

早稲田大学 大学院
建設省
大成建設（株）
早稲田大学 理工学部

学生員 岡本 俊彦
正 員 植松 龍二
正 員 斎藤 陽一
正 員 吉川 秀夫

1. はじめに

河川に護岸を施すとき、粗度要素の効率的な形状、配置を決定するために、それらに働く流体の特性を知ることが重要である。しかし、境界層内、底面近傍の水理現象は複雑で、従来の研究では十分ではない。そこで本研究は、流れを三次元的に考え、横断方向の粗度近傍の流れ二次流、レイノルズ応力、また粗度要素の抗力、揚力などに注目し、これらの特性について考察した。

2. 実験装置、方法

図1に水路概形、座標系、(A-A')断面のN.O.を示す。水路の大きさは、幅×高さ×長さ(82×42×900cm)底面に径3.8cmの球を疎に配置した。流速の測定位置は上流から700cmの(A-A')断面(N.O. 1~7)について行った。測定にはX型HOT-FILMを用い、0.5cm間隔でX, Y, Z方向各点41秒間4086個のDATAをAD変換して求めた。流体力の測定には、マノメーターを用いた。底面粗度の半球に0.2mmの孔を付け、この圧力と境界層外の圧力との差圧(ΔP : 過剰圧力)を測定した。圧力の総和のX成分を抗力、Z成分を揚力とした。

3. 実験結果

表1は実験諸量を示す。ここでH: 水深、 δ : 境界層厚、 $\bar{U}$: 境界層内の平均流速、 U_{∞} : 最大平均流速を表す。以後Run 1を代表させて議論を進める。図3は平均主流速等値線図である。滑面開水路で見られない波状分布を示し、凸部は高速域、凹部は低速域を示す。(A-A')面内を見ると球の後ろ領域と球上で下降流、滑面上で上昇流が存在し2次流による影響がわかる。図4は流速分布を片対数表示したもので、 $Y/\delta \approx 0.3$ 境に流れの特徴が変化している。底面近傍では底面上と球上の速度差が大きく粗度要素の影響を受けている。また図から(1)式を用いて摩擦速度 U_{*} を評価する。このとき $Y/\delta = 3$ を境界とし、2つの領域に分割して扱う。対数則の原点は底面とした。

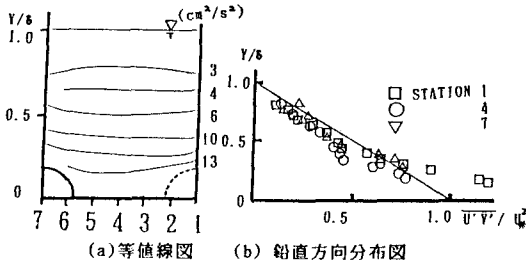


図6 レイノルズ応力

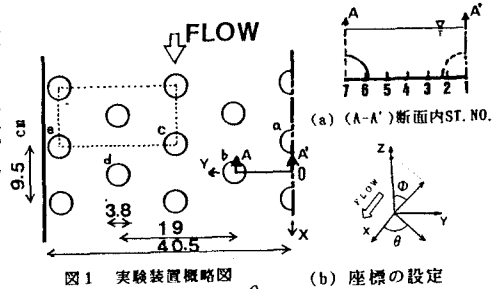


図1 実験装置概略図

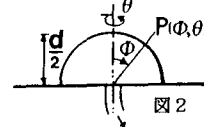


表1 流速分布測定結果

RUN	H(cm)	δ (cm)	$\bar{U}$ (cm/s)	$\bar{U}\delta/\nu$	U_{∞} (cm/s)	$U_{\infty}\delta/\nu$	ν (cm^2/s)
1	10.5	10.5	58	4.68×10	68	4.5	0.0207
2	19.5	11.0	35	2.96×10	44	3.3	0.0111

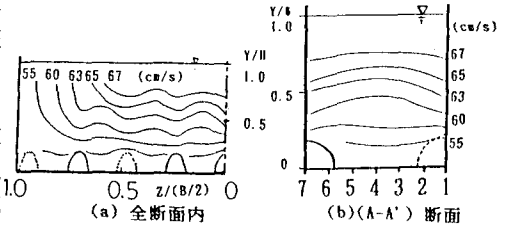


図3 平均主流速等値線図

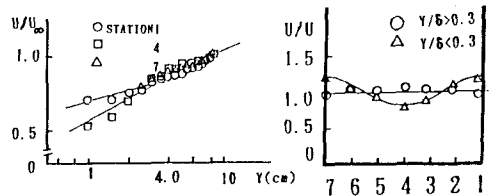


図4 流速分布の対数表示

図5 摩擦速度の横断方向の分布図

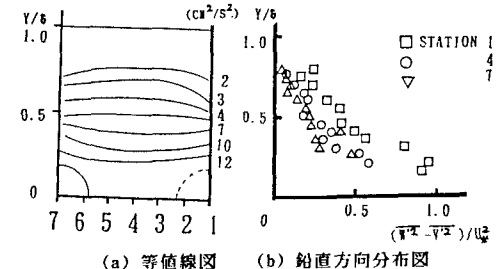


図7 2次流発生項 ($\bar{W}' - \bar{V}'$)

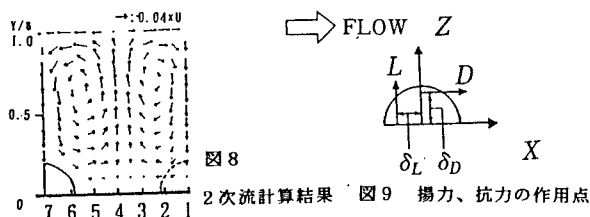


図5がこの結果で、 $Y/\delta = 0.3$ 以上では粗度要素の影響を受けていない。図6のレイノルズ応力の鉛直分布図の直線は、等流条件から求めた(2)式である。さらに2次流発生項($\overline{W^2} - \overline{V^2}$)の等値線図を図7に示す。この分布をレイノルズ応力と同様に、直線分布とする。次に、渦度方程式(4)式を解き2次流を再現した。流れを等流と仮定し、レイノルズ応力を渦動粘性モデル(5)式で表し、渦度の生成項に図5の摩擦速度分布形を与え、法を用いて(4)式を計算した結果が図8である。

$$U/U_* = 5.75 \log(z + z_0)/k_s + 8.5 \quad (1)$$

$$\tau/\delta = U_*^2 (1 - Y/H) \quad (2)$$

$$(\overline{W^2} - \overline{V^2}) = U_*^2 (a - Y/H), \quad a: Y/H \text{ 切片} \quad (3)$$

$$V \frac{\partial \xi}{\partial y} + W \frac{\partial \xi}{\partial z} = \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\overline{v^2} - \overline{w^2}) + \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \overline{vw} + \nu \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

ここに $\xi = \partial W / \partial y - \partial V / \partial z$

$$-\overline{VW} = \epsilon_{yz} \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \quad (5)$$

表2に流体力測定結果を示す。ここで δ_D, δ_L : 抗力、揚力の作用点と中心との距離。 τ : 図1の点線で囲まれた面内の半球2つで受け持つと仮定し、それぞれの抗力から算出。図10は、無次元化した抗力を示し、前報1)の密の粗面($Z_0/d=0.2$)の場合と比較した最大抗力はそれぞれ $\phi=90^\circ$ 、 $\phi=50^\circ$ 付近である。疎な粗面は、半球全体に抗力が及んでいる事がわかる。図11の揚力は、ほぼ相似形であった。図12は、過剰圧力 ΔP ($\phi=0^\circ$)を用いて無次元化したもので円の外側が正を示す。正の領域は、密な粗面に比べ $30^\circ \sim 90^\circ$ と範囲が広く、最大値も 80° 付近に現れている。これらより、大きな流速を持つ流れが半球の下部にまで及んでいる事がわかる。抗力と揚力の比 L/D の値は、0.4前後であった。

4. おわりに

本研究での結論；(1) 半球上と後ろ領域で下降流、滑面上で上昇流が存在する。(2) 底面近傍では(1)と逆の傾向を持ち、そのため底面近傍の流速分布から求めた摩擦速度の値、レイノルズ応力の測定値は粗面上でより大きな値を示した。(3) 渦度方程式の生成項を底面の摩擦速度を用い、直線分布を仮定することによって数値計算で2次流を再現することができた。(4) 粗度要素を、今回のように配置すると、流速分布で仮想底面を考える必要がないことがわかった。

5. 参考文献

- 1) 吉川、植松、城、関根：球状粗度上の流速分布とそれに働く流体力に関する実験的研究、土木学会論文集、第399号、1988
- 2) H. J. PERKINS, The Formation of Streamwise Vorticity in Turbulent Flow, Fluid Mech Vol. 44, 1970
- 3) 富永、江崎：長方形断面水路流の3次元乱流構造に関する実験的研究、土木学会論文集、第337号、1985
- 4) 中川、弥津、富永：各種河床条件における縦渦を伴う流れの乱流構造、京大防災研究所年報、第24号、1981

表2 流体力測定結果

RUN	位置	抗力D(gf)	揚力L(gf)	$\delta D/(d/2)$	$\delta L/(d/2)$	L/D	τ (gf/cm)
1	a	2.506	0.521	0.340	1.630	0.21	0.0270
	b	2.346	0.204	0.336	3.870	0.09	0.0259
	c	1.505	0.805	0.318	0.596	0.54	0.0168
	d	2.191	0.955	0.344	0.454	0.45	0.0219
	e	2.696	0.563	0.344	1.604	0.29	0.0243
2	a	0.873	0.318	0.352	0.897	0.36	0.0097
	b	0.695	0.275	0.347	0.876	0.40	0.0077
	c	0.574	0.540	0.318	0.445	0.72	0.0083
	d	0.993	0.426	0.323	0.776	0.43	0.0103
	e	0.858	0.745	0.382	0.439	0.87	0.0095

