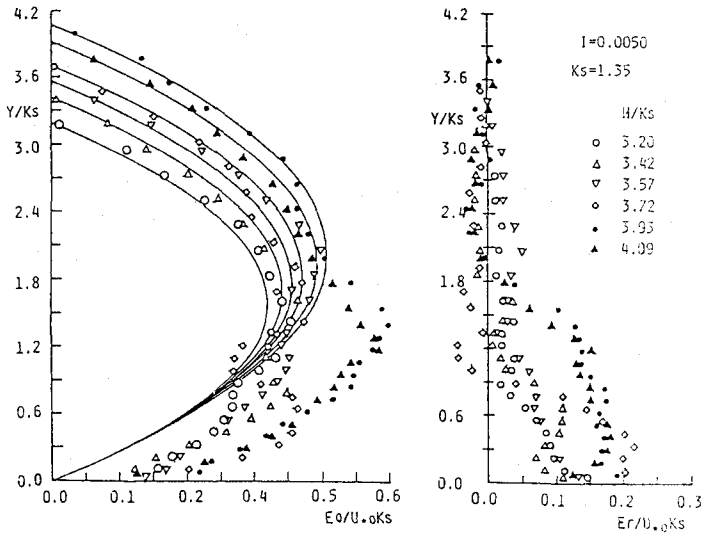
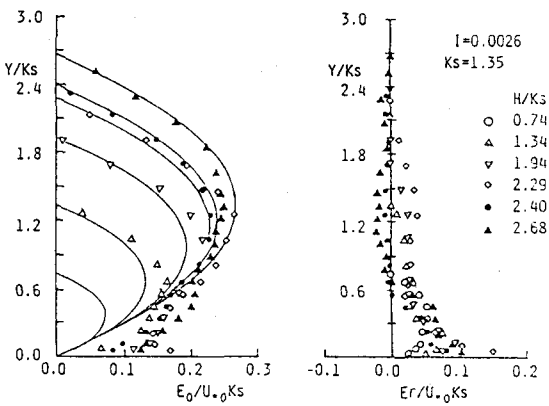


図-6 渦動粘性係数の水深方向分布

図-8中の描点に縦線があるのは、ほぼ同じ程度の増分渦動粘性係数の最大値が2ヶ所あったものである。図より増分渦動粘性係数の最大値の出現高さ Y^*/H は河床勾配が大きいはど大きくなっている。

4. 結 語

粗面開水路で測定した流速分布を用いて Kármán 常数, Ar , 渦動粘性係数の分布特性について検討した結果, 仮想の河床位置, 増分渦動粘性係数分布に河床勾配の影響がみられ, 粗面開水路抵抗則に河床勾配が関連していることが明らかとなった。

上述の検討において, 流れ場の特性速度, すなわち底面せん断力の評価に不明な点があるため, 定量的な評価を行うことは避けた。定量的な評価を行うためには直接底面せん断力を測定することが必要である。実験資料も不十分であるので, 今後底面せん断力の直接測定をも併せた更に多くの実験によって検討していく。

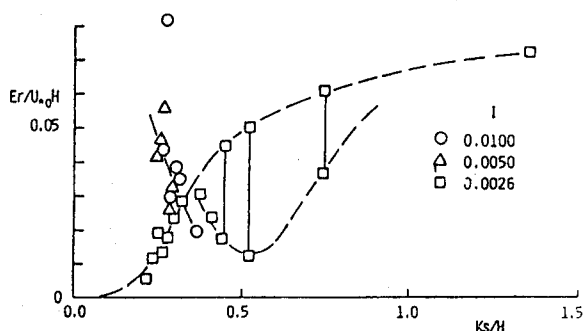


図-7 $Er/U_{*o} \cdot H$ と Ks/H との関係

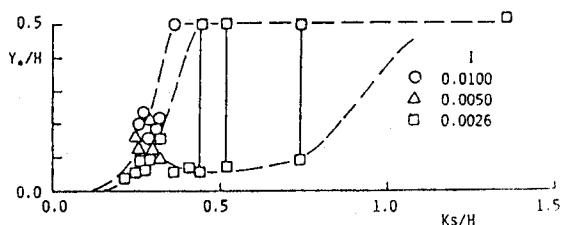


図-8 Y^*/H と Ks/H との関係

参考文献

- 1) Bathurst, J.B: Flow Resistance of Large-Scale Roughness. ASCE, 104, Hy 2, 1978
- 2) Hartung, F and Schenerlein, H: Macro-turbulent flow in Steep Open-Channels with high natural Roughness, 12th Congress of IAHR, 1967
- 3) Herbich, J B, and Shulits, S.; Large-Scale roughness in Open Channel flow. ASCE, 90, Hy 6, 1940
- 4) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 合田建; 薄層流に関する研究 (第一報), 土木学会論文集, 第 6 号, 1951
- 5) 岩垣雄一; 滑面水路における乱流の抵抗則について; 土木学会論文集, 第 16 号, 1953
- 6) 芦田和男, 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, 京大防災研究 所年報, 第 16 号 B, 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 回年譜, 1977
- 8) 神田徹, 喜久里政宏, 伊崎昭一郎; 薄層流の流速分布と抵抗係数の関係, 第 33 回年譜, 1978