

人工粗度の実験的研究

— イボ型粗度 —

足 立 昭 平

EXPERIMENTAL STUDY ON THE ARTIFICIAL SPOT ROUGHNESS

by Dr. Eng. Shohei ADACHI

Synopsis

This paper is a part of the series of the experimental study on the resistance character of some artificial roughnesses for the purpose of application to open channel models with fixed bed. The experiments were conducted in the 20cm wide and 14.4m long steel flume with 1/500 slope. Roughness elements consisting of vinyl piece, 5mm×5mm×6mm, were placed on the bed of the flume at various longitudinal and transverse spacings. The data are analyzed referring to the strip roughness described in the previous reports^{1),2)}. A logarithmic resistance formula is developed in which the resistance factor is related to the height and spacing of the roughness element. The experimental results are compared with those of the investigation in W.E.S..

固定床開水路模型実験水路への適用を目的として、著者は数年来人工粗度の抵抗特性を実験的に究明することに努め、粗度要素が線状をなして水路を横切る棧型粗度および溝型粗度について一応の結論を得たが¹⁾、²⁾、さらに、これらとともに人工粗度の代表的形式の一つである点状の粗度要素をもつイボ型粗度について、若干の実験結果を得たので、ここに報告する。

1. 実験の種類

使用した実験水路は、棧型粗度および溝型粗度の実験に用いた巾 20cm、長さ 14.4m の鋼製水路であり、水路勾配は1/500である。粗度要素は厚さ 5mm のビニール板を 5mm×6mm のサイの目に切つて作り、これをあらかじめ水路底面に合わせて裁断した厚さ 5mm のビニール板に、所定の間隔で接着し、水路底面にはめ込んだ。本実験におけるイボ粗度要素の配置は Fig. 1 に示す 6種類であるが、各配置様式の寸法を表示すれば、Table 1 のようである。

ここに、相対イボ間隔はイボ粗度要素 1 個当りの水路壁面々積 S とイボ粗度要素の流れに対する投影面積 $F(=kw)$ との比であつて、粗度要素の密度をあらわす parameter である。 S は配置様式によつて異なるが、

様式 1 に対して、 $S = s_1 s_2 / 2$

様式 2 に対して、 $S = s_1 s_2$

である。

2. 実験結果とその考察

粗度要素の各配置について得られた実験の結果を、抵抗項 U/U_{*R} (U は平均流速、 U_{*R} は全潤辺に開

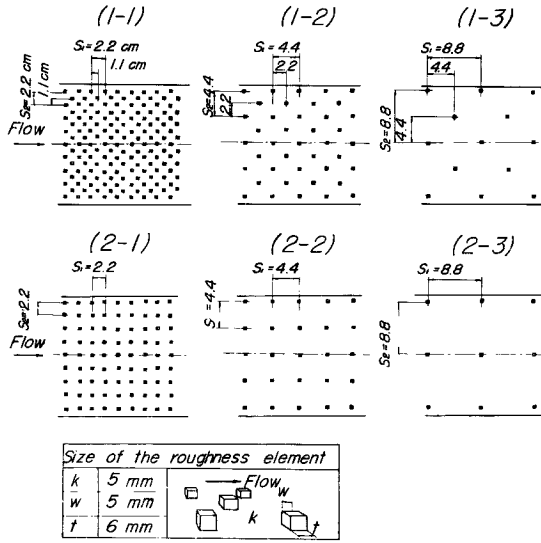


Fig. 1 Pattern of spot roughness

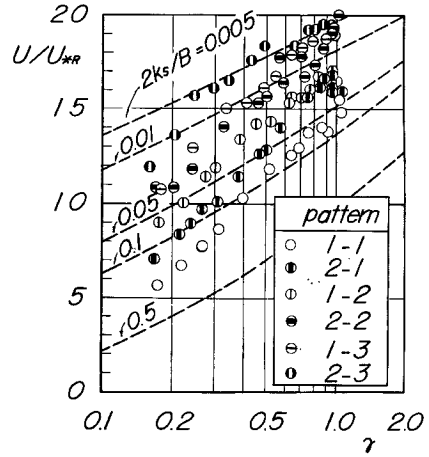


Fig. 2 Variations of resistance factor U/U_{*R} with relative depth γ

Table 1

Pattern	Spacing of roughness elements		Area of flume bed for one roughness element $S(\text{cm}^2)$	Relative spacing of spot roughness S/F
	Longitudinal $s_1(\text{cm})$	Transverse $s_2(\text{cm})$		
1-1	2.2	2.2	242	9.7
2-1	2.2	2.2	484	19.4
1-2	4.4	4.4	968	38.8
2-2	4.4	4.4	1936	77.5
1-3	8.8	8.8	3872	155
2-3	8.8	8.8	7744	310

する平均摩擦速度) と水深の水路半巾に対する比 $\gamma (= 2H/B)$ について図示すれば、Fig. 2 のようである。これらの実験における水面勾配および水温には若干の変動があり、滑面両側壁の影響を決定づけるパラメーター $R_{eB} = \sqrt{gI_e B/2} B/2\nu$ の値は、 $3.1 \times 10^3 \sim 3.5 \times 10^3$ であったが、平均的に 3.3×10^3 と見なして十分であろう。ここに、 g は重力の加速度、 I_e は流水のエネルギー勾配、 B は水路巾および ν は流水の動粘性係数である。Fig. 2 に併記された破線群は、 $R_{eB} = 3.3 \times 10^3$ における粒径の砂粒粗度の抵抗項を、Nikurades の実験常数に準拠して計算したものであり、それらと実験値との比較から、本実験におけるイボ型粗度が、いずれの配置様式についても、砂粒粗度と異なる抵抗特性を有し、水深の増大にともなう抵抗の減少が著しいといえる。このことは各実験値に対する相当砂粒粗度 k_s' が同一の pattern についても一定値をとらないことをあらわしており、著者の方法¹⁾によつて、個々の実験値に対すると底面の径深 R_1 との関係が求めれば、Fig. 3 のようである。この結果を前報の棧型粗度に対比すれば、粗度密度の高い pattern 1-1 ($S/F = 9.7$) の値が、棧型粗度の $s/k = 40 \sim 80$ (s は棧間隔、 k は棧高) の実験値にほぼ匹敵している。粗度要素の間隔によつて流れの形態に相違のあることは、棧型粗度によつて確めたのであるが、ここに得られたイボ型粗度の抵抗特性を棧型粗度のそれから類推するために、水路壁面抗力の構成と流れの形態の分類について再考してみよう。

いま粗度要素1個当りの水路壁面々積 S についての全抗力を D_T とおけば, D_T は粗度要素1個の圧力抗力 D_r と壁面 S の摩擦抗力の和であるから, 壁面の剪断応力を τ であらわして,

$$D_T = D_r + \int_S \tau dS$$

で与えられる。これを抵抗係数で書き換えれば,

$$S \frac{\rho}{2} \lambda U^2 = \frac{\rho}{2} C_D F U^2 + \int_S \frac{\rho}{2} \lambda_w U^2 dS$$

すなわち,

$$\lambda = \left(C_D \frac{S}{F} \right) + \frac{1}{S} \int_S \lambda_w dS \dots (1)$$

である。ここに, λ は抵抗係数, C_D は平均流速 U に対して定義される粗度要素の圧力抗力係数, λ_w は壁面の摩擦抵抗係数である。

(1) 式は抵抗係数の一般的表現式であるが, その各項に関する微細な解析はきわめて困難である。前報の棧および溝型粗度に関する実験的考察においては, 各項の議論を省略して, 次元解析的な手法を用いて実験結果を整理し, (1) 式の右辺2項をまとめて指数関係として取り扱った。ここでも便宜的に同様の手法をとるが, (1) 式の構成を流れの形態から推論しておくことは, 棧型粗度に関する考察をもとにして, 本実験結果を洞察するたすけになるであろう。(1) 式の構成と流れの形態に関する抽象的分類は下の表のように考えられる。

この分類は流れの形態を決定づけるパラメーターが S/F であるとしたものであるが, 粗度要素の後流の様相は粗度の種類によつて相違するであろうから, S/F の分類を具体的数値であらわすには, 粗度の種類を

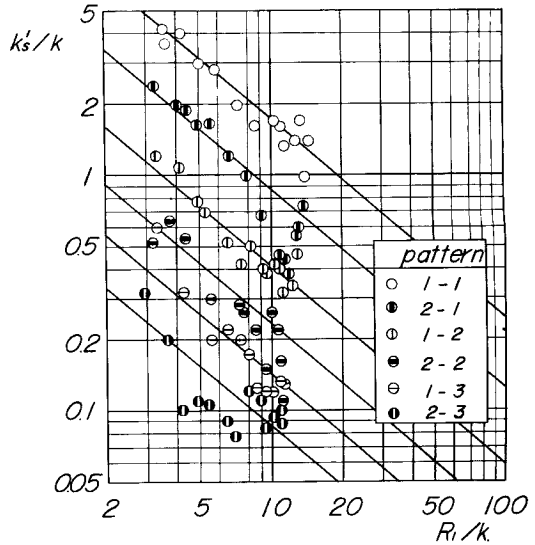


Fig. 3 Variation of k'_s/k of the spot roughness with R_1/k

流れの形態	孤立粗度流		不完全干渉流	完全干渉流
分類番号	[B]	[A]	[C]	[D]
粗度要素の密度	非常に疎	やや疎	やや密	密
(1) 式右辺第1項 $C_D \frac{S}{F}$	粗度要素の抗力係数 C_D は固有な値をとり, S/F にの値に影響されないが, 流れが一様でないから相対粗度 H/k の関数になる。		粗度要素相互の干渉を生じ, S/F の値によつて, 干渉の度合が変化し, C_D は H/k と S/F の関数になる。	後流の干渉が高度に進み, 粗度要素によつて生ずる渦の拡散は次々に重なり合い, 水路壁
(1) 式右辺第2項 $\frac{1}{S} \int_S \lambda_w dS$	後流の影響はごく部分的で, λ_w は壁面に固有な摩擦係数でおきかえられる。	後流の影響が, 壁面の大部分に及び λ_w は S/F の関数になる。	λ_w は粗度要素からの距離の関数になるはずである。	面は一樣な強い乱れの層に蔽われてしまうから, 両項の分離は困難となる。
抵抗特性	S/F の値が非常に大きいから, 第1項は小さく, ほとんど人工粗度を除いた壁面の抵抗特性で近似される。	上の両項の構成から, その抵抗係数は S/F および H/k の関数である。棧型粗度において, $160 \leq S/F \leq 8$ は [C] の分類に属すると考えられる。		抵抗特性は砂粒粗度によつて代表され, 相当砂粒粗度は一定値をとる。

限定する必要があるであろう。棧型粗度に関する著者の前実験では、 $160 \geq s/k \geq 8$ の場合を分類 [C] に属すると判断した（棧型粗度は二次元的であるから、 s/k は S/F に等しい）。しかし、イボ型粗度の後流の様相は棧型粗度のそれと必ずしも同一ではないから、棧型粗度に対する S/F の限界値および抵抗則はそのままではイボ型粗度へ適用できないと考えるべきであろう。いま、両者の相違を推察する一つの手段として、一様な流れの中に置かれた有限長の物体の抗力をとりあげてみよう。

たとえば、一様な流れの中にある直径 d 、長さ l の円柱の抗力係数は臨界値以上の Reynolds 数に対して一定値をとり、 l が有限であれば、 d/l の関数であることが知られている。そして、 $d/l=1$ の円柱の抗力係数は、 $d/l=0$ すなわち無限長の円柱の抗力係数の約 $1/2$ である。また、高さ h 、長さ w の平板についても $k/w=1$ の平板の抗力係数は、 $k/w=0$ のその約 $1/2$ であることが実験的に認められている³⁾。物体の抗力係数は、その後流の規模をあらわす係数でもあるから、これらの両例は、物体の長さが有限で、かつ小さくなるほど後流の規模が小さくなることをあらわしている。水路壁面にとりつける粗度要素は、一様な流れの中ではなく、速度勾配の非常に大きい流れの中にあるから、後流の構造が一層複雑であるが、粗度要素の流れに直角方向の長さが有限であることの影響は、定性的にこれらの両例と同様であると考えてよいであろう。

したがって、一般にイボ粗度要素の後流の規模は棧粗度要素のそれよりも小さく、流れの形態を分類するパラメーター S/F の限界値は棧型粗度に関する値よりも小さいはずである。かりに、一様流における有限長物体の抗力係数の減少比を、イボ型粗度と棧型粗度の対応に模擬できるとすれば、円柱と平板の例において、 $d/l=0$ および $k/w=0$ の抗力係数がそれぞれ $d/l=1$ および $k/w=1$ の約 2 倍であることから、

$$2 \times (\text{相対イボ間隔 } S/F) = (\text{相対棧間隔 } s/k)$$

となる。この模擬はなお仮説にすぎないが Fig. 3 の実験結果において、もつとも粗度密度の大きい pattern 1-1 できさえも相当砂粒粗度 k_s' が一定値でなく、流れの分類 [D] にほど遠いことについて、イボ粗度の $S/F=9.7$ が、棧型粗度の $s/k=9.7$ に対応しないことの論拠とすることは許されるであろう。

もちろん、イボ型粗度を棧型粗度に換算することは、さほど単純なものではなく、Fig. 3 の各 pattern の実験値の棧型粗度への対応は、上の模擬 $2S/F=s/k$ よりも、むしろ $7S/F=s/k$ に近い対応を示している。この両者の関係については、後流の二次元的拡散と三次元的拡散の相違を明らかにしなければならないが、ここでは、本実験範囲内のイボ型粗度について、一定の砂粒粗度への換算を固執しないでよいことの説明だけに満足し、棧型粗度の実験常数にもとらわれな

いで、実験結果をとり纏めることにする。
イボ型粗度においても、粗度要素の密度を極端に大きくすれば、棧型粗度と溝型粗度との対応に見られるように、その基面は粗度要素の底面から頂面へ移行するであろう。しかし、本実験範囲では、棧型粗度との類似から、基面は底面にあると解して十分である。したがって、線状粗度の溝型粗度に対比される形式のものを除外して、底面を基面とする点状粗度をイボ型粗度と定義する。イボと名付たのも、底面からの突起を意味する通俗的表現に従つたものである。

Fig. 3 の各 pattern ごとの実験値は、同図に付記した直線によつて代表される。すなわち、棧型粗度と同様に、

$$\frac{k_s'}{k} = 30m \left(\frac{R_1}{k} \right)^{-\theta} \dots \dots \dots (2)$$

の指数関係を適用できる。同図の各直線の勾配と、 $R_1/k=1$ における値から、各相対イボ間隔 S/F に対す

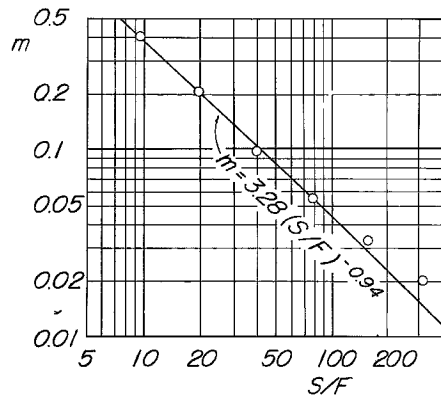


Fig. 4 Variation of m with S/F

る θ および m を求めれば、まず、 θ が本実験範囲内で一定値であることが注目され、

$$\theta = 0.84 \dots\dots\dots (3)$$

であり、また、 m の値は Fig. 4 に示されるように、粗度要素の配置様式にほとんど影響されないで、 S/F だけによつて決定づけられるように見え、 S/F が非常に大きくなるとやや離れる傾向はあるが、両者は図上でほぼ直線の関係にある。すなわち、

$$m = 3.28(S/F)^{-0.94} \dots\dots\dots (4)$$

となる。 $S/F \geq 155$ の値が (4) 式から離れる傾向にあることは、おそらく流れの形態が分類 [C] から [B]、[A] へ移行するあらわれであろう。

(3) および (4) 式から、(2) 式は

$$\frac{k_s}{k} = 98.4 \left(\frac{S}{F} \right)^{-0.94} \left(\frac{R_1}{k} \right)^{-0.84} \dots\dots\dots (5)$$

となり、この場合の底面に関する径深 R_1 は、二次元流の水深 H に相当すると考えられる。そして、二次元流の対数抵抗則はよく知られているように、

$$\frac{U}{U_{*H}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{H}{k_s} \dots\dots\dots (6)$$

であらわされるから、イボ型粗度に関する二次元流対数抵抗則として、次の実験式が与えられる。

$$\frac{U}{U_{*H}} = 10.6 \log_{10} \frac{H}{k} + 5.40 \log_{10} \frac{S}{F} - 5.47 \dots\dots\dots (7)$$

3. W.E.S. における実験資料による検討

(7) 式は両側壁滑面の水路における実験値から求めたイボ型粗度の基本的抵抗特性をあらわし、全潤辺イボ型粗度の場合は、これにもとづいて側壁の影響を考慮すればよいことになる。著者の実験水路においては全潤辺イボ型粗度を省略したので、その補足を兼ねて、米国 W.E.S. における実験資料⁴⁾を引用し、あわせてイボ粗度要素の形状、寸法および配置の相違に対する著者の実験式の適用性を検討しよう。

Table 2 Summary of spot roughness in W.E.S.

Run	Roughness dimension (ft)						Flume width B(ft)	$\frac{S}{F}$	$\frac{2k}{B}$	$\log_{10} \frac{1}{m \left(\frac{2k}{B} \right)^{1.84}}$
	k	p	t	s	p/k	t/k				
1 (660~667)	0.031	0.031	0.031	0.33	1.0	1.0	2.08	115	0.031	4.19
2 (693~703)	"	"	"	0.17	"	"	2.00	57.5	"	3.91
3 (704~714)	0.062	"	"	0.33	0.5	0.5	"	"	0.062	3.36
4 (739~748)	"	"	*	"	"	*	1.00	"	0.124	2.81
5 (668~681)	0.031	"	0.031	0.17	1.0	1.0	2.08	28.8	0.031	3.63
6 (648~659)	0.042	0.042	0.042	0.22	"	"	"	"	0.042	3.39
7 (682~692)	0.031	0.031	0.031	0.17	"	"	1.00	"	0.062	3.08
8 (602~611)	0.062	0.062	0.062	0.33	"	"	"	"	0.124	2.52
9 (612~623)	"	"	"	0.25	"	"	"	16.3	"	2.29
10 (615~726)	"	0.031	0.031	0.17	0.5	0.5	"	14.4	"	2.24
11 (624~635)	"	0.062	0.062	"	1.0	1.0	2.08	7.2	0.062	2.51
12 (636~647)	"	"	"	"	"	"	1.00	"	0.124	1.96
13 (727~738)	"	0.031	0.031	0.08	0.5	0.5	"	3.6	"	1.67
13 (749~758)	"	"	*	"	"	*	"	"	"	"

* 16-gage sheet aluminum, k =height of roughness element

W.E.S. の実験に用いられたイボ型粗度は、4種のモルタル製立方体および16番アルミ板截片の5種の粗度要素に関するものであり、それらの寸法および配置間隔は Table 2 のようである。なお粗度要素の配置様式はいずれも Fig. 1 の pattern と同類の千鳥形である。

著者の用いたイボ粗度要素を ft に換算すれば、 $k=0.016ft$, $w=0.016ft$, $t=0.020ft$ であるから、W. E. S. のイボ粗度要素は著者の約2~5倍の大きさであり、配置の様式も著者の場合は $s_1=s_2$ であるから、Table 2 に示すように、Run 693~703 を除いて形式に相違がある。全潤辺に均一に粗度を付けた矩形断面水路における側壁の効果は $m(2k/B)^{\theta+1}$ をパラメーターとして決定づけられる。各組の実験に対するその値は、 m および θ に (4) および (3) 式を適用して、Table 2 に与えてある。これらの値を用いて、全潤辺イボ型粗度の抵抗抗 U/U_{*R} を R/k に対して算出すれば、Fig. 5 のようになる。ここに R は全潤辺に関する径深である。これらの計算値と各組の実験値との対応を図示すれば、Fig. 6 のようである。全般的に実験値の方が緩やかな勾配をとる傾向が見られ、と

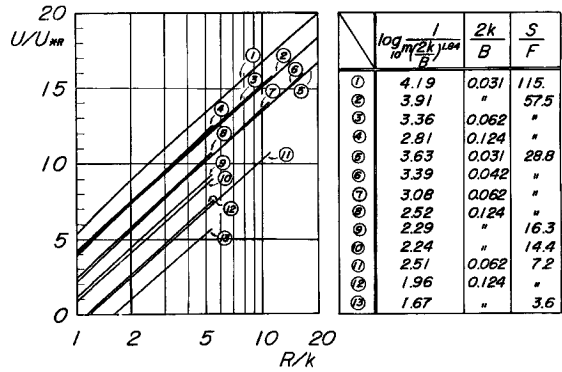


Fig. 5 Relations between U/U_{*R} and R/k for some values of $m(2k/B)^{\theta+1}$

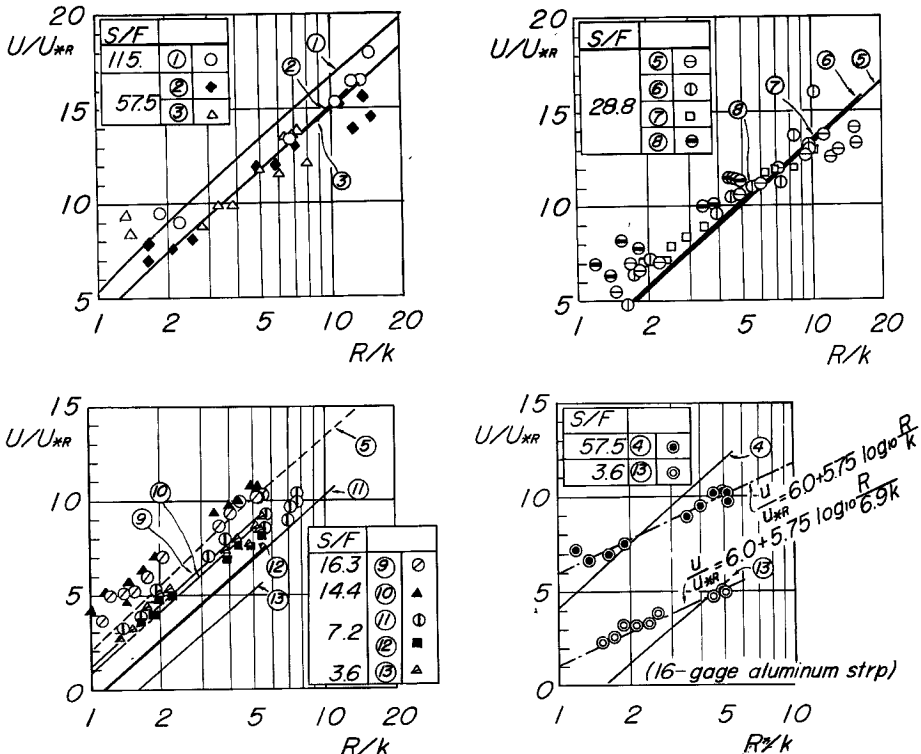


Fig. 6 Variations of U/U_{*R} with R/k for the experimental data in W.E.S.

くにアルミ截片のイボ粗度においてその傾向が著しい。これらの図を個々に検討してみると、まず $S/F \geq 28.8$ の各組においては、計算値がほぼ満足できる結果を与えている。つぎに、 $16.3 \geq S/F \geq 3.6$ の各組においては、 U/U_{*R} の R/k に対する勾配は計算値と実験値と大差がないが、両者の値には明瞭な食い違いがある。この食い違いに対する適当な説明は見当たらないが、実験値について、 $S/F=16.3$ および 14.4 の抵抗項の値が $S/F=28.8$ のそれにはほぼ等しく、粗度密度が 2 倍近くも増大しているにもかかわらず、抵抗に変化が見られないという点は理解しにくいところであり、かりにこれらが粗度要素相互の遮蔽効果増大によつて、丁度線状粗度における棧から溝への遷移に相応するものと考えれば、つぎにそれ以上に粗度密度の大きい $S/F=7.2$ および 3.6 の実験の抵抗値が増大していることを説明できない。W.E.S. の実験水路の母体が刷毛仕上げコンクリートであつて、滑面を母体とする著者の実験水路との相違もあり、このような疑点に対してはなお慎重でなければならないが、少なくとも粗度密度の比較的疎な場合に対して、(7) 式の適用性は十分であり、同式をイボ型粗度の実験式として実用できると考えてよいであろう。

W.E.S. の実験値が著者の計算値よりも U/U_{*R} の R/k に対する勾配がやや緩やかであつて、常数 θ をいくらか小さく選ぶ方が適当と思われることについては、おそらく粗度要素の流水方向の厚さの相違によるものであろう。すなわち、粗度要素の厚さが薄いほどその抗力が大きく、個々の粗度要素の抗力が大きいほど流れは完全干渉流に近づくであろう。Fig. 6 の末図において、アルミ截片のイボ粗度の抵抗特性がモルタル立方体のイボ粗度のそれとかけ離れて、とくに緩やかな勾配を示すことは、その極端な場合をあらわしていると考えることができよう。実際にこれらの実験値に対しては、完全干渉流として $\theta=0$ と見なし、砂粒粗度へ換算の方が適当であり、図に鎖線で記入した直線は断面効果を径深 R で代表せしめた完全干渉流としての近似曲線であつて、これから相当砂粒粗度 k_s' を算出すれば、

$$S/F=57.5 \text{ に対して, } k_s'/k=1.0$$

$$S/F=3.6 \text{ に対して, } k_s'/k=6.9$$

となる。さきにイボ型粗度の相対間隔 S/F の 2 倍を棧型粗度の相対間隔 s/k に模擬したが、この模擬に従えば、上記の値はそれぞれ棧型粗度の

$$d/k=115 \text{ に対して, } k_s'/k=1.0$$

$$s/k=7.2 \text{ に対して, } k_s'/k=6.9$$

に対応することになる。この換算が単純でないことは $s/k=115$ の棧型粗度が不完全干渉流であることから明らかであるが、一応の値としては、前報文に述べた棧型粗度の実験値に符合しているようにも思われる。しかしながら棧型粗度については薄肉の粗度要素に関する十分な実験例がないから、さらに詳細な議論は将来の研究にまつべきであろう。したがつて、ここでは、 t が 0 に近い薄肉の場合を除外して、考察の対象を立方体粗度要素に限定することにしよう。

以上 W.E.S. の実験資料については、なお不明の点が残されており、さらに数多くの実験値の集積を要するが、一応立方体粗度要素に関して、著者の実験常数が実用できると判断することができよう。

4. 結 語

以上、本研究ではイボ型粗度の抵抗特性を棧型粗度にならつて実験的に検討し、粗度要素の配置様式は左程重要でなく、相対イボ間隔 S/F が主要なパラメーターであることを確め、実験資料にもつづいて、立方体粗度要素に対する実験常数を与え、二次元流に対して、

$$\frac{U}{U_{*H}} = 10.6 \log_{10} \frac{H}{k} + 5.40 \log_{10} \frac{S}{F} - 5.47 \dots \dots \dots (7)$$

を導いた。

しかしながら、イボ型粗度においては、粗度要素の流水方向の厚さがかなり大きい影響力を有するよう思われ、上式の適用は、粗度要素形状が著しく相違する場合を除外して考慮すべきである。とくに薄肉截片

の粗度要素について、W.E.S. の実験資料はむしろ完全干渉流に近い特性を示しており、これらについてはさらに今後の研究にまつべきものが多い。

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った矢野勝正教授、石原藤次郎教授に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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，pp. 17-33.
- 2) 足立昭平：人工粗度の実験的研究—棧型粗度と溝型粗度，京大防災研究所年報，第 4 号，昭36，pp. 185-193.
- 3) 藤本武助：応用流体力学，1942，pp. 403-418.
- 4) Waterways Experiment Station: Roughness Standards for Hydraulic Models, Report No.1, Study of Finite Boundary Roughness in Rectangular Flumes, Corps of Eng., U.S. Army, Technical Memo., No. 2-364, June 1953.