

粗面上の開水路流に関する一考察

九州工業大学工学部 ○ 学生員 川村 清一
学生員 三奈木 孝学生員 藤原 康史
正 員 秋山 壽一郎

1. 緒言

山地河川に代表されるような礫床河川は、粗度要素と水深とのスケール比が極めて小さい流れであるが、河床近傍における水理特性が相対水深の大きな場合と著しく異なるため、平均流速分布ですら定量的に把握されていないのが現状である。そのため、抵抗則、流砂量、水質交換などの様々な水理学的な諸問題に対してなお多くの不明な点が残っている。本研究は水路実験における乱れ計測を行い、平均流速特性並びに乱れ特性などの分布を求め、水理特性量と相対水深、相対河床層厚、粒子Reynolds数などとの関係について若干の考察を加えたものである。

2. 実験

実験は、全長20mの可変勾配水路に平均粒径 $d=1.94\text{cm}$ のガラスビーズを9m(1層)、4m(2層)程度最密充填で敷き詰め、等流状態でX-型熱線流速計(Kanomax社製)を用いて計測した。サンプリング間隔1/200秒で8192個をAD変換し収録した。計測時間は41秒である。実験条件を表-1に示す。

3. 粗度上の開水路乱流の流況について

一般に開水路乱流の流れの場は、内層と外層とに分けられるが、粗度要素近傍の内層では、粗度要素から放出される剥離渦の存在が支配的な領域が発生し(図-1)、通常の対数則からのずれを生じる。つまり、粗度上の開水路乱流では、内層は対数則が成立する“対数則域”と対数則からの偏差が生じる“粗度域”より構成される。このような流れの場に対して、平均流速分布型を決定する方法は次の2つの立場に大別される。“立場I”は仮想原点を考え、原点補正量を導入することによって“粗度域”を含む内層を対数則で表現しようとするものであるが、本立場では、(1)どのように仮想原点を定義すべきかという問題、(2)カルマン定数 k は普遍定数かという問題が発生する[1]。

一方、“立場II”は、粗度近傍の流れの場においては対数則は成立しないものとして、これに代わる流速分布を導入しようとするものであるが、本立場では、(1)粗度域の厚さはどの程度かという問題、(2)粗度域における流速分布はどのような型かという問題が発生する[2]。

本研究では、“立場I”に立脚し、粗度頂点より Δy (=粗度頂点を y の原点としたときの原点補正量)下方で仮想原点を考え、“内層”に対してはカルマン定数は一定($k=0.41$)とし、式(1)の型の対数則を適用する。また、式(1)において Δy と A_s は次元解析により、式(2)のような関数関係があることが予測されるが、本研究では、粒子形状は一樣粒径、形状は球形、配列は最密充填を考えているので、式(3)の関係があると期待される。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{K} \ln \frac{y + \Delta y}{d} + A_s \quad (1)$$

$$\Delta y/d, A_s = f(\text{粗度の配列, 形状, 粒径分布, } Red, H^*, h^*, \lambda) \quad (2)$$

ここに、 Red =粒子Reynolds数($=u_* d/\nu$)； λ =空隙率； H^* =主流の相対水深($=H/d$)； h^* =河床の相対層厚($=h/d$)； A_s =粗面对数則に対する係数。

$$\Delta y/d, A_s = f(Red, H^*, h^*) \quad (3)$$

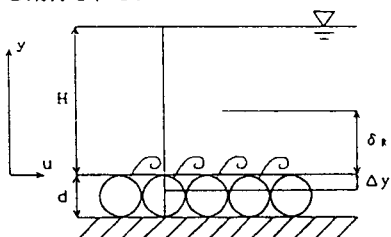


図-1 定義図

本論文では、主に H^* 及び h^* の流れに対する影響を調べる目的で、 Red をほぼ $Red=500\sim 600$ の範囲に限定して実験を行なった結果について報告する。ところで、壁面が粗か滑かは壁面近傍の流れの場である“内層”に対して影響を与えるが、壁面から離れた“外層”は壁面の状態とは無関係な流れの場であると考えられる。従って、外層での対数則からのずれは壁面の状態にかかわらず、Cole'sのwake functionで表示できると思われる。つまり、主流全体に対する平均流速分布は式(4)で与えられる。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{K} \ln \frac{y + \Delta y}{d} + A_s + \frac{\Pi}{K} \frac{W(\frac{y}{H})}{H} \quad (4) \quad \text{ここに、} \Pi = \text{Cole'sのwake strengthパラメータ；} K=0.41；W = \text{Cole'sのwake function} (=2\sin^2(\pi y/2H))$$

4. 実験結果

(1) 粗度域の高さ(δ_s): 図-2と3に無次元粗度域の高さ δ_s/d と Red 並びに H^* の関係をそれぞれ示す。 δ_s/d はいずれのパラメータにも依存せず、 $\delta_s/d=0.21\sim 0.26$ の範囲にあることが判る。また、 h^* については $h^*=2$ の場合の方が $h^*=1$ 場合よりも全体的に若干大きく、浸透層厚 h^* に対する影響を示唆しているようである。

(2) 原点補正量(Δy)及び係数(A_s): 図-4と5に無次元原点補正量 $\Delta y/d$ と Red 並びに H^* との関係、図-6と7に A_s と Red 並びに H^* との関係をそれぞれ示す。これによると、 $\Delta y/d$ は H^* に対して強い傾向性を持たないようである。一方、 A_s は H^* に対してわずかに減少するものの傾向的な依存性を持たず、 A_s は Red の増加とともに減少する傾向が認められる。 $Red \rightarrow$ 大で $A_s \rightarrow 8.5$ に漸近するものと予測される。

(3) Cole'sのWake Strength Parameter(Π): 図-8に Π -Parameterと主流のReynolds数との関係を示す。 Π は滑面上の場合[3]と同様な傾向を示し、外層は壁面の状態とは無関係であることがうかがえる。

(4) 平均流速分布(u): 式(4)に基づく計算結果と実験結果を比較した一例が図-9である。両者の一致は極めて良好であり、式(4)によって粗面上の平均流速分布が高い精度で表現可能であると考えられる。

(5). 抵抗係数(f): 図-10に滑面の場合と1層及び2層の場合の抵抗係数を示す。1層と2層の場合の間には、傾向的な差異は認められず、粗面の場合の抵抗係数は滑面の場合の約2.5倍程度大きくになっていることが認められる。

(6). 積分スケール(L)と混合距離(l): 図-11に式(5)と(6)より計算された積分スケールの鉛直分布と式(7)による混合距離分布との比較の一例を示す。分布形はほぼ対応しているが、 $y/H=0$ では“粗度域”の存在のため、ある有限の値を持つ。このため、壁面近くでの積分スケールは式(7)に基づく混合距離よりも若干大きめの値を示すようである。

$$F(k) = 0.48 \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (5), \quad L = 0.1 (q^2/2)^{3/2} / \varepsilon \quad (6), \quad l = xy \sqrt{1 - y/H} \quad (7)$$

ここに、 $F(k)$: 波数スペクトル; ε : 逸散率; k : 波数; $q = (u'^2 + v'^2)^{1/2}$; u', v' : 縦断、鉛直方向の変動速度成分

5.参考文献

[1] 山田・川端(1982) 土論 325号、[2] 中川ら(1990) 土論 423号II-14、[3] Nez u・Rodi;(1986), ASCE, HY5

表-1 実験条件

Run #	Layer	l	100ν	H	H^*	Re	Fr	U_m	U_1	U_2	U_3	Red
Exp 1-1	1	0.0014	1.1084	4.04	2.08	12200	0.532	33.5	2.35	2.57	2.99	523
Exp 1-2	1	0.0009	1.1141	6.06	3.12	22000	0.526	40.5	2.31	2.76	3.41	593
Exp 1-3	1	0.0005	1.0942	10.10	5.21	38500	0.386	41.7	2.22	2.73	2.97	527
Exp 2-1	2	0.0010	1.2448	5.95	3.07	21600	0.529	40.4	2.41	2.83	3.35	583
Exp 2-2	2	0.0007	1.1141	8.05	4.15	32500	0.507	45.0	2.35	2.81	3.53	615
Exp 2-3	2	0.0005	1.1347	10.04	5.18	37200	0.423	42.0	2.22	2.59	3.00	513

但し $d=1.94(\text{cm})$ U_m 平均流速 $U_1=(gH)^{1/2}$ U_2 Reynolds Stress U_3 対数則 $Red=U_3 d \nu$

