

護岸の減速効果と流速分布

小川 芳 昭*

まえがき

護岸は、河床より丈夫な材料で河岸を覆い、流水の直接作用を防止することと河岸の表面に人工的の粗度を付けて流速を減少させることの二つの大きな機能を有する。実際にはこの二つの相乗作用で機能を発揮するのであるが、本文では護岸(とくに覆法工)の表面の粗さとその減速効果の関係を明らかにすることによつて、法面付近の流速分布を推定した。したがつて、流量、水面勾配、断面形などの水理量と護岸の種類がわかると、流速分布を求めることができるわけで、水理条件に最適な護岸の種類を撰定する有力な方法であると考えられる。

護岸の減速効果

一般河川などの粗な流れでは、流速の垂直分布が、対数分布則によることは、よく知られていることである。一方、垂直な粗壁に対しても、ある範囲では、河床に対すると同様に対数分布則が成立することが明らかにされている。すなわち、河床については、

$$\frac{U_1}{U_{*1}} = 8.5 + 5.75 \log \frac{Z}{k_{s1}} \dots \dots (1)$$

U_1 ; 水深 Z における流速 (m/s)

U_{*1} ; \sqrt{gRI} マサツ速度 (m/s)

R ; 経深 (m)

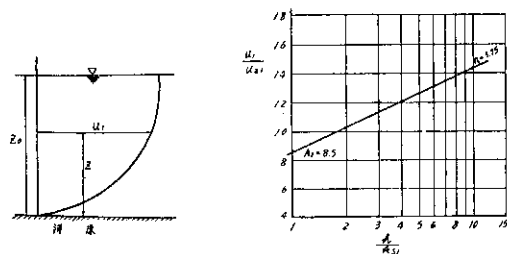
I ; 水面勾配

Z ; 河床から測つた水深 (m)

k_{s1} ; 河床の砂相当粗度 (m)

が成立し、(図-1 参照)

図-1 流速の水深方向の対数分布



粗壁については、

$$\frac{zU_2}{zU_{*2}} = 8.5 + 5.75 \log \frac{y}{zk_{s2}} \dots \dots (2)$$

zU_2 ; 水深 Z で壁から y はなれた点の流速 (m/s)

zU_{*2} ; 水深 Z における y 方向のマサツ速度 (m/s)

y ; 粗壁からの距離 (m)

zk_{s2} ; 水深 Z における粗壁の砂相当粗度 (m)

k ; 粗壁表面の突起高 (m)

* 水工研究室副室長

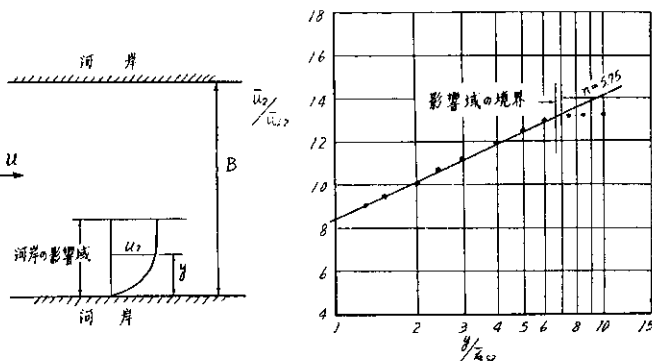
a ; 相当粗度率

$$\bar{k}_{s2} = a \cdot k \text{ (m)}$$

\bar{k}_{s2} ; 粗壁の全水深についての平均相当粗度 (m)

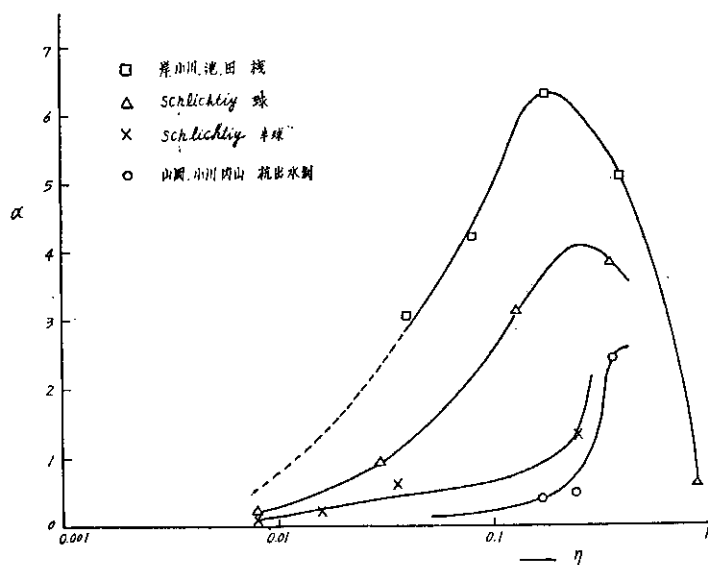
が成立する。(図-2 参照)

図-2 流速の横断方向の対数分布



a は、粗密の度合を示す η ($\frac{\text{流れに直角な面積}}{\text{粗度を張つてある全面積}}$) と一定の関係があり、実験結果によると図-3 のとおりである。結局、 $\bar{k}_{s2} = a \cdot k$ 大きいものほど

図-3 水深に比し幅の広い水路の a と η の関係



\bar{U}_2 が小さくなるから減速効果が大きいことがわかる。

護岸のマサツ速度・砂相当粗度および影響域

実験結果によると、 zU_{*2} 、 zk_{s2} は水深によつて変化するが、水深 Z_0 に比し川巾 B が広い流れでは、図-4、図-5 のような関係がある。

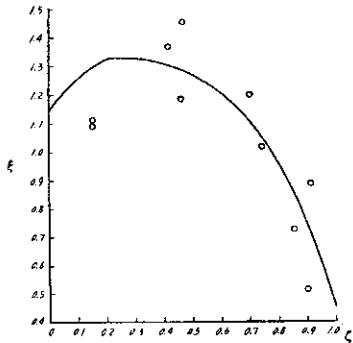
ただし、

$$\xi = \frac{zk_{s2}}{\bar{k}_{s2}} = \frac{\text{水深 } Z \text{ の粗度}}{\text{平均相当粗度}}$$

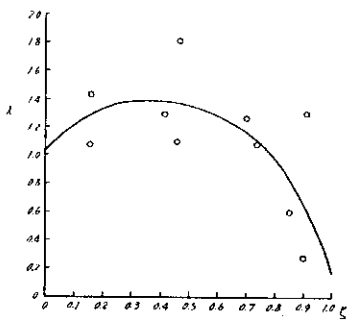
$$\lambda = \frac{Z \bar{U}_{*2}}{\bar{U}_{*2}} = \frac{\text{水深 } Z \text{ のマサツ速度}}{\text{平均マサツ速度}}$$

$$\zeta = 1 - \frac{Z}{Z_0} = \frac{\text{水面から測った水深}}{\text{全水深}} \text{ である。}$$

図一四 水深に比し幅の広い水路の U_{*2}/\bar{U}_{*2} と Z'/Z の関係



図一五 水深に比し幅の広い水路の ks_2/\bar{ks}_2 と Z'/Z_0 の関係



粗壁の流速分布を

$$\frac{U_2}{\bar{U}_{*2}} = 8.5 + 5.75 \log \frac{y}{k_{s2}} \dots (3)$$

で代表させると、粗壁の影響域と河床の影響域との境界では、 $U_1 = U_2$ となるべきであるから、(1)式と(2)式から

$$\frac{U_{*1}}{\bar{U}_{*2}} = \frac{8.5 + 5.75 \log \frac{y}{k_{s2}}}{8.5 + 5.75 \log \frac{Z}{k_{s1}}} = r \dots (4)$$

$$M_1 = \frac{30}{k_{s1}}, \quad M_2 = \frac{30}{k_{s2}} \text{ とおけば}$$

$$r = \frac{\log M_2 y}{\log M_1 Z} \text{ となり、}$$

$$y = \beta \cdot Z r \dots (5)$$

$$\text{ただし } \beta = \frac{M_1 r}{M_2}$$

を得る。

U_{*1} , \bar{U}_{*2} の影響域をそれぞれ A_1 , A_2 とし、片側のみ粗壁があるとすれば、幅の広い水路については、

$$A_1 = \left(1 - \frac{\beta}{r+1} \cdot \frac{Z_0 r}{B} \right) \cdot Z_0 B \dots (6)$$

$$A_2 = \left(1 - \frac{r}{r+1} \right) \cdot B \cdot Z_0^{r+1} \dots (7)$$

となる。また

$$\left. \begin{aligned} U_{*1} &= \sqrt{g \cdot \frac{A_1}{B} \cdot I} \\ \bar{U}_{*2} &= \sqrt{g \cdot \frac{A_2}{Z_0} \cdot I} \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

であるから、(6)(7)(8)の関係(4)に代入して、

$$r^2 = \frac{(r+1)M_2 Z_0}{(M_1 Z_0)^r} - \frac{Z_0}{B} \dots (9)$$

を得る。この式から試算法によつて r が求まると、

$$U_{*1} = \sqrt{g Z_0 I} \text{ としてよいから、}$$

$$\bar{U}_{*2} = \frac{U_{*1}}{r} \dots (10)$$

によつて、粗壁のマサツ速度を決定できる。

粗壁の流速分布

$$Q = 1,000 \text{ m}^3/\text{s}, \quad B = 200 \text{ m}, \quad Z_0 = 2.0 \text{ m}, \quad I = \frac{1}{1,000}$$

なる広矩形断面水路の片側を法覆した場合を計算する。

I 河床の流速分布

$$U_{*1} = \sqrt{g \cdot Z_0 \cdot I} = \sqrt{9.8 \times 2.0 \times \frac{1}{1,000}} = 0.14 \text{ m/s}$$

$$U_m = \frac{Q}{A} = \frac{1,000}{200 \times 2} = 2.50 \text{ m/s} \text{ 平均流速}$$

河床粗度は、平均流速の理論公式より、

$$\log k_{s1} = \frac{1}{5.75} \left(6.0 + 5.75 \log Z_0 - \frac{U_m}{U_{*1}} \right)$$

$$= 2.21 \quad \therefore \bar{k}_{s1} = 0.016 \text{ m}$$

したがつて、 $U_1 = \bar{U}_{*1} \left(8.5 + 5.75 \log \frac{Z}{\bar{k}_{s1}} \right)$

$$= 2.61 + 0.78 \log Z$$

II 豆板法覆の場合

図一六 豆板工法覆の場合(単位cm)

図一六のようにちどりに玉石を埋め突起は半径10cmの半球とすれば、

$$\eta = \frac{0.1^2 \times \pi}{0.5 \times 0.5} = 0.624$$

となるから、図一三より

$$a = 0.8$$

$$\therefore \bar{k}_{s2} a \cdot k = 0.8 \times 0.1 = 0.08 \text{ m}$$

したがつて、 $M_2 = \frac{30}{0.08} = 375$ $M_1 = \frac{30}{0.016} = 1850$

$$r^2 = \frac{(r+1)375 \times 2}{3700r} - 0.01 \text{ より } r = 0.91 \text{ を得る。}$$

よつて、境界線は、

$$y = 2.43 Z^{0.91}$$

であり、マサツ速度は、

$$\bar{U}_{*2} = \frac{0.14}{0.91} = 0.15$$

各水深ごとの流速分布は、図一四、図一五から、 $z U_{*2}$, $z k_{s2}$ を求めて計算すると、表一、図一七のようになる。

表-1

豆板法覆工の流速分布式

$\bar{U}_{*2} = 0.153m/s$ $\bar{k}_{s2} = 0.080$

Z	Z'	Z'/Z	U_{*2}/\bar{U}_{*2}	U_{*2}	k_{s2}/\bar{k}_{s2}	k_{s2}	$\log k_{s2}$
1.80	0.20	0.1	1.25	0.191	1.22	0.098	2.991
1.40	0.60	0.3	1.33	0.203	1.39	0.111	1.045
1.00	1.00	0.5	1.27	0.194	1.35	0.108	2.033
0.60	1.40	0.7	1.10	0.168	1.17	0.094	2.973
0.20	1.80	0.9	0.73	0.112	0.65	0.052	2.716

①	② ①×5.75	③ 8.5-②	③×U _{*2}	5.75×U _{*2}	
-1.009	-5.80	14.30	2.73	1.10	$U_{0.1} = 2.73 + 1.10 \log y_{0.1}$
-0.955	-5.49	13.99	2.84	1.17	$U_{0.3} = 2.84 + 1.17 \log y_{0.3}$
-0.967	-5.56	14.06	2.73	1.12	$U_{0.5} = 2.73 + 1.12 \log y_{0.5}$
-1.027	-5.91	14.41	2.42	0.97	$U_{0.7} = 2.42 + 0.97 \log y_{0.7}$
-1.284	-7.38	15.88	1.78	0.64	$U_{0.9} = 1.78 + 0.64 \log y_{0.9}$

図-7 豆板工流速分布図

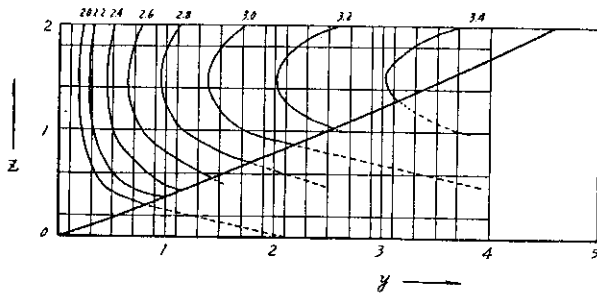
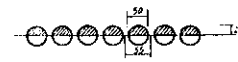


図-8 均一径の蛇籠工(単位cm)φ=50cm



$\eta = \frac{0.25}{0.5 \times 11} = 0.455$ であつて、 $a = 2.9$ となる。

したがつて、 $\bar{k}_{s2} = 0.25 \times 2.9 = 0.725m$

$M_2 = \frac{30}{0.725} = 41.4$

$r^2 = \frac{(r+1)41.4 \times 2}{3700r} - 0.01$ より $r = 0.69$

$y = 4.24Z^{0.69}$

$\bar{U}_{*3} = \frac{0.14}{0.69} = 0.20m/s$

を得る。これから、Ⅱと同様にして流速分布を求めると表-2、図-9 のようになる。

Ⅲ 蛇籠法覆工の場合

図-8 のように径50cmの蛇籠を1割巾の余裕をみて施工した場合は、

表-2

蛇籠法覆工の流速分布式

$\bar{U}_{*2} = 0.202m/s$ $\bar{k}_{s2} = 0.725m$

Z	Z'	Z'/Z	U_{*2}/\bar{U}_{*2}	U_{*2}	k_{s2}/\bar{k}_{s2}	k_{s2}	$\log k_{s2}$
1.80	0.20	0.1	1.25	0.253	1.22	0.885	1.947
1.40	0.60	0.3	1.33	0.269	1.39	1.008	0.0025
1.00	1.00	0.5	1.27	0.257	1.35	0.979	1.991
0.60	1.40	0.7	1.10	0.222	1.17	0.848	1.928
0.20	1.80	0.9	0.70	0.141	0.65	0.471	1.673

①	② ①×5.75	③ 8.5-②	③×U _{*2}	5.75×U _{*2}	
-0.053	-0.305	8.81	2.23	1.45	$U_{0.1} = 2.23 + 1.45 \log y_{0.1}$
0.0025	0.014	8.49	2.28	1.55	$U_{0.3} = 2.28 + 1.55 \log y_{0.3}$
-0.009	-0.052	8.55	2.20	1.48	$U_{0.5} = 2.20 + 1.48 \log y_{0.5}$
-0.072	-0.414	8.91	1.98	1.28	$U_{0.7} = 1.98 + 1.28 \log y_{0.7}$
-0.327	-1.880	10.38	1.46	0.81	$U_{0.9} = 1.46 + 0.81 \log y_{0.9}$

図-9 蛇籠法覆工流速分布図

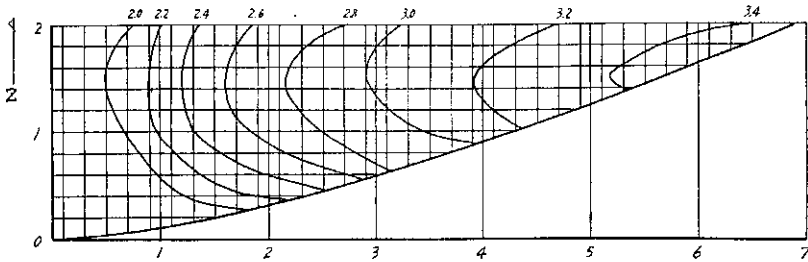


図-7, 図-9からわかるように豆板工と蛇籠工では同一の平均流速に対し, 法面付近の流速には相当差があり, 減速効果だけから見ると蛇籠工はかなり有効なことがわかる。

流速分布の台形断面への変換

これまで, 直な粗壁についての考察を述べてきたが, 実際には, 河岸は直でなく1割, 2割, 2割5分などの勾配を持つのが普通である。もし, 横断流速の対数分布が法面に直角な方向に成立し, 水深によって変化するという条件によって規制されるとするなら, 台形断面に適用する場合, 分布則の成立は, 丁度図-10のように折れ曲がついている平行壁の間を流れる。ポテンシャル流の流線に相当すると考えてよいであろう。

したがって, 折り曲がり点で1割, 2割, 2割5分などの傾斜を持つ水路の flow net をあらかじめ作っておき, 前述の方法で計算した矩形断面の流速分布図から対応点に値を移すと, 台形断面の法面付近の流速分布図を描くことができる。

図-10 折れ曲る平行壁間の流線

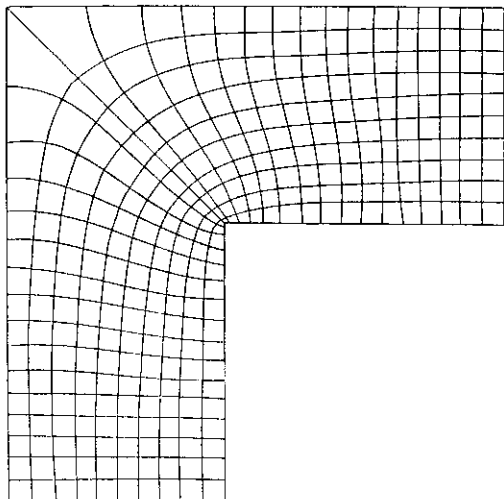
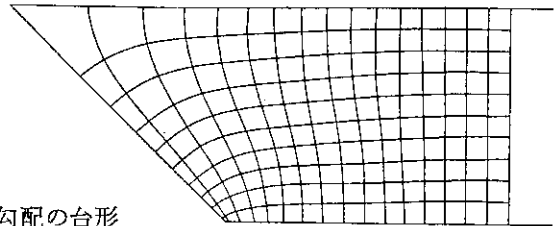


図-11は, 内田博士の試算法によって求めた1割, 2割勾配に対する, flow net であり, 図-12, 図-13は, 図-7, 図-9の分布図から変換した2割勾配の法面を有する台形断面水路の法面付近の流速分布である。

図-11 台形断面の flow net(a)1割勾配の台形



(b) 2割勾配の台形

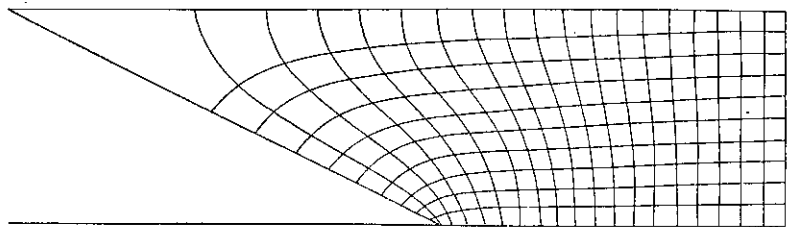


図-12 豆板工流速分布

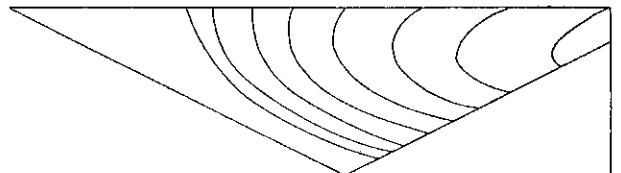
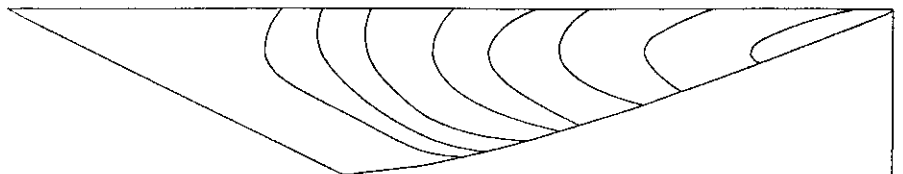


図-13 蛇籠工流速分布



あとがき

この考察は, 石狩川4区および十勝川護岸・水制の調査研究の一部として行なわれたものである。現地調査による実測値がまだ十分採れていないので, 実測と理論を比較検討するに至らなかつたが, 実験の場合は, 実験観測値と理論推定値とよく一致することが確かめられている。