

槽粗度後流の乱流構造について

九州大学工学部 学生員 ○火箱貴文
九州大学工学部 フェロー 平野宗夫

九州大学工学部 上原真之
九州大学工学部 正会員 楊 永荻

1. はじめに

本研究は水路床上に単独あるいは複数の粗度を設置し、粗度の形状および大きさを変化させ、粗度周辺の流況、剥離の特性、流速分布および乱流強度分布に関して実験を行い、その結果を考察するものである。

2. 実験概要

実験は図1に示すような長さ550cm、幅25.0cm、高さ20cmの亚克力・鋼製の河床勾配可変型の直線水路で行われた。流れは主流方向にx軸、河床に垂直な上向きにy軸をとり、それぞれの流速は u, v と定義する。流速の計測はSONTEC製の超音波ドップラー3D高精度流速計(ADV)¹⁾を用いて行う。

槽粗度には図2に示すような正方形柱状の亚克力棒と、半円柱状の木製棒を用いた。実験では1.5cmの正方形粗度を水路上流端より約3.5mの水路底面に単独に設置したものをSeries1とし、同様に2.0cmの正方形粗度及び1.5cmの半円柱粗度をそれぞれ設置したものをSeries2, Series3とした。また、複数の1.5cmの正方形粗度を等間隔に水路上流端より約2.0～4.5mの範囲に設置したSeries4を実施した。

実験は水深を各Series共に約10.0cmに設定し、粗度の後方Xcmの地点5ヶ所の沿直方向の流速分布を測定した。表1に実験条件を示す。kは粗度高、 λ は粗度間隔、hは水深、qは単位幅流量、Uは平均流速、Rbは側壁の効果を除去した径深、 U^* は摩擦速度、Reはレイノルズ数、Frはフルード数である。なお、摩擦速度 U^* は、Series1～3では粗度前方30cmで計測した流速分布及びレイノルズ応力分布から求め、Series4ではPowell&Jonassen²⁾の実験結果を利用し算出した。また、剥離長さはトレーサーとしてインクを用いて目視観測した。

3 実験結果および考察

3.1 粗度後流の流況

図3は単一粗度Series1における $Fr=0.258$ の場合の粗度後流の計測断面位置およびその平均流速分布と乱流強度分布を示したものである。図より流れは粗度後方に剥離流が発生し、粗度近くの水路床付近に逆流域が形成されることを示している。平均流速分布は粗度近くでは速度勾配が大きく、再付着点以降には徐々に対数則分布に回復していく。乱流強度は、剥離域との境界付近でピークとなり粗度に近いほどピークは顕著に現れる。これより du/dy の大きいところほど乱流強度が大きくなるといえる。

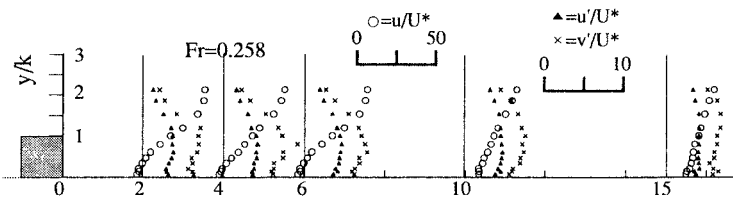


図3 平均流速および乱流強度の分布

3.2 Fr数による影響

図4はトレーサーで計測した再付着点あるいは剥離長さ x/k とFr数の関係である。図よりFrが0.2～0.4程度の間では剥離長さは約 $x/k=9.0$ の所ではほぼ一定値を示しており、Fr数による変化が小さいことが分かる。図5は単一粗度 $Fr=0.175$ と $Fr=0.370$ での粗度後流における平均流速分布の変化である。図中の直線は粗度前方30cmでの流速分布である。図より流速は粗度を越えて流れると粗度の影響を大きく受け逆流を生じ、粗度を離れるほど粗度前方の流速分布に回復していく。異なるFr数でもともに同じ傾向であるが、Fr数が大きいほど回復しにくいことが示されている。図6は粗度後流の同一位置($x/k=6.0$)においてFr数による乱流強度分布の変化を示したものである。図中の直線

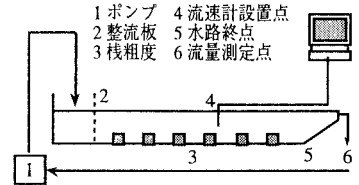


図1 水路図



図2 粗度の要素

表1 実験条件

No.	k (cm)	λ/k	h (cm)	q (cm ² /s)	U (cm/s)	R _b (cm)	U* (cm/s)	Re (×10 ³)	Fr
c	1.5	∞	9.97	172.4	17.3	-	0.77	3.83	0.175
d	1.5	∞	10.72	334.8	31.2	-	1.10	7.21	0.305
e	1.5	∞	10.71	282.7	26.4	-	0.99	6.09	0.258
f	1.5	∞	10.11	219.6	21.7	-	0.65	4.85	0.218
g	1.5	∞	10.53	395.8	37.6	-	1.21	8.59	0.370
xc	2.0	∞	9.90	181.4	18.3	-	0.91	4.05	0.186
xe	2.0	∞	10.60	283.0	26.7	-	0.89	6.13	0.262
xg	2.0	∞	10.61	391.4	36.9	-	1.23	8.47	0.362
yc	1.5	∞	10.44	176.0	16.9	-	0.60	3.84	0.167
ye	1.5	∞	10.30	281.0	27.3	-	1.05	6.16	0.272
yg	1.5	∞	9.97	390.9	39.2	-	1.25	8.70	0.397
ja	1.5	3.0	10.29	180.2	17.5	8.19	1.52	3.00	0.174
jb	1.5	3.0	9.93	356.8	35.9	8.20	3.13	7.95	0.364
ma	1.5	4.0	9.98	181.0	18.1	8.52	1.92	4.03	0.183
mb	1.5	4.0	10.35	362.4	35.0	8.98	3.66	7.93	0.348
ka	1.5	6.0	10.29	180.2	17.5	9.11	2.18	3.95	0.174
kb	1.5	6.0	10.27	361.3	35.2	9.24	4.36	7.93	0.351
na	1.5	8.0	10.12	180.6	17.9	9.13	2.45	3.99	0.179
nb	1.5	8.0	10.53	360.4	34.2	9.59	4.62	7.82	0.337
pa	1.5	11.0	9.99	181.1	18.1	9.10	2.60	4.03	0.183
pb	1.5	11.0	10.44	362.4	34.7	9.58	4.90	7.90	0.343

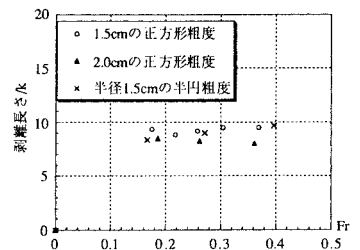


図4 剥離長さ x/k とFr数の関係

は牀津式³⁾により求められたものである。乱れ強度は粗度の影響を受け剥離域において大きくなり、またFr数が大きいほど大きくなることが示されている。これは流速勾配が急激に変化することと対応していると考えられる。

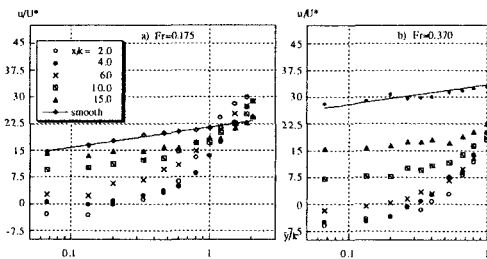


図5 異なるFr数の流速分布

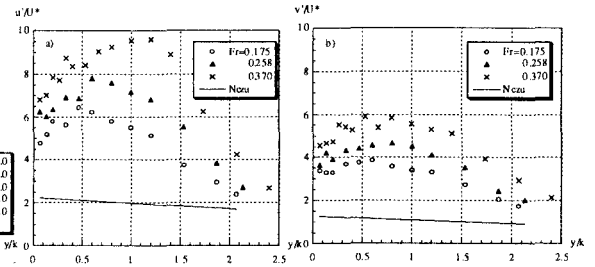


図6 Fr数による乱流強度の変化

3.3 形状による影響

図7は粗度後流の同一位置($x/k=4.0$),同程度のFr数における正方形粗度($k=1.5, 2.0$)と半円粗度($k=1.5$)による平均流速分布と乱流強度分布の変化を示したものである。平均流速は正方形粗度の場合 $k=1.5$ と $k=2.0$ で同様の分布であり、粗度高による影響がないが、半円粗度($k=1.5$)の場合には平均流速分布は水路床より粗度高の1/2倍程度の区域で正方形粗度の場合より逆流が小さいことを示している。乱流強度は粗度高が大きい方が大きくなり、半円粗度($k=1.5$)の場合には正方形粗度の場合より若干小さくなる。

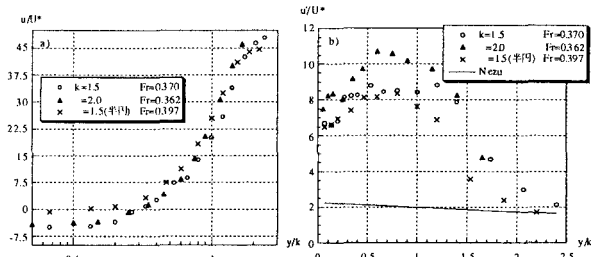


図7 形状による平均流速分布・乱流強度分布の変化

3.4 粗度間隔の変化による影響

図8は複数の粗度を設置したSeries4において粗度間隔 $\lambda/k=11.0$, $Fr=0.343$ での粗度間の平均流速分布および乱流強度分布の変化である。図より粗度間の平均流速分布は3.2で述べた単一粗度と同様な回復傾向を示す。粗度間の乱流強度分布は流れ方向に変化がなく、粗度高より上の区域では牀津式と一致し、粗度の影響が小さいことを示す。図9は複数粗度Series4の同一位置($x/k=1.0$)において粗度間隔の変化による平均流速分布と乱流強度分布の変化を示している。間隔 $\lambda/k=3.0\sim 6.0$ の範囲では平均流速は間隔が大きいほど小さくなる。また間隔 $\lambda/k=6.0\sim 11.0$ 程度では平均流速分布はほぼ一定で後方粗度の影響を受けないことを示す。粗度高より下の区域の乱流強度分布は間隔 $\lambda/k=3.0\sim 6.0$ の範囲では間隔が大きいほど小さく、間隔 $\lambda/k=6.0\sim 11.0$ 程度の範囲ではほぼ一定で後方粗度の影響を受けないことを示す。粗度高より上の区域ではどの間隔においても牀津式とほぼ一致し粗度の影響が小さいことを示す。

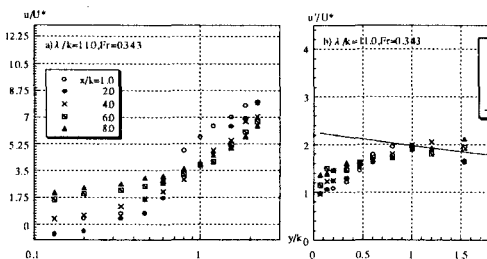


図8 粗度間の平均流速・乱流強度の変化

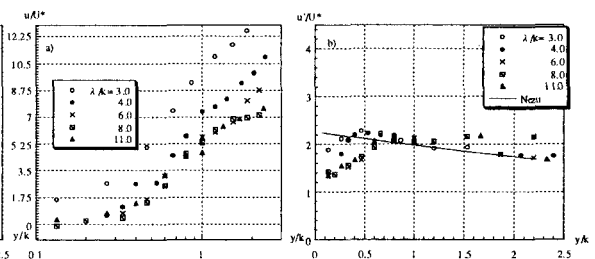


図9 粗度間隔による平均流速分布・乱流強度分布の変化

4. むすび

以上、Fr数・形状・粗度間隔の変化が粗度後流の乱流構造に与える影響について調べた。今後はより幅広い条件下で粗度後流の流況について検討する予定である。

5. 参考文献

- 1) 楊永荻・平野宗夫・木本大介: ADVを用いた固液二相管流の乱流構造に関する実験的考察, 土木学会論文集第40巻, 1996
- 2) Ralph W. Powell: FLOW IN A CHANNEL OF DEFINITE ROUGHNESS, ASCE, Paper No. 2276, 1944
- 3) 牀津家久: 開水路乱流の乱れ強度に関する研究, 土木学会論文報告集第261号, 1977