

人工粗度の実験的研究

—棧型粗度と溝型粗度—

足 立 昭 平

ON THE ARTIFICIAL STRIP ROUGHNESS —RIDGE TYPE AND GROOVE TYPE—

by Shohei ADACHI

Synopsis

In order to establish the similitude of the channel model experiments with fixed bed it is necessary to make clear the resistance characters of some artificial roughnesses. One of the typical artificial roughness is strip roughness. In the previous paper²⁾, it was shown that equivalent sand grain roughness of Nikuradse is not always available for strip roughness because the flow pattern vary with the relative spacing of roughness elements. But the ridge type which have projecting roughness element was discussed only. It is important also whether roughness element is ridge or groove. In this paper the practical criterion between ridge and groove is explain based on the hydraulic datum of roughness element, and the resistance formulas for both of ridge type and groove type are proposed.

1. ま え が き

人工粗度の抵抗特性を明らかにすることは、固定床開水路模型実験の相似律を確立するための基本課題である。著者はさきに模型縮尺の選定と模型人工粗度との関連を明らかにし¹⁾、人工粗度の基本型として棧型粗度をとりあげて、主として水流の形態に関する吟味から、従来行なわれていた砂粒粗度を標準粗度とする一般粗面の表現法がかならずしも適当でないことを指摘した²⁾。本報告においては、棧型粗度の基面の位置に注目して、その型式の定義を明確にするとともに、新たに溝型粗度と名付けるものをつけ加えて、それぞれの抵抗特性を明らかにし、それらの抵抗法則を実験的に見出した。

2. 棧型人工粗度

棧型人工粗度に関する実験の概要は前報文²⁾に記したが、溝型粗度との相違を明確にするため、若干の補足を加えて、その特性を述べよう。

(1) 棧型粗度の定義

棧型粗度は水路を横切つて水路壁面に棧状の粗度要素を付けたものであるが、粗度密度が非常に大きく、棧間隔が狭ばれば、棧相互の遮蔽効果によつて、棧の抗力はその頂面の表面摩擦抗力だけになってしまう。このような状態においては、たとえ壁面が棧によつて見掛け上凹凸に作られていても、流れに対する棧の働きは壁面から突起した粗度要素としてではなくて、水深の基面を棧頂面に引き上げることであつて、棧自身よりもむしろ棧と棧に挟まれる空間が溝として粗度要素の機能を発揮すると思えねばならない。したがつて、このような場合に対しては、溝型粗度の名称が与えられるべきであり、棧型粗度と区別すべきである。

前論文²⁾に述べたように棧型粗度要素の圧力抗力から求めた棧の遮蔽率 c/k は相対棧間隔 s/k の関数として与えられ、Fig. 1 の破線のようなのである。ここに c は棧の遮蔽度、 k は棧高、 s は棧間隔である。さらにこれを単純化して、 $c/k > 0.5$ を完全遮蔽、 $c/k < 0.5$ を非遮蔽と見なすことにすれば、Fig. 1 の点線による両者の限界点は $s/k=8$ で与えられる。この限界点の設定は便宜的ではあるが、水深の基面に一応の基準を与えるものであり、実際上の取り扱いに対しては十分にその役割りを果し得るものと考えられる。著者はこの限界点をもつて棧型粗度と溝型粗度の区分とし、実際上の取り扱いにおいて水深の基面を棧底面に採るべきものを棧型粗度、同じく基面を棧頂面に採るべきものを溝型粗度と定義しよう。

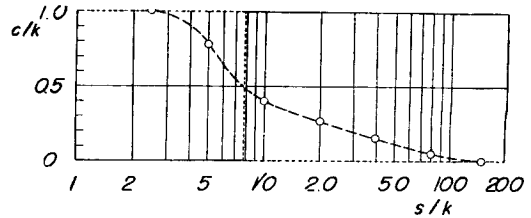


Fig. 1 Variation of sheltering ratio of roughness height with relative spacing of strip roughness

なおこの定義は粗度密度による抵抗の増減にも明確な解答を提供するものである。たとえば、Johnson³⁾ が Powell の論文⁴⁾ に討議を寄せた際に示した実験資料や、ガラス棒を用いた細井⁵⁾ の実験資料などを引用すれば、粗度密度と抵抗の増減との関係は Fig. 2 のようである。ここに k_s' は相当砂粒粗度、 k は棧高、 b は棧の純間隔(資料は棧巾 t のかなり大きいものを含むから、棧間隔 s の代りに純間隔 b を採用したが $t \approx k$ の粗度要素については、 s を採つても図のプロットはほとんど変化しない)である。図において、水深の基面の選び方は各研究者によつてまちまちであり、Bazin, Powell は棧底面、細井は棧 $1/2$ 高、その他は棧頂を基面としている。しかしながらいずれもある程度以上棧間隔が狭ばれば抵抗を減じており、この理由が棧相互の遮蔽効果にあることは常識的に推察できるところであり、最大抵抗を生ずる点を境界として棧の粗度要素としての働きに本質的な変化を生ずると考えるべきである。著者の棧型粗度と溝型粗度の区分の意味もここにあり、事実さきに示した境界点 $s/k=8$ は Fig. 2 の諸資料に矛盾するものではない。

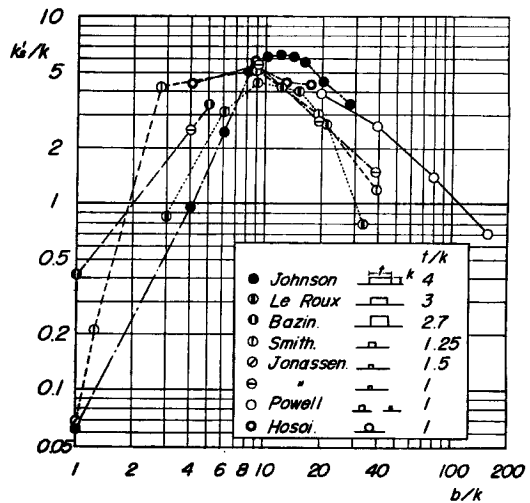


Fig. 2 Relations of k_s'/k to b/k for various data

(2) 棧型粗度の抵抗法則

粗面流の対数抵抗法則は通常 Nikuradse の砂粒粗度実験に準拠して相当砂粒粗度 k_s' を定め、

$$\frac{U}{U_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{H}{k_s'} \dots\dots\dots (1)$$

とあらわされる。ここに U は平均流速、 U_* は摩擦速度、 H は水深をあらわす。 k_s' はその粗度と同じ大きさの抵抗を生ずるような砂粒粗度の粒径であつて、粗度を評価する尺度であるが、個々の粗度要素に対して特別の物理的意味を有するものではない。

一般に粗面は多種多様であり、流れの形態が異なれば、その粗面を単純に砂粒粗度にすりかえることはで

きない。すなわち相当砂粒粗度 k_s' が必ずしもその粗面に固有な常数であるとはかぎらない。椋型粗度の特徴は規則正しく配列された粗度要素の後流の拡散がその抵抗特性を決定づけることであり、粗度要素相互の後流の干渉は相対椋間隔が増すにつれて、砂粒粗度の完全干渉から離れ、ついには粗度要素が孤立する状態になる。そして通常の椋型粗度における流れは完全干渉流と孤立粗度流の中間的形態を示すものであり、不完全干渉流と名付けるものに相当する。したがって一般に椋型粗度の相当砂粒粗度 k_s' は常数ではない。

いま次元解析の手法を借りて、相当砂粒粗度 k_s' と椋高 k との比を相対粗度 H/k の指数形と仮定し、

$$\frac{k_s'}{k} = 30m \left(\frac{H}{k} \right)^{-\theta} \dots\dots\dots(2)$$

とおけば、係数 m および指数 θ は粗度要素自身の形状と粗度密度の指標である相対椋間隔 s/k の関数となることが期待される。著者の実験によれば、5mm×6mmの矩形断面椋粗度要素に関する m および θ は Fig. 3 のようであり、実験式として、

$$m = 0.79(s/k)^{-0.26} \dots\dots\dots(3)$$

$$\theta = 0.02(s/k)^{0.8} \dots\dots\dots(4)$$

をあてはめることができる。

s/k を無限に大きくすれば、その抵抗特性は滑面のそれに漸近するはずである。滑面の対数法則はよく知られているように、

$$\frac{U}{U_*} = 3.0 + 5.75 \log_{10} \frac{U_* H}{\nu} \dots\dots\dots(5)$$

である。ここに ν は流れの動粘性係数である。したがって、滑面の相当砂粒粗度は形式上(1)式から、

$$k_s' = 3.33 \frac{\nu}{\sqrt{g I_e}} H^{-1/2} \dots\dots\dots(5')$$

である。ここに g は重力の加速度、 I_e は流水のエネルギー勾配をあらわし、 $U_* = \sqrt{g I_e H}$ である。さらに上式を(2)式に対比すれば、

$$m = \frac{\nu}{9\sqrt{g I_e} k} \theta = \frac{1}{2} \dots\dots\dots(6)$$

となる。さきの実験式(3)および(4)式は $s/k = \infty$ において、 $m=0$ および $\theta = \infty$ を与え、滑面に対する(6)式へ漸近しない。このことは s/k が160を超えると流れが不完全干渉流から孤立粗度流へ移行することによって説明づけられるものであり、Fig. 2において $s/k=160$ の実験値が離れる傾向にあるのも流れの形態の移行によるものと考えられる。

孤立粗度流の場合に対しては、Morrisの論文⁹⁾に見られるように Reynolds 数を考慮した別の表現が必要であり、実験式(3)および(4)式の適用は少なくとも $s/k=160$ の場合までに止めねばならない。

(3)および(4)式を(1)式に代入すれば、椋型粗度の二次元対数抵抗法則として、

$$\frac{U}{U_*} = 1.50 \log_{10} \frac{s}{k} - 1.91 + \left\{ 5.75 + 0.12 \left(\frac{s}{k} \right)^{0.8} \right\} \log_{10} \frac{H}{k} \dots\dots\dots(7)$$

ただし $8 \leq s/k \leq 160$

が得られる。

(7)式を開水路に適用するには、水路の断面効果を考慮しなければならないが、近似的には、水深 H を径深 R に置き換るだけでも実用上大きな誤りはない。また(7)式を Manning の粗度係数 n であらわせば

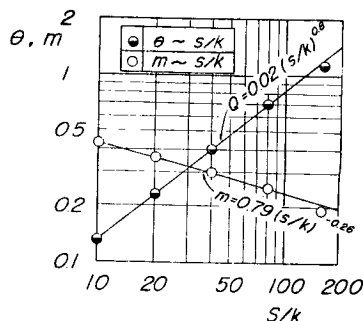


Fig. 3 Experimentally determined values of m and θ

$$n = \frac{H^{1/6}}{\sqrt{g}} \left/ \frac{U}{U_*} \right. \dots\dots\dots (8)$$

すなわち

$$\frac{n}{k^{1/6}} = \frac{1}{\sqrt{g}} \left(\frac{H}{k} \right)^{1/6} \left/ \left[1.50 \log_{10} \frac{s}{k} - 1.91 + \left\{ 5.75 + 0.12 \left(\frac{s}{k} \right)^{0.8} \right\} \log_{10} \frac{H}{k} \right] \right. \dots (9)$$

となり、 $n/k^{1/6}$ は相対粗度 H/k と相対栈間隔 s/k の関数として与えられ、Fig. 4 のようである。

3. 溝型粗度

溝型粗度は水路を横切つて、壁面に溝を付けたものであり、前項に述べたように栈粗度において

相対栈間隔 s/k が8以下の場合には溝型粗度として取り扱われる。

(1) 実験方法

実験水路は栈型粗度実験に用いた巾 20cm、長さ 14.4m の鋼製水路であり、粗度の製作も栈粗度要素に用いた 5.0mm×6.4mm の檜角棒を利用した。まず水路底面に檜角棒をその巾 6.4mm の2倍の間隔 12.8mm に配列して一つの溝型粗度を形成し、以下順次溝を一つおきに檜角棒を挿入し、最後に水路底面をこの檜角棒で埋めつくした。このようにして得られた溝型粗度は、溝巾(栈粗度の純間隔に相当する)を b 、溝間隔を s であらわして、 $s/b=2, 4, 8, 16$ および ∞ であり、これらに栈粗度実験における $s/k=5$ すなわち $s/b=1.34$ の場合を加えて、合計6種の s/b について実験を行なった。

なお溝間隔を拡大するごとに、凸部頂面をラツカーで塗り上げ、挿入した檜角棒の密着と頂面の滑面化に努めたのであるが、檜棒の歪みと寸法の不揃いのため、凸部頂面には若干の凹凸が残り、檜棒で底面を埋めつくした最終実験における底面凹凸の平均値からの偏差は $\pm 1\text{mm}$ 以内であつたが、その頻度は Fig. 5 のようであつた。このことは実験結果の洞察に若干の支障となつたが、粗度製作上やむを得なかつた。

(2) 溝型粗度の抵抗法則

溝型粗度が栈型粗度と本質的に相違する点は、水路壁面凸部の後流の発達に溝巾に抑制されることである。栈型粗度の流れ抵抗はほとんど栈粗度要素の形状折力によつて決定づけられ、極端に巾広い栈の場合を除いて、栈巾すなわち凸部の巾は重要でなく、栈高 k と栈間隔 s が主要な因子であつた。溝型粗度においても、凹部の渦動が果す役割りを重視しなければならないが、この場合には栈型粗度と異なり、凸部の巾を省略できない。したがつて溝型粗度の流水抵抗に関しては、栈型粗度における指標 s/k にかわるものとして溝間隔 s と溝巾 b との比を粗度密度の指標に選ぶのが妥当であろう。著者は s/b を相対溝間隔と名付ける。

実験結果を各相対溝間隔ごとに図示すれば、Fig. 6 のようである。これらの実験における水路勾配は 2×10^{-3} であつたが、水面勾配および水温には若干の変動があり、両側壁の滑面の影響を決定づけるパラメーター $Re_n (= \sqrt{gI_e B/2} (B/2)/\nu)$ の値は次表のようである。

実験結果を各相対溝間隔ごとに図示すれば、Fig. 6 のようである。これらの実験における水路勾配は 2×10^{-3} であつたが、水面勾配および水温には若干の変動があり、両側壁の滑面の影響を決定づけるパラメーター $Re_n (= \sqrt{gI_e B/2} (B/2)/\nu)$ の値は次表のようである。

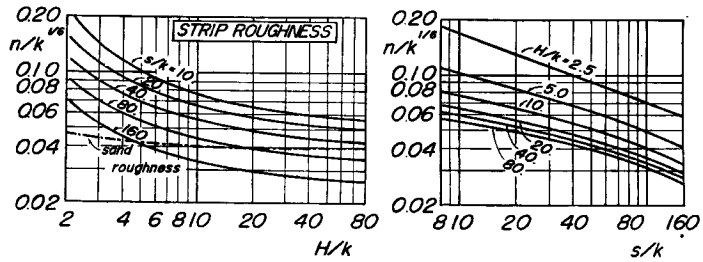


Fig. 4 Manning's coefficient for ridged strip roughness

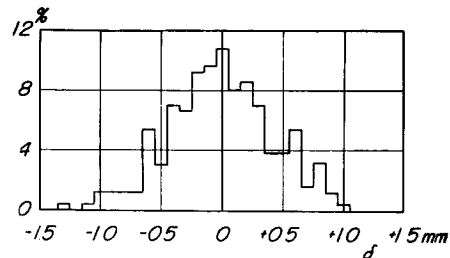


Fig. 5 Histogram of deviation of bed surface

s/b		1.34	2		4	8	16	∞
R_{eB} ($\times 10^3$)	最小	2.9	6.9	4.9	4.6	4.5	5.2	4.8
	最大	3.4	8.9	5.1	5.3	5.4	6.5	5.6
	平均	3.2	8.0	5.0	5.0	5.0	5.6	5.2

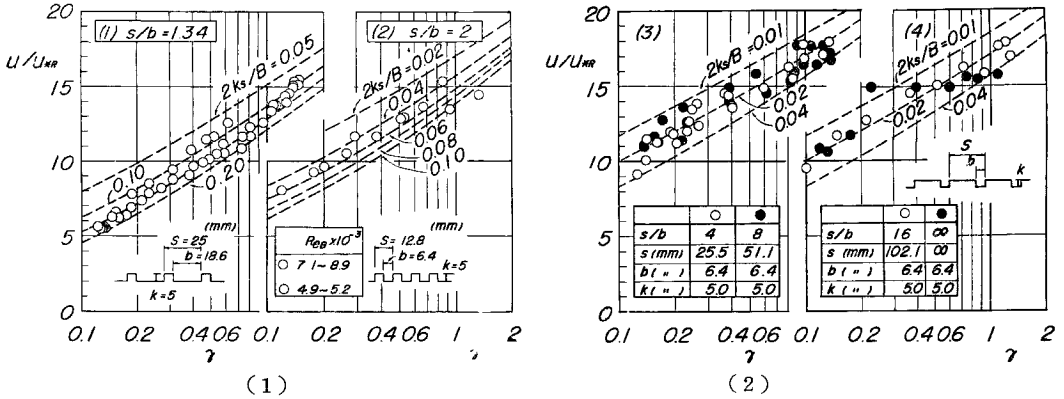


Fig. 6 Relations between friction factor and ratio of hydraulic radius to half width of channel with groove roughness bed

s/b の各組ごとの R_{eB} の値の変化は大きくないから、側壁の影響の算定には各組ごとの R_{eB} の平均値を採用することにする。前報文²⁾ に述べた著者の方式に従つてパラメーター $R_{eB}=5.0 \times 10^3$ を一例として、底面摩擦速度 U_{*1} と側壁摩擦速度 U_{*2} との比 a と抵抗頂 U/U_{*R} および水路半巾 ($\frac{B}{2}$) に對

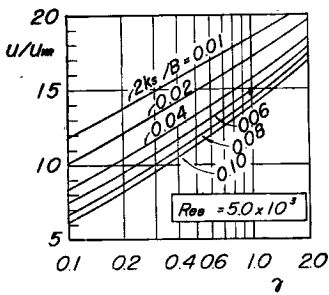


Fig. 8 Variations of U/U_{*R} with γ for constant values of $2k_s/B$ at $R_{eB} = 5 \times 10^3$

する水深の無次元表示 γ との関係を示せば、Fig. 7 のようであり、同様に底面が粒径 k_s の砂粒粗度である場合の $2k_s/B$ と U/U_{*R} および γ との関係を示せば、Fig. 8 のようである。

Fig. 6 には、実験値と砂粒粗度との比較を示すために $R_{eB}=3.3 \times 10^3$ に対する砂粒粗度の曲線群を (1) に、同じく $R_{eB}=5.0 \times 10^3$ に対するものを (2)、(3) および (4) にそれぞれ破線で記入してある。Fig. 6 から実験値がほぼ砂粒粗度と同じ抵抗特性をあらわしていると判定できるが、さらに s/b の各組ごとの

R_{eB} の値に対して Fig. 7 および Fig. 8 と同様の曲線群を計算して、Fig. 5 の実験値に重ね合わせ、個々の実験値の a および $2k_s/B$ を見出せば、底面に関する径深 R_1 と相当砂粒粗度 k_s' との関係を求めることができる。Fig. 9 はその関係を溝深 k で無次元化してあらわしたものである。実験値はやや散らばつ

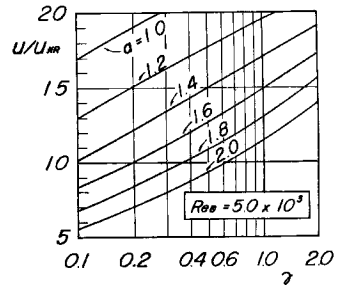


Fig. 7 Variations of U/U_{*R} with $\gamma (=2H/B)$ for constant values of a at $R_{eB}=5 \times 10^3$

ているが、

$$s/b=1.34 \text{ に対して } k_s'/k=3.0$$

$$s/b=2 \quad \text{ " } \quad k_s'/k=1.04$$

$$s/b \geq 4 \quad \text{ " } \quad k_s'/k=0.4$$

と判定することができる。

流れの形態について、Morris は孤立粗度流 (Isolated roughness flow) および干渉流 (Interference flow) のほかに、擬似滑面流 (Quasi smooth flow あるいは Skimming flow) と名付けるものを挙げている^{6),7)}。この流れは壁面の凹部の巾と深さが同程度の場合に、凹部が完全な死水領域となつて、主流がその上を滑る (skimming) というものであり、流水抵抗に与る凹部の役割りは、死水領域内の安定した渦動を維持するためのエネルギー消費であるとされている。溝型粗度の特徴は溝の段落ちによる流れの剥離の影響が狭い溝巾に制約されるということであるから、溝巾に較べて凸部の巾が十分に大きく、かつ凸部の表面が滑らかである場合には、たしかに Morris のいう擬似滑面流が現われるであろう。しかしながら、溝巾が小さくても、それに狭まれる凸部の巾も同程度に小さければ、溝内に全く安定した渦を期待するのは無理のように思われる。このような場合の流れはむしろ完全干渉流と考えるのが妥当であろう。すなわち溝の流水抵抗に与る役割りは、溝内の渦が安定しているかどうかによつて異なり、その指標は相対溝間隔 s/b の大小によつて与えられると考えるのが自然であろう。

滑面流の抵抗特性を形式的に相当砂粒粗度であらわせれば、さきの (5') 式のようにあり、 k_s' は I_e および ν が一定であれば水深の1/2乗に逆比例する。いま溝内の渦が全く安定し、流れが溝上を滑る場合を想定し、凸部の表面も滑らかであるとすれば、 k_s' は水深に対して独立ではない。Fig. 9 において、 $s/b=1.34$ および 2 の組はその凸部が1個の檜棧で形成され、その表面は滑面である。しかし、それらの相当砂粒粗度 k_s' は径深 R_1 に無関係のように見える。したがつてこれらの組は凸部表面の摩擦抗力に依存しないものと考えられ、溝内の渦が直接流水抵抗を決定づける完全干渉流を生ずるものと判定される。

$s/b=2$ の場合に注目すれば、凸部の巾 ($s-b$) と凹部の巾 b とが等しく、かつ本実験では溝深 k もほぼ同値であるから、粗度の尺度として、 b あるいは k だけを用いることができる。このことは砂粒粗度において、粒径 k_s が粗度要素の大きさと同時にその間隔をも代表するものであることと共通している。そして、この $s/b=2$ の相当砂粒粗度 k_s' が溝深 k にはほぼ等しいという結果は興味深い。

つぎに、 $s/b \geq 4$ について、著者は Morris のいう擬似滑面流が得られることを期待したのであるが、Fig. 9 に示したように、これらの相当砂粒粗度 k_s' も予期に反して径深 R_1 に対して特別の関係を見出すことができない。そして相対溝間隔 s/b が増大し、溝の密度が減少しても、各組の平均的な k_s' の値にはほとんど差のないことが注目される。さらに $s/b=\infty$ の場合についても滑面の特性を見出すことができない。しかしながら、 $s/b=\infty$ の場合が滑面の特性を有しないことの原因は、溝粗度製作の技術的不備にあるように考えられる。すなわち Fig. 5 に示したように、この場合の底面は $\pm 1\text{mm}$ の範囲で凹凸があり、波状を呈していたからである。このような波状表面の厳密な取り扱いが不明であるが、一応の目安として自然粗面の取り扱いをし、凹凸の最大偏差に近い値をとつて、 $k_0=2\text{mm}$ とおくと、実験範囲の平均値として、摩擦速度 $u_{*1}=3\text{cm/sec}$ 、 $\nu=8.2 \times 10^{-3}\text{cm}^2/\text{sec}$ であり、粗滑遷移領域に関する壁面 Reynolds 数は、

$$u_{*1}k_0/\nu=3 \times 0.2/8.2 \times 10^{-3}=74$$

である。そしてこの値は抵抗係数が Reynolds 数に無関係となる限界点付近にあり、 k_0 をそのまま相当砂

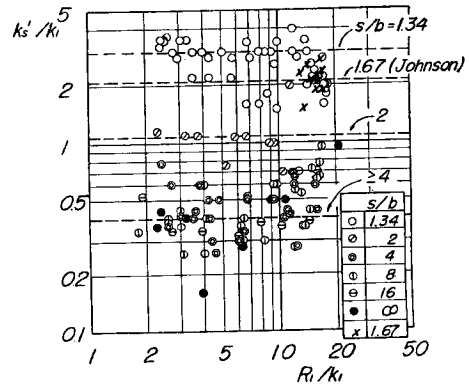


Fig. 9 Equivalent sand grain roughness of groove roughness

粒粗度とすることが許されるように思われる。

Fig. 9 において、 $s/b \geq 4$ の各実験を一括して、 k_s' の平均値を選べば、図のように $k_s'/k=0.4$ 、すなわち $k_s'=2\text{mm}$ である。この値は上の $k_0=2\text{mm}$ と符合する。したがって、これらの $s/b \geq 4$ の各組においては溝の存在よりも、凸部表面の粗さが主役を果しているというべきであろう。

$s/b=4$ の場合の凸部は3個の檜角棒が密着したものであり、その表面はかなり滑らかであつたから、凸部表面の摩擦抗力がただちに水路壁面全体の抵抗特性を代表しているとは一寸考え難いようにも思われるが、ともかく $s/b \geq 4$ の場合における溝の効用はきわめて小さい。

擬似滑面流に関する Morris の考察を引用すれば、溝の存在による抵抗係数の増加量は、

$$f - f_s = 00.5 \frac{p_r}{P_0} \frac{b}{s} \dots\dots\dots (10)$$

である。ここに f は抵抗係数 ($=8/(U/U_{*R})^2$)、 f_s は凸部表面の摩擦抵抗係数、 p_0 は潤辺長、 p_r は溝の辺長である。

いま参考のため、著者の実験における溝の効用も (10) 式で大凡の見当がつけられるとすれば、溝による抵抗係数の増加量は、 $s/b=4$ の場合に実験範囲内で $5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ の程度であり、 $s/b \geq 8$ の場合にはその半分以下ということになる。一方 $s/b \geq 4$ の各組における抵抗項 U/U_{*R} の値は Fig. 6 に示したように $10 \sim 18$ であり、それらの抵抗係数 f は $2.5 \times 10^{-2} \sim 8 \times 10^{-2}$ である。したがって溝の効用は抵抗係数にして 10% 以下であるということになり、この種の実験の測定精度からは、その影響を抽出できないのもやむを得ない。

結局本実験においては、Morris のいう擬似滑面流を直接的に実証できなかつたが、 $s/b \geq 4$ の場合におそらくそのような流れが出現し、溝内の渦は死水領域として、その上の流れと切り離されるものと推定され、溝の流水抵抗への寄与はきわめて少ない。

以上、溝型粗度の抵抗特性は相対溝間隔 s/b の大きさによつて変化するのであるが、少なくとも s/b の小さい場合には完全干渉流であつて、砂粒粗度で置き換えることが可能であり、相当砂粒粗度による評価がきわめて有用であるといえよう。

さきに Fig. 2 に示した各種人工粗度に対する相当砂粒粗度の値は、棧型粗度と溝型粗度との区別をしていないが、前述のように最大抵抗を生ずる粗度密度によつて両者が分類され、棧間隔の大きい棧型粗度に対しては、一般に k_s' が定数でないから、境界点にごく近いもの (少なくとも $s/k < 20$) を除いてそれらの普遍性は疑問であり、とくに水深の基面を棧頂に採つた値は除かねばならない。しかしながら棧間隔の小さい溝型粗度に対しては、これらの資料が有効であるはずであり、その多くが水深基面を棧頂に採つて相当砂粒粗度 k_s' を算定しているから、水路断面効果の見積りに若干の相違があるとしても一応そのままの値を採用することができよう。Fig. 9 著者の実験結果にこれらの資料をつけ加えて、 k_s' と k との比を相対溝間隔 s/b に対してプロットすれば Fig. 10 のようである。

なお同図には著者の棧型粗度 $s/k=10$ ($s/b=1.15$) の実験値を棧頂面を基面として整理し、その相当砂粒粗度の値を棧型粗度との境界点における値の代用として記入してある。

Fig. 10 の結果は明らかに Fig. 2 における実験値の散らばりよりも優れた相関を示しており、溝型粗度における指標が棧型粗度における s/k あるいは b/k ではなく、相対溝間隔 s/b であると結論づけることができる。Fig. 10 において、 k_s'/k と s/b との関係を簡単に直線であらわせば、図の破線のようにであり、

$$\frac{k_s'}{k} = 10 \left(\frac{s}{b} \right)^{-3.3} \dots\dots\dots (11)$$

を与えることができる。(11) 式を (1) 式の数抵抗法則に代入すれば、二次元流に対して、

$$\frac{U}{U_*} = 19.0 \log_{10} \frac{s}{b} + 0.25 + 5.75 \log_{10} \frac{H}{k} \dots\dots\dots (12)$$

が得られ、溝型粗度の抵抗項は溝間隔 s 、溝巾 b および溝深 k の幾何学的要素から直ちに算定できることになる。

なお(11)式を(2)式に対比すれば、棧型粗度における(3)、(4)式に対応して、係数 m および指数 θ はそれぞれ、

$$m=0.33(s/b)^{-3.3}, \theta=0 \dots\dots\dots(13)$$

である。そして水路への適用は矩形断面水路に対しては著者の断面効果算定式²⁾によればよいが、一般的には実用値として、二次元流に関する(12)式対数法則において水深 H を径深 R でおき換えればよい。また(12)式を Manning の粗度係数 n に変形すれば、(8)式と同様に

$$n = \frac{H^{1/6}}{\sqrt{g}} \left/ \frac{U}{U_*} \right.$$

すなわち

$$\frac{n}{k^{1/6}} = \frac{1}{\sqrt{g}} \left(\frac{H}{k} \right)^{1/6} \left/ \left(19.0 \log_{10} \frac{s}{b} + 0.25 + 5.75 \log_{10} \frac{H}{k} \right) \right. \dots\dots\dots(14)$$

となり、 $n/k^{1/6}$ の s/b および H/k に対する変化の一例は

Fig. 11 のようである。

以上溝型粗度の抵抗法則を示したのであるが、ここで注意しなければならないのは、それらの適用限界である。すなわち、

(12)式によれば、 s/b が1に近づけば U/U_{*R} は一定値(最大値)に近づくが、 s/b を大きくすれば U/U_{*R} はいくらでも大きくなり、式の上ではどんな小さい抵抗にでもできるということになる。

まず s/b が1に近接することは棧型粗度へ移行することであり、棧型粗度との区別が問題である。最初に述べたように、棧型粗度と溝型粗度との判別はその水基面によつて定められるべきものであるから、厳密には両者の間に遷移領域がある。ここでは実用上の便宜さを考慮に入れて、このような遷移領域を省略して棧型粗度を $s/k \geq 8$ と割り切ることにしたから、著者の用いた 5.0mm×6.4mm すなわち $t/k=1.3$ の棧に対する境界値 $s/k=8$ を相対溝型粗度に換算すれば、

$$\frac{s}{b} = \frac{s/k}{s/k - t/k} = \frac{8}{8 - 1.3} = 1.2$$

であり、この $s/b=1.2$ は(12)式の一応の適用限界を与えるものである。しかしながら、この境界点は基面の遷移状態を省略して定めたものであるから、境界値付近では、溝型あるいは棧型のいずれに属するとしても實際上差し支えないと考えられ、とくに t/k の値が著者の 1.3 と異なる場合には $s/k \leq 8$ かつ $s/b \leq 1.2$ であることも有り得るから、 $s/b=1.2$ は決定的な下限値ではなく、一つの基準値である。

つぎに s/b の上限については、全抵抗が凸部の表面摩擦抵抗よりも小さくはならないということから定められる。厳密に言えば、溝間隔が非常に大きくなつても、溝の存在が全く流れに影響を及ぼさないとはいえない。しかし、実際上安定渦の溝の影響はきわめて小さいから、(12)式が凸部表面の摩擦抵抗と等しくなるような相対溝間隔 s/b をもつて、その適用可能上限と定め、それ以上の s/b に対しては、溝の影響を

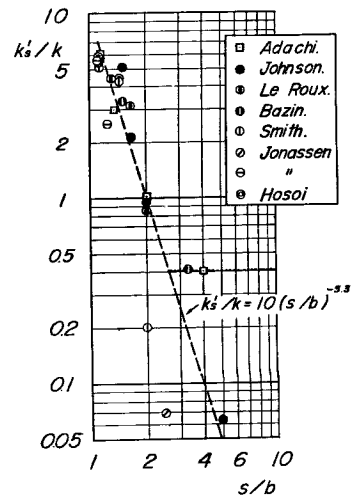


Fig. 10 Relation between k_s'/k and s/b for groove roughness

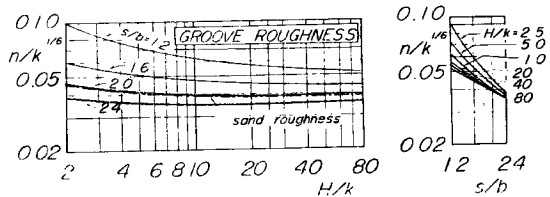


Fig. 11 Manning's coefficient of groove roughness

省略して、凸部表面の摩擦抵抗だけをとりあげれば十分であろう。たとえば著者の実験においては $s/b = \infty$ に対して $k_s'/k = 0.4$ であり、少なくともこれを下回ることはないから、Fig. 10 に示すように、(11) 式したがって (12) 式の抵抗法則の適用は $k_s'/k \geq 0.4$ すなわち $s/b \leq 2.6$ に限られねばならない。そして $s/b \geq 2.6$ に対しては溝の存在を省略すればよい。

米国の W.E.S.⁸⁾ において行なわれた各種人工粗度の実験の中、刷毛仕上げコンクリート水路に直角三角形断面の溝を刻み込んだ形式の粗度については、溝を刻んだことの特性が認められないという理由でその資料は報告書に記載されていない。これはおそらく相対浅間隔 s/b が大きく、上記の (12) 式の適用限界を超えたためであろうと推察される。

4. 結 語

以上、本研究では、棧型粗度と溝型粗度の定義を明らかにし、それぞれの抵抗特性を吟味し、実験資料にもとづいてその実験式を設定した。すなわち、

$$\text{棧型粗度} : \frac{U}{U_*} = 1.50 \log_{10} \frac{s}{k} - 1.91 + \left\{ 5.75 + 0.12 \left(\frac{s}{k} \right)^{0.8} \right\} \log_{10} \frac{H}{k}$$

$$\text{ここに } 8 \leq s/k < 160$$

$$\text{溝型粗度} : \frac{U}{U_*} = 19.0 \log_{10} \frac{s}{b} + 0.25 + 5.75 \log_{10} \frac{H}{k}$$

$$\text{ここに } 1.2 \leq s/b \leq 2.6$$

である。棧型粗度に関する従来の研究資料は省略したが、前年度の報文に見られるように著者の実験結果は各資料に対して満足できる適合性を示すものである。したがってこれら両実験式はかなりの普遍性を有するものと考えられ、模型実験における人工粗度選定の基礎となり得るものである。なお人工粗度の今一つの基本型としてイボ状の粗度要素で形成されるイボ型粗度が挙げられるが、これについては実験の終了をまつて次の機会に述べたい。

おわりに本研究の遂行にあたって、終始暖い御指導と御鞭撻を賜わつた矢野勝正教授に深甚なる謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 足立昭平：開水路模型実験の相似律に関する研究—模型歪みの効果について—，京大防災研究所年報，第2号，昭33.
- 2) 足立昭平：開水路における棧型人工粗度の実験的研究，京大防災研究所年報，第3号，昭34.
- 3) Johnson, J. W. : Rectangular Artificial Roughness in Open Channels, Trans., A.G.U. Vol. 25, 1944.
- 4) Powell, R. W. : Flow in a Channel of Definite Roughness, Trans., A.S.C.E., Vol. 111, 1946.
- 5) 細井正延：路水路乱流の速度分布および摩擦抵抗について，土木研究，第1輯，1948.
- 6) Morris, H. M. : Flow in Rough Conduits, Trans., A.S.C.E., Vol. 120, 1955.
- 7) Morris, H. M. : Design Methods for Flow in Rough Conduits, Proc., A.S.C.E. Vol. 85, 1959.
- 8) Waterways Experiment Station : Study of Finite Boundary Roughness in Rectangular Flumes, Technical Memorandum No. 2-364, 1953.