

粗滑遷移領域における棧粗度の抵抗特性について

楊 永荻*・大同淳之**

乱流の粗滑遷移領域における流水抵抗の機構は壁面の粗度の配列によって異なる。本論文では、棧粗度背後の剥離流及び流水抵抗の実験結果に基づいて、粗度後流の剥離域の長さを変数として粗滑遷移領域の棧粗度の抵抗式が提案された。棧粗度の抵抗は、滑面と粗面においてはそれぞれレイノルズ数および相対粗度で表されるが、遷移領域においてはそのほかに k_s/k のパラメータが増えることが明らかになった。

Key Words : smooth-rough transition region, strip roughness, flow resistance, separation flow

1. まえがき

棧粗度は実用的な人工粗度の一つとして、水理模型実験、河川護岸などに広く利用されている。従来、棧粗度の水理特性については数多くの研究、例えば、Jonson¹⁾、Powell²⁾、Morris^{3),15)}、足立⁴⁾、山岡⁵⁾、古屋¹⁷⁾、Knight²⁰⁾等があるが、大部分は、乱流の粗面に限って行われ、粗滑遷移領域についてはなされていない。一様砂粒壁面の抵抗については Nikuradse⁶⁾ によって層流域から乱流の各領域まで流水抵抗の実験結果が得られている。しかしながら、Fig.1 に示すように、Colebrook and White⁷⁾ の実験による市販管と非一様砂についての流水抵抗は Nikuradse の結果と相違している。これは、粗度の配列によって、粗滑遷移領域における抵抗特性の違いがあることを示唆している。

棧粗度周りの流れでは流れの外部条件によって、粗度背後に剥離流が存在する。流れのエネルギー損失の大部分は壁面近くで生じるので、この剥離流が流れの抵抗に大きな影響を及ぼす。三次元的な形状の物体の下流部の流れの構造に関しては、高橋⁸⁾、Chen⁹⁾、Okamoto^{10),11)}、玉井^{12),13)}、Furuya¹⁶⁾ などによって検討され、粗度下流部の剥離流の発達によって、床面の形状抵抗が増加するということが明らかにされている。従って、粗度後流の流れの構造を明かにすることは流水抵抗の特性の解明に役立つと思われる。

本論文は、円柱粗度後流の剥離構造および各種棧粗度の流れの抵抗について実験的に調べるとともに、粗度背後の剥離流の変化特性と流水抵抗との関係、とくに乱流粗滑遷移領域におけるその抵抗特性を検討した。また、

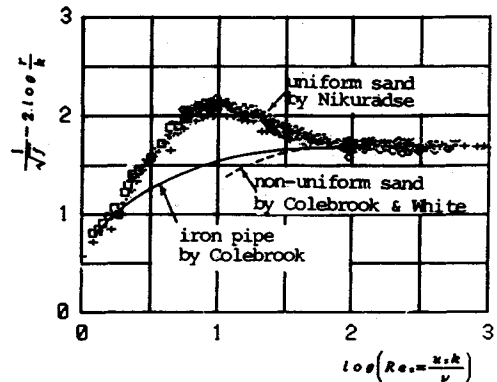


Fig.1 Resistance characteristic of uniform sand by Nikuradse and non-uniform sand and iron pipe by Colebrook and White

導いた結果に基づいて、Nikuradse による一様砂粒粗度の実験データを考察し、棧粗度と一様砂粒粗度との抵抗特性の相違点を明らかにしたものである。

2. 実験概要

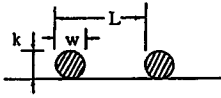
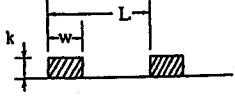
実験に用いた水路は長さ 14.3 m、幅 0.15 m、高さ 0.75 m の鋼製開水路である。実験は Fig.2 に示すように、水路の側面に流れに対して垂直な方向に棧粗度を設置し、棧粗度の大きさと相対棧間隔を変化させて行った。各実験 case の粗度の配置は Table 1 に示す。水路に沿って設置された 5 本の水位計によって、水面勾配と水深を求めた。

各実験はアスペクト比 b/h が 0.12 以下で行った。ここに、 b は水路の半幅、 h は水深である。筆者らはこのような条件下での側面の抵抗は 2 次元流として扱われることを検証した¹⁸⁾。Fig.3 は側面に砂粒 (直径 $d=1.6$ mm) を貼り付けた水路における $b/h=0.107$ のときの側面せん断力分布の一例であり、壁面せん断力は流速分

* 学生会員 工修 立命館大学大学院理工学研究科 (〒603 京都市北区等持院北町 56-1) (現九州大学建設都市工学科助手)

** 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科

Table 1 Experimental conditions

No	shape	height of roughness k (cm)	width of roughness w (cm)	distance of roughness elements L/k	relative height of roughness b/k	chart
1	circular bar	0.4	0.4	12	17.38	
2				8	6.3	
3		1.0	1.0	4	6.75	
4				2	7.0	
5				16	6.0	
6		1.5	1.5	8	6.0	
7				4	6.0	
8	rectangular bar	1.0	0.5	6	6.44	
9				16	7.20	
10		1.0	1.0	8	6.4	
11				4	7.65	
12				2	7.65	
13				32	5.85	
14		1.0	2.0	16	7.5	
15				8	7.55	
16				4	6.45	

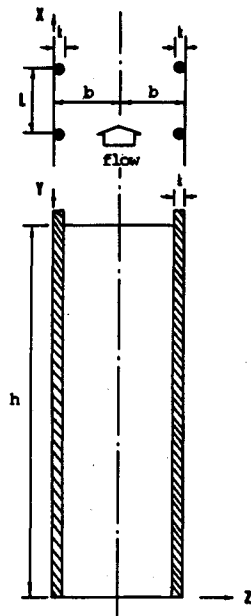


Fig.2 General view of experimental channel

布のデータから算定した。図より、側面せん断力は底面近くの $y/b=1.60$ 以内では小さいが、それより上部では一様で、 $\tau_s = \rho g b l_e$ に一致する。この水路は側面に粗度を設置することで、相対粗度 b/k の値を一定にし、流水抵抗則の評価を行うことができる。ここに、 τ_s は側面せん断力、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 l_e は

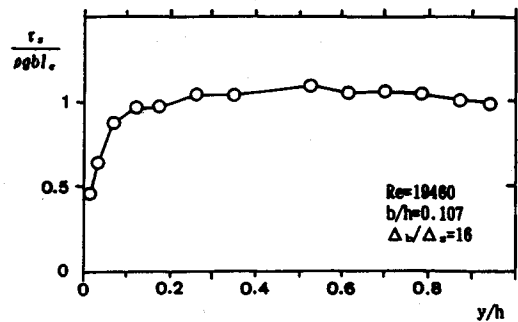


Fig.3 Boundary shear stress distribution along side wall in open channel flow with $b/h=0.107$

エネルギー勾配、 k は粗度の高さである。また、幅広い開水路流より、自由水面と不等流の影響を小さくすることができる。特に、相対粗度の小さいとき、水面波が水面勾配の測定に及ぼす影響を避けられるという利点を有する。

また、粗度後流の流れの構造と流水抵抗との関係を究明するために、長さ 13.0 m、幅 0.3 m の勾配可変式開水路で粗度の下流方向の流速分布と乱れ強度分布を測定し、粗度後流の剥離域の変化特性を調べた。流速の計測は超小型プロベラ式流速計 ($\phi=3$ mm) を用いた。流速計の計測範囲は 2.5~80.0 cm/sec である。剥離域の境界はプロベラの回転方向によって判断し、また、カラーインクを用いたトレーサー法によって、局部的流況を可視化して、粗度を越える流れの剥離点および粗度下流の再

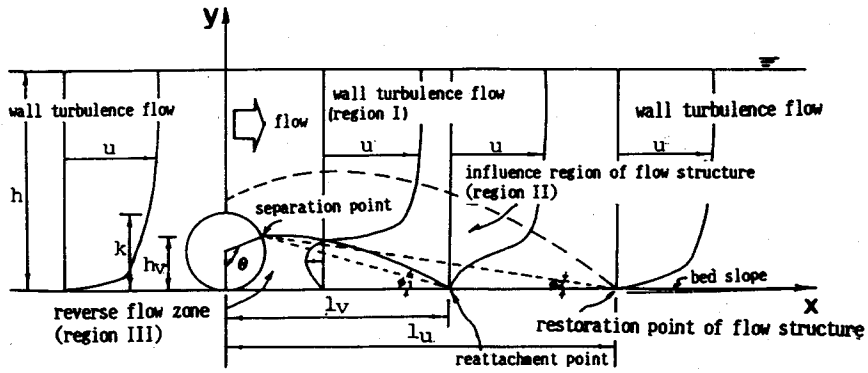


Fig. 4 Regions of roughness wake

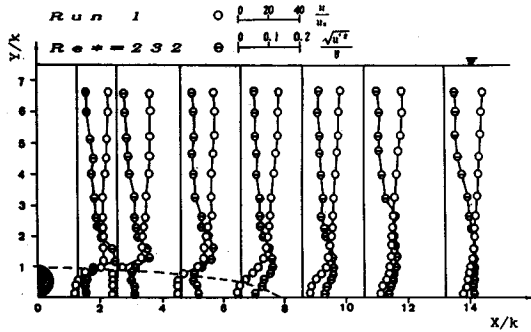


Fig. 5(a) Velocity and turbulent intensity distribution behind roughness element with $Re_* = 232$

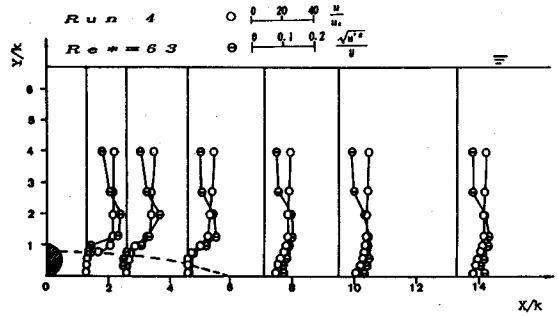


Fig. 5(c) Velocity and turbulent intensity distribution behind roughness element with $Re_* = 63$

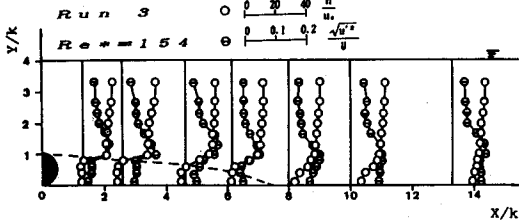


Fig. 5(b) Velocity and turbulent intensity distribution behind roughness element with $Re_* = 154$

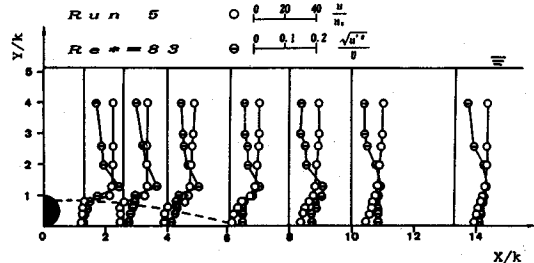


Fig. 5(d) Velocity and turbulent intensity distribution behind roughness element with $Re_* = 83$

附着点を判断し、それぞれの境界点とした。

3. 粗度後流の流れの構造

本報の対象は、粗度の大きさが水深より比較的に小さい床面上の流れとする。ここで、粗度は壁面の粗さとするので、流れの平均要素（水面勾配、水深、平均流速など）は粗度より下流方向で局所的な変化が無視できる。粗度後流の流れは Fig. 4 に示すように、粗度の上流側の流れの特性が保存されるいわゆる壁面乱流における流速対数分布則が成り立つ領域 I、粗度が流れの構造に影響を及ぼし、流速分布が対数則から偏離する領域 II、および粗度背後で流れが逆流になる剥離域の領域 III に区分さ

れる。

(1) 流速分布と乱れ強度分布

Fig. 5 は各レイノルズ数 Re_* ($Re_* = u_* k / \nu$, u_* は摩擦流速, $u_* = \sqrt{g R I_e}$, R は径深, ν は流体の動粘性係数) のもとで粗度の下流方向の流速分布と乱れ強度分布の変化を示したものである。粗度下流の剥離域の大きさはレイノルズ数の変化によって違い、 Re_* が 100 以上のとき一定になって、ほぼ $x/k = 7.5$ と認められる。流速は順流、逆流の交差のところで急激に変化するが、再附着点から離れると、流速分布は対数分布則に復元し、粗度要素の影響は小さくなり、壁面に支配される特性が強くなる。粗度要素の影響を受ける流速分布が対数則に復元さ

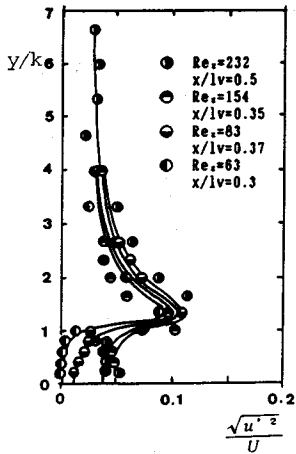


Fig. 6 Turbulence intensity distribution with various Reynolds number in reverse flow zone

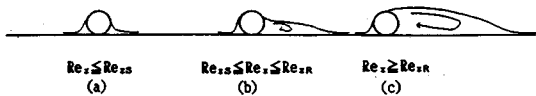


Fig. 7 Variation of separation flow with Reynolds number Re_*

れる範囲はほぼ $x/k=12.5$ 以内である。乱れ強度は水面近くで粗度を越えても変わらないが、剥離域で急激に減少し、再付着点から下流は壁面流の乱れ強度の分布に漸近していく傾向が認められる。これは流速分布が示した結果と同様に、乱れ強度に粗度要素の影響を受ける範囲が存在することが理解される。Fig. 6 は剥離域の乱れ強度分布のレイノルズ数による変化を示す。図は、レイノルズ数の増加に伴って剥離域の乱れ強度が大きくなることを示す。流れのエネルギー損失の大部分は壁面近くで生じるので、レイノルズ数の増加につれて粗度によるエネルギー損失が大きくなることを示す。

(2) 乱流の粗滑面と剥離域の変化

粗度後流の剥離域はレイノルズ数 Re_* の大きさによって生成、発達する。レイノルズ数 Re_* が滑面の臨界レイノルズ数 Re_{*s} を超えないとき、Fig. 7 (a) のように、粗度を越える流れは剥離流を生じない。レイノルズ数 Re_* が Re_{*s} を越えると、Fig. 7 (b) のように、粗度背後に剥離流を生じ、剥離域は Re_* の増加に伴って大きくなり、剥離点の位置は上昇する。しかし、レイノルズ数 Re_* が粗面の臨界レイノルズ数 Re_{*R} を越えると、Fig. 7 (c) のように剥離域は時間的に変化せず、安定になる。

(3) 剥離域規模の解析

Fig. 4 に示すように、粗滑遷移領域における粗度要素から再付着点までの剥離域の長さは幾何学的な関係から次式で表せる

$$\frac{lv}{k} = \frac{1}{2} \left[\sin\theta + \frac{1 - \cos\theta}{\tan\phi_1} \right] \dots\dots\dots (1)$$

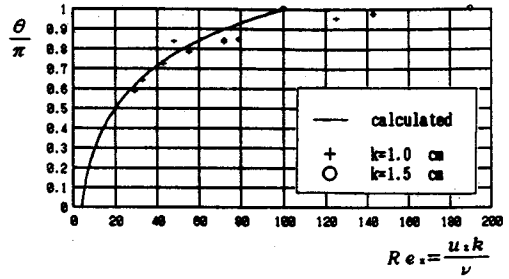


Fig. 8 Variation of separation angle with Reynolds number Re_*

ここに、 lv は剥離域の長さ、 θ は粗度を越える流れの剥離開始の位置を表す剥離角度、 ϕ_1 はパラメータである。

Fig. 8 はトレーサ法で求めた粗度後流の剥離開始の位置の剥離角度とレイノルズ数との関係を示す。実験データより、 Re_* が大きければ剥離角度が大きくなる。一方、 Re_* が Re_{*R} を越えると、剥離角度が安定し、その大きさが最大になる。そこで、 θ の変化率は次のように表せる。

$$\frac{d\theta}{dRe_*} = \frac{C}{Re_*} \dots\dots\dots (2)$$

$Re_* = Re_{*s}$ のとき、 $\theta=0$; $Re_* = Re_{*R}$ のとき、 $\theta=\pi$

ここに、 C は未定係数である。式 (2) を解くと、剥離角度とレイノルズ数の関係は次式で表される

$$\frac{\theta}{\pi} = \frac{\ln \frac{Re_*}{Re_{*s}}}{\ln \frac{Re_{*R}}{Re_{*s}}} \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) と実験データとの比較を Fig. 8 に示す。式 (1) のパラメータ ϕ_1 は剥離角 θ の増加に伴って小さくなる。そこで、次式のように表す

$$\phi_1 = \frac{A}{B + \theta} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 A と B は未定係数である。 ϕ_1 の境界条件は $\theta=0$ のとき、 $\phi_1 = \pi/2$; $\theta=\pi$ のとき、 $\phi_1 = \phi_{1min}$ にする。 ϕ_{1min} は実験係数である。すると

$$\phi_1 = \frac{\phi_{1min}}{2 \frac{\phi_{1min}}{\pi} \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right) + \frac{\theta}{\pi}} \dots\dots\dots (5)$$

となる。

粗度を越える剥離流の剥離点の高さ hv は

$$\frac{hv}{k} = \frac{1}{2} (1 - \cos\theta) \dots\dots\dots (6)$$

となる。

同様の手法で、Fig. 4 に示すように、流れの構造が粗度の影響を受ける範囲の長さは

$$\left. \begin{aligned} \frac{lu}{k} &= \frac{1}{2} \left[\sin\theta + \frac{1 - \cos\theta}{\tan\phi_2} \right] \\ \phi_2 &= \frac{\phi_{2min}}{2 \frac{\phi_{2min}}{\pi} \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right) + \frac{\theta}{\pi}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

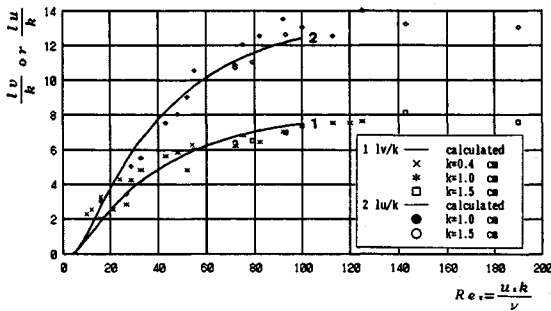


Fig.9 Comparison of calculated length of reverse flow zone by Eq.(1) and length of influence range of velocity by Eq.(7) with experimental data by Authors

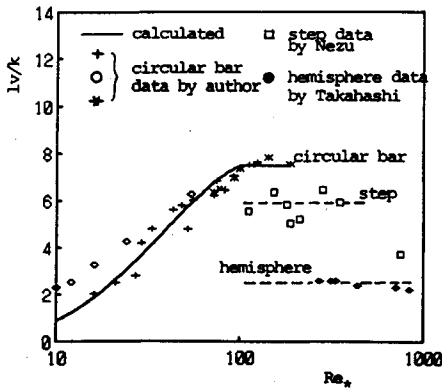


Fig.10 Comparison of length of reverse flow zone with experimental data of circular bar and step and hemisphere

となる。ここに、 lu は粗度より流速分布の影響範囲の長さ、 ϕ_{2min} は実験係数である。

実験データより、 $\phi_{1min}=7.6^\circ$ 、 $\phi_{2min}=4.6^\circ$ にする。臨界レイノルズ数についてはそれぞれ $Re_{*s}=3.55$ 、 $Re_{*R}=100$ が得られた。

Fig.9 は式 (1)、式 (7) と実験データとを比較したものである。 lu は流速分布の対数則よりはずれる点より求めたものであり、 lv は流速分布とトレーサ法で順流と逆流が生じる時間が相等しいところを判断して求めたものである。

Fig.10 は粗度後流の再付着点について円柱粗度のデータと段落ちおよび半球粗度のデータとを比較したものである。図は粗度の形状によって、剝離域の長さが違うことを示す。瀬津らは相対水深の小さいとき、段落ちの実験結果から、フルード数あるいはレイノルズ数の増加と共に、剝離域の長さが若干小さくなることも指摘している¹⁹⁾。これより、相対粗度が大きい場合、剝離域の長さはフルード数の関数だと考えられる。

Fig.11 は流速分布によって求められた流速がゼロになる剝離域の逆流の境界線である。図より、レイノルズ

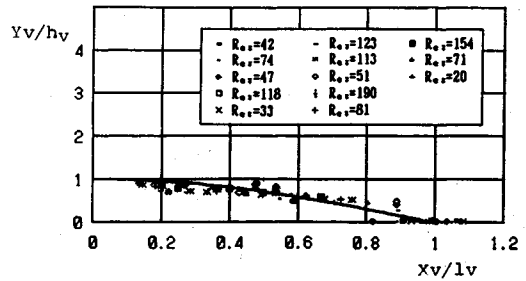


Fig.11 Comparison of calculated zero velocity line by Eq.(8) in reverse flow zone with experimental data by Authors

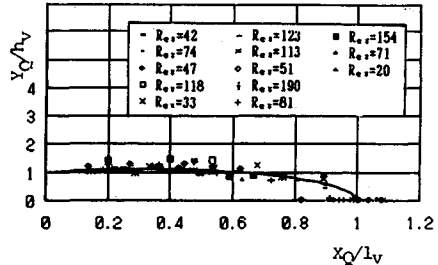


Fig.12 Comparison of calculated boundary line of reverse flow zone by Eq.(9) with experimental data by Authors

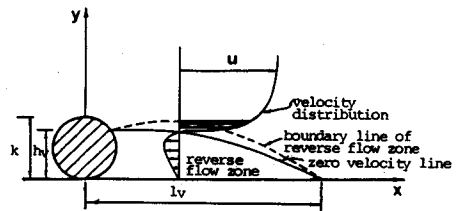


Fig.13 Schematic figure

数 Re_* の変化を伴うゼロ流速線は相似性を持つ。その実験式は

$$\frac{Yv}{hv} = \cos\left(\frac{\pi Xv}{2 lv}\right) \dots \dots \dots (8)$$

となる。ここに、 (Xv, Yv) はゼロ流速境界線の座標である。

Fig.12 は順流が剝離域の逆流の流量と等しくなる線 (Fig.13 に示す)、いわゆる剝離域の境界線である。

Fig.13 に示すように、逆流域の外には逆流の流量と相等流量の順流の境界領域が存在するはずである。図より、レイノルズ数 Re_* の変化を伴う剝離域の境界線は相似性を持つ。その実験式は

$$\frac{Yq}{hv} = 1.133 \sqrt{1 - \left[\frac{Xq/lv - 0.32}{0.6}\right]^2} \dots \dots \dots (9)$$

となる。ここに、 (Xq, Yq) は剝離域の境界線の座標である。

4. 粗滑遷移領域の抵抗特性

上記の結果から、乱流の滑面から粗面への遷移過程は粗度後流剥離の発達過程で決定されることが分かる。レイノルズ数が小さいとき、粗度を越える流れは剥離を生じず、乱流構造は粗度の存在に無関係になり、流水抵抗は摩擦抵抗のみで、レイノルズ数の関数として表される滑面になる。レイノルズ数が増加すると粗度後流は剥離を生じ、粗度の形状抵抗が生じる。このとき、流水抵抗は摩擦抵抗と形状抵抗で、レイノルズ数と相対粗度の関数として表される遷移領域になる。レイノルズ数がさらに大きくなると、粗度後流の剥離域の規模は安定し、粗度後流の形状抵抗は摩擦抵抗より大きく、主に相対粗度の関数の粗面になる。そこで、粗度後流の剥離の発達過程は乱流の三つの領域を分けて、各抵抗特性を表すことにする。

(1) 棧粗度の抵抗式の誘導

一般的に、乱流の滑面の平均流速は次式によって表される

$$\frac{V}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\beta_s \frac{u_* R}{\nu} \right) \dots\dots\dots (10)$$

同様に、粗面の平均流速は

$$\frac{V}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\beta_R \frac{R}{k} \right) \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここに、 V は断面平均流速、 κ はKarman定数、 β_s と β_R は実験係数である。

棧粗度の粗面の粗さは棧の相対間隔によって違うことが明らかである^{4),20)}。棧粗度の粗面の平均流速は相当粗度で表すべきであるので、次式のように書ける

$$\frac{V}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\beta_R \frac{R}{k_s} \right) \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 k_s は相当粗度の高さである。

一般的に、粗滑遷移領域の平均流速は次式で与える

$$\frac{V}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\beta_T \frac{u_* k R}{\nu m k} \right) \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 β_T は全抵抗に対する粗度後流の形状抵抗の割合を表し、剥離流の規模の関数である。Fig.6に示すように、 Re_* が小さいとき、剥離域の乱れ強度が小さいので、その形状抵抗も小さく、 Re_* の増加に伴って剥離域の乱れ強度が増すので、その形状抵抗は大きくなると考えられる。

式(1)、式(3)、式(5)より粗度後流の相対剥離域の長さは

$$l_v^+ = \frac{lv}{lv_{max}} = \frac{1}{15} \left\{ \sin [0.3 \ln Re_* - 0.38] \pi + \frac{1 - \cos [0.3 \ln Re_* - 0.38] \pi}{\tan \left[\frac{0.042 \pi}{0.275 \ln Re_* - 0.264} \right]} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

となる。ここに、 lv_{max} はレイノルズ数が Re_{*R} を超えた剥離域の長さで、 $lv_{max} = lv(Re_* \geq Re_{*R})$ である。式(14)は相対剥離域の長さがレイノルズ数の関数なので、粗度後流の形状抵抗の変化は相対剥離域の長さで表されると考えられる。そこで、 Re_* の関数 β_T は次のように書けると考えられる。

$$\beta_T = f \left(\frac{lv}{lv_{max}} \right) = f(l_v^+) \dots\dots\dots (15)$$

式(15)は以上の考察より次式のように表せる。

$$\beta_T = C_1 \exp(C_2 l_v^+) \dots\dots\dots (16)$$

ただし、 C_1 と C_2 は未定係数である。

式(13)の m は粗滑遷移領域における Re_* 数による棧粗度の相当粗度の変化を表し、次のように表せると考えられる。

$$m = \left(\frac{k_s}{k} \right)^{i_0} \dots\dots\dots (17)$$

レイノルズ数 $Re_* \leq Re_{*s}$ のとき、粗度後流の剥離を生じず、 $l_v^+ = 0$ で、式(13)は滑面の式(10)になり、 $\beta_T = \beta_s$ である。一方、 $Re_* \geq Re_{*R}$ のとき、 $l_v^+ = 1$ で、式(13)は粗面の式(12)になり、 $\beta_T = \beta_R / 100$ となるので、

$$\beta_T = \beta_s \exp(\beta_* l_v^+) \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 $\beta_* = \ln(\beta_R / 100 \beta_s)$ である。

開水路における流水抵抗係数は次式で定義される。

$$f = 2 \left(\frac{u_*}{V} \right)^2 \dots\dots\dots (19)$$

ゆえに、式(13)、(19)より、粗滑遷移領域における棧粗度の抵抗係数は

$$f = \frac{2}{\left\{ \frac{1}{\kappa} \ln \left(\beta_s \exp(\beta_* l_v^+) \frac{u_* k R}{\nu m k} \right) \right\}^2} \dots\dots\dots (20)$$

となる。

(2) 実験結果及び式(20)の検証

実験はTable 1に示す各種配置の粗度間隔で行う。この実験結果では各相対粗度 b/k は一定に保たれているので、抵抗係数とレイノルズ数のみの関数である。

Fig.14 (a)は円柱粗度、Fig.14 (b)は角形粗度の抵抗係数の実験結果である。ここに、レイノルズ数は $Re = VR/\nu$ を用いた。図中のパラメータ R/k_s は各caseの棧の粗面領域の相対粗度を表す。この k_s は $Re_* \geq 100$ の実験データの平均値を用いた。

Fig.14の中の実線は式(20)によって計算されたものである。角形粗度の抵抗係数の計算で用いたパラメータの数値は円柱粗度のもと同じである。二つのレイノルズ数の関係は

$$Re = Re_* \sqrt{\frac{2}{f}} \frac{R}{k} \dots\dots\dots (21)$$

となる。本実験のデータから、式(20)の未定係数は

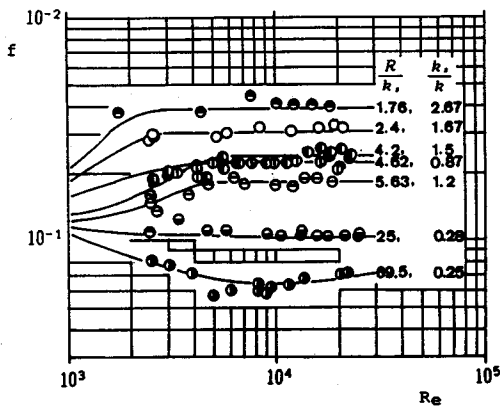


Fig.14(a) Comparison of calculated resistance coefficient by Eq.(20) with experimental data of circular bar by Authors

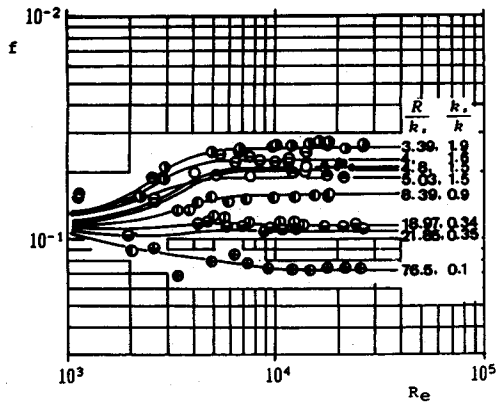


Fig.14(b) Comparison of calculated resistance coefficient by Eq.(20) with experimental data of rectangular bar by Authors

$$\left. \begin{aligned} \beta_s &= 4.05 \\ \beta_R &= 11.0 \\ \beta_* &= -3.6 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

となる。

粗面領域における流水抵抗は相対粗度のみの関数で、レイノルズ数と無関係であるので、式(20)の中で $Re_* = 100$ とすると、式(20)は粗面の抵抗係数式になる。従って、式(20)は乱流の三つの領域に適合する普遍式といえる。

5. 考 察

(1) Nikuradse の管流の実験データへの適用

Nikuradse は管路における一様砂粒粗度の抵抗実験を行い、層流から乱流まで抵抗係数の変化図を得た。しかしながら、粗滑遷移領域の抵抗計算についてはまだ完成していない¹⁴⁾。乱流が滑面から粗面へ遷移するとき、一様砂粒を越える剝離流は後の砂粒が剝離域に埋められるほかは、積粗度と同様と思われる。前述で導いた剝離域の

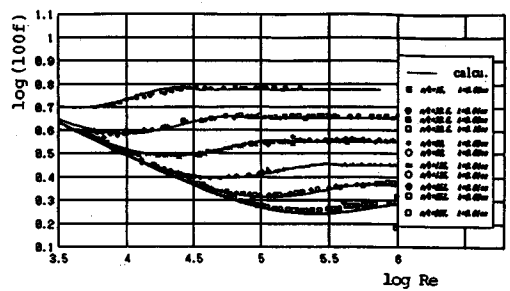


Fig.15 Comparison of calculated resistance coefficient by Eq.(24) with experimental data by Nikuradse

長さで表す粗滑遷移領域の抵抗係数式はその抵抗とレイノルズ数および相対粗度との関係を表現したので、一様砂粒粗度の場合にも適用可能である。

粗度を密着付けた場合には、粗面の相当粗度の大きさは砂の幾何的高さ、すなわち $k_s = k$ となる。一般に、管流の抵抗係数は次のように定義される。

$$f = 8 \left(\frac{u_*}{V} \right)^2 \dots\dots\dots (23)$$

式(23)に式(13)の平均流速を与えると、管流の粗滑遷移領域における一様砂粒粗度の抵抗係数は

$$f = \frac{8}{\left[\frac{1}{k} \ln \left(\beta_s \exp(\beta_* l_v^+) \frac{u_* k_s R}{\nu k_s} \right) \right]^2} \dots\dots\dots (24)$$

となる。

Fig.15 は式(24)と Nikuradse の管路における実験データとの比較したものである。式(24)のパラメータに積粗度と同じ値を用いた結果、計算値と実験値はよく一致した。これは、本研究で得た粗滑遷移領域における粗度後流の剝離モデルが一様砂粒粗度の場合にも適用可能であることを示している。

(2) 積粗度と一様砂粒粗度との抵抗特性の相違点

Fig.16 (a) は $k_s/k = 1.5$ の場合、式(20)によって積粗度の抵抗係数と一様砂粒粗度の抵抗係数 ($k_s/k = 1$) とを比較したものであり、Fig.16 (b) は $k_s/k = 0.75$ の積粗度と一様砂粒粗度とを比較したものである。図より、滑面と粗面において積粗度と一様砂粒粗度との抵抗則はまったく同等であるが、粗滑遷移領域において積粗度ではパラメータ k_s/k が増え、図中の斜線線が両者の差を示していることが分かる。これが積粗度の重要な特性の一つである。

Fig.17 は従来よく用いられている粗滑遷移領域での抵抗係数と Re_* との関係において積粗度の抵抗係数が k_s/k による変化を示したものである。縦軸は相対粗度 (R/k_s) を含む抵抗係数である。図中の $k_s/k = 1$ の線は一様砂粒粗度のものである。

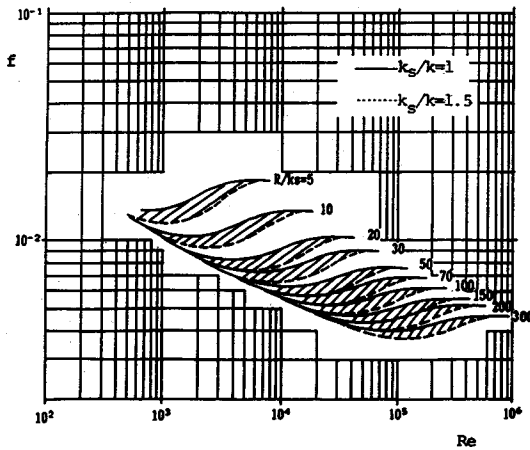


Fig.16(a) Comparison between the predicted resistance coefficient with $k_s/k=1.5$ and Nikuradse's roughness ($k_s/k=1$) by Eq.(20)

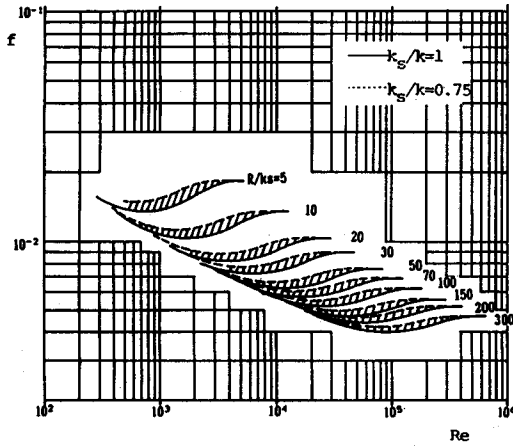


Fig.16(b) Comparison between the predicted resistance coefficient with $k_s/k=0.75$ and Nikuradse's roughness ($k_s/k=1$) by Eq.(20)

6. 結 論

本論文では、粗度後流の流れの構造及び流水抵抗の実験結果に基づいて、粗滑遷移領域における剝離構造と抵抗との関係を検討した。その結果を要約すれば、以下の通りである。

(1) 乱流の各領域の抵抗特性は粗度後流の剝離を生じるかどうかによって決定される。滑面では、粗度後流の剝離が生じず、粗面では剝離域が安定な区域になり、この間の遷移領域では剝離域はレイノルズ数 Re_* の関数になる。

(2) 粗度まわりの乱流構造が粗度から受ける影響範囲はレイノルズ数によって変化し、最大影響範囲は粗度下流はば $x/k=12.5$ であり、粗度後流の剝離域の大きさは $x/k=7.5$ 以内である。

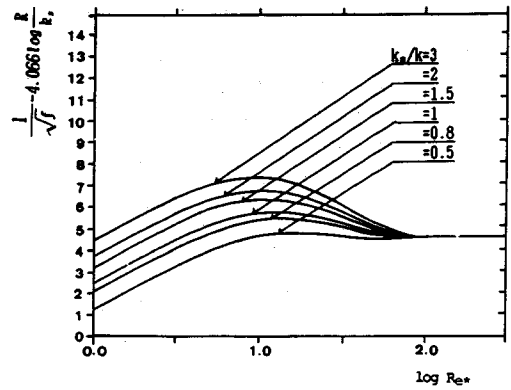


Fig.17 Predicted resistance coefficient with k_s/k by Eq.(20)

(3) 粗滑遷移領域における粗度後流の剝離域の境界線と剝離域内のゼロ流速線はレイノルズ数のもとで相似性を持つ。

(4) 粗度後流の剝離域の長さに基づいた棧粗度の抵抗式 (20) を提案し、実験データによって検証した。提案式は滑面においてはレイノルズ数の関数になり、粗面においては相対粗度の関数になり、粗滑遷移領域においては Re と R/k_s と k_s/k の三つの関数になる。

(5) 提案された抵抗則式によって Nikuradse の管流の一樣砂粒粗度の抵抗データを考察し、粗滑遷移領域における棧粗度の抵抗特性は砂粒粗度の場合と異なり、 k_s/k の影響が無視できないことを示した。

謝辞：本研究は平成4年度（財）日本科学協会笹川科学研究助成『粗滑遷移域における乱流構造に関する研究』の一部である。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Johnson, J.W. : Rectangular artificial roughness in open channel, Trans. A.G.U., Hydrology section Vol.25, pp.906-914, 1944.
- 2) Powell, R.W. : Flow in a channel of definite roughness, Trans. ASCE, pp.531-566, 1944.12.
- 3) Morris, H.M. Jr. : Flow in rough conduits, Trans. ASCE, Vol.120, pp.373-398, 1955.
- 4) 足立昭平：人工粗度の実験的研究，土木学会論文報告集，No.104, pp.33-44, 1964.
- 5) 山岡 勲：河床上の矩形粗度が水路の抵抗に及ぼす効果の研究，北海道開発局土木試験所報告，No.27, pp.1-55, 1963.
- 6) Nikuradse, J. : Stromungesetze in rauhen röhren, Forschg. Arb. Ing.-Wes., No.361, 1933.
- 7) Colebrook, C.F. : Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between the smooth and rough laws, Jour. of Inst. Civil Eng., No.11, 1938.
- 8) 高橋迪夫：水路床に存在する半球下流部の流れの構造に関する実験的研究，土木学会論文集，No.417/II-13,

- pp. 73~82, 1990.
- 9) Chen, C.K. and Roberson, J.A. : Turbulence in wakes of roughness elements, Proc. ASCE, Vol.100, No.HY 1, pp.53~67.
 - 10) Okamoto, S. : Turbulent shear flow behind a sphere placed on a plane boundary, Turbulent shear flows 2, Springer-Verlag, New York, pp.246~256, 1980.
 - 11) Okamoto, S. : Turbulent shear flow behind hemisphere-cylinder placed on a ground place, Turbulent shear flows 3, Springer-Verlag, New York, pp.171~185, 1982.
 - 12) 玉井信行・浅枝 隆・田中規夫 : 平板上の半球周りの流れの構造について, 第 31 回水理講演会論文集, pp. 371~376, 1987.
 - 13) 田中規夫 : 底面上の3次元並びに2次元物体後方の組織的渦構造の変動特性, ながれ, 10 (1991), pp. 93~105.
 - 14) Brownlie, W.R. : Re-Examination of Nikuradse roughness data, Jour. of Hyd. Divi. Proc.of ASCE, Vol.107, HY 1, pp.115~119, 1981.
 - 15) Morris, H.M. Jr. : Design methods for flow in rough conduits, Jour. of Hyd. Divi., Proc. of ASCE, Vol.85, No.HY 7, pp.43~62, 1959.
 - 16) Furuya, Y., Miyata, M. and Fujita, H. : Turbulent boundary layer and flow resistance on plates roughness by wires, Jour. of Fluids Eng., ASME, 1976.
 - 17) 古屋善正・藤田秀臣・中島洋 : 2次元針金粗面上の乱流境界層, 日本機械学会論文集 (II), Vol. 33, No. 250, pp. 939~946, 1967.
 - 18) Yang, Y. and Daido, A. : Evaluation of open channel flow with varying aspect ratio and roughness ratio, Proc. of JSCE, No.457/II-23, pp.103~113, 1993.
 - 19) 瀬津家久・中川博次ら : 開水路断落ち流れの流速回復過程と再付着点からの組織渦の放出特性, 第 31 回水理講演会論文集, pp. 413~418, 1987.
 - 20) Knight, D.W. and Macdonald, J.A. : Hydraulic Resistance of Artificial Strip Roughness, Jour. Hyd. Divi., ASCE, Vol.105, No.HY 6, pp.675~690, 1978.

(1992. 7. 27 受付)

FLOW RESISTANCE OF STRIP ROUGHNESS IN SMOOTH-ROUGH TRANSITION REGION

Yongdi YANG and Atsuyuki DAIDO

The flow structure near strip roughness and flow resistance have been studied by experiments. It is shown that the flow resistance over strip roughness is depended on the separating process of roughness wake in smooth-rough transition region. On the basis of it, the characteristics of separation flow have been analyzed, and the formula of friction factor in smooth-rough transition region has been deduced by using the length of reverse flow zone as reference variable. Furthermore the difference of resistance between dense arrangement sand roughness and strip roughness has been discussed.