

護岸の水理学的特性

正員 北海道大学工学部 岸 力
 正員 北海道開発局土木試験所 小川 芳昭
 正員 北海道電力 K.K. 土木部 池田 達哉

§1 ま え が き

これまでの護岸工程の選定は表-1を標準として行なわれているようである。しかし流速、水位などの水理条件に応ずる護岸細部の設計方針については資料が乏しく、一般的な基準は確立されていない。本文は護岸の表面形状の持つ粗度としての効果を水理的に調べ、護岸設計の一資料としようとするものである。

表-1 護岸工種の標準値
 河川工学便覧, 上巻 418 頁および
 河川工学 (久宝雅史) p. 160 より

流 速 (m/s)	工 種
0.45 以上	柳 枝 工
0.55 "	豆 板 コ ン ク リ ー ト
0.65 "	石 張
0.7 "	コ ン ク リ ー ト ・ ブ ロ ッ ク
0.9 "	コ ン ク リ ー ト 張 り

流速は断面の平均値

§2 基 礎 的 考 察

2-1 流速の対数分布則

一般の河川や今回実験に用いたような粗面の流れでは、その流速分布は Prandtl (プラントル) や Kármán (カルマン) の対数分布則式がよく適合することが明らかにされている。

すなわち粗面水路の流速分布は次式にしたがう。

$$\frac{u}{u_*} = A_r + \frac{2.3}{K} \log_{10} \frac{z}{k_s} \quad (1)$$

u : 水深 z における流速

u_* : マサツ速度 $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho} = \sqrt{gRI}$

τ_0 : 潤辺におけるせん断応力

ρ : 水の密度

R : 径 深

A_r : 常 数

K : カルマン常数, 浮泥を含めぬ時は 0.4

z : 底面から測つた水深

k_s : 等価粗度

Nikuradse の実験によれば、粗な流れでは $A_r = 8.5$ であるから (1) 式はつぎのようになる。

$$\frac{u}{u_*} = 8.5 + 5.75 \log_{10} \frac{z}{k_s} \quad (2)$$

2-2 護岸の水理学的粗さ

2-1 の (1) (2) 式で示した k_s は河床材料の平均の粗さ d_m とは必ずしも一致せず、(1) (2) 式が成立するような仮想の粗さ k_s を考え、この k_s と実際の河床の粗さとの間に関係を求めて、分布則を表わしているのが普通である。 k_s はニクラゼの砂相当粗度とも呼ばれ、水理学的な粗さを示すものである。従つて護岸の幾何学的粗さと k_s の関係を知ることによつて護岸の水理学的粗さが明らかになる。

今護岸の実際の粗さで対数分布則を表わすと

$$\frac{u}{u_*} = A + 5.75 \log \frac{z}{k} \quad (3)$$

ニクラゼの砂相当粗度で表わすと

$$\frac{u}{u_*} = 8.5 + 5.75 \log \frac{z}{k_s} \quad (4)$$

となる。

(3) と (4) から

$$\frac{8.5 - A}{5.75} = \log \frac{k_s}{k} \quad (5)$$

ここで $\log \alpha = \frac{8.5 - A}{5.75}$ とすると

$$k_s = \alpha \cdot k \quad (6)$$

またマサツ速度を流速分布から求めるには

$$u = u_* (8.5 - 5.75 \log k) + 5.75 u_* \log z \quad (7)$$

であるから、流速分布をセミログ紙に書き、この勾配 n を読み取る。このときマサツ速度 u_* は

$$u_* = \frac{n}{5.75} \quad (8)$$

また $z=k$ のときの $\frac{u}{u_*}$ が A となる。

従つて u , z , k は既知または観測値であるから、前述の各式によつて、 u_* , A , k_s が求まる。結局流速分布を実測

表-2 実 験 結 果

群	粗度の種類	各水理量	水面下の深さ	z'/z_0	マサツ速度	粗度常数	相当粗度率	相当粗度	平均の相当粗度とマサツ速度	$k_s/\bar{k}_s$	$u_*/\bar{u}_*$	
			z' (cm)		u_* (cm/s)	A	α	k_s				
a	I $\eta=0.04$ $\lambda=25$	水深 z_0 (cm)	13.54	1	0.07	2.96	3.6	7.06	14.12	$\bar{k}_s$	1.24	0.91
		流量 Q (ℓ/s)	22.35	5	0.37	4.09	3.8	6.53	13.06	11.45	1.19	1.26
		平均流速 u_m (cm/s)	28.3	9	0.66	3.83	4.1	5.77	11.54	u_*	1.00	1.18
		水面勾配 I	1/400	11	0.81	2.70	5.6	3.17	6.34	3.25	0.55	0.83
				12	0.89	2.70	5.4	3.44	6.88		0.60	0.83
	II $\eta=0.08$ $\lambda=12.5$	z_0	13.00	1	0.08	11.50	2.8	9.73	19.46	$\bar{k}_s$	0.75	0.67
		Q	71.86	3	0.23	13.90	3.6	7.06	14.12	25.80	0.55	0.81
		u_m	94.8	6	0.46	24.70	1.3	17.70	35.40	u_*	1.37	1.44
		I	1/105	9	0.69	24.20	1.0	20.00	40.00	17.10	1.55	1.42
				12	0.92	11.50	2.7	10.09	20.18		0.84	0.67
	III $\eta=0.175$ $\lambda=6.25$	z_0	13.00	1	0.08	13.05	2.5	10.97	21.94	$\bar{k}_s$	1.10	0.92
		Q	71.03	3	0.23	14.80	2.4	11.40	22.80	20.00	1.14	1.05
		u_m	93.9	6	0.46	15.65	2.8	9.75	19.50	u_*	0.98	1.10
		I	1/105	9	0.69	16.50	2.6	10.52	21.04	14.15	1.05	1.16
				12	0.92	10.41	3.5	7.34	14.68		0.74	0.74
	IV $\eta=0.4$ $\lambda=3.125$	z_0	11.94	1	0.08	14.45	3.6	7.08	14.16	$\bar{k}_s$	0.96	1.00
		Q	67.44	3	0.25	15.20	3.4	7.67	15.34	14.80	1.03	1.06
		u_m	96.7	6	0.50	16.10	3.0	9.00	18.00	u_*	1.22	1.12
		I	1/105	9	0.75	15.20	3.0	7.67	15.34	14.40	1.03	1.05
				11	0.92	11.05	4.2	5.56	11.12		0.75	0.77
b	I $\eta=0.04$ $\lambda=25$	z_0	10.70	1	0.09	2.96	11.2	0.34	0.68	$\bar{k}_s$	0.90	0.70
		Q	50.75	3	0.28	4.52	11.3	0.32	0.64	0.76	0.84	1.08
		u_m	81.5	6	0.56	6.00	9.0	0.81	1.62	u_*	2.13	1.43
		I	1/125	9	0.84	3.30	15.9	0.05	0.10	4.20	0.13	0.79
	II $\eta=0.08$ $\lambda=12.5$	z_0	11.36	1	0.08	12.00	1.5	16.33	32.66	$\bar{k}_s$	—	0.99
		Q	52.65	3	0.26	12.20	3.0	8.97	17.94	15.60	1.15	1.01
		u_m	79.60	6	0.53	14.30	2.8	9.77	19.54	u_*	1.25	1.18
		I	1/100	9	0.79	9.92	4.6	4.73	9.46	12.10	0.61	0.82
	III $\eta=0.175$ $\lambda=6.25$	z_0	10.78	1	0.09	10.35	3.6	7.19	14.38	$\bar{k}_s$	0.99	0.92
		Q	49.20	3	0.28	14.20	2.7	10.09	20.18	14.50	1.39	1.19
		u_m	79.6	6	0.56	14.20	2.8	9.77	19.54	u_*	1.35	1.19
		I	1/111	9	0.84	6.61	5.8	1.92	3.84	11.30	0.26	0.56
	IV $\eta=0.4$ $\lambda=3.125$	z_0	10.22	1	0.10	9.21	5.6	3.18	6.36	$\bar{k}_s$	0.58	0.85
		Q	48.20	3	0.29	12.95	3.5	7.35	14.70	10.98	1.34	1.20
		u_m	80.9	6	0.59	14.25	2.8	9.77	19.54	u_*	1.78	1.32
		I	1/118	9	0.88	6.86	7.2	1.67	3.34	10.80	0.30	0.64
c	I $\eta=0.04$ $\lambda=25$	z_0	7.13	1	0.14	2.88	7.4	1.54	3.08	$\bar{k}_s$	0.50	0.54
		Q	24.55	3	0.42	7.30	5.0	4.03	8.06	6.15	1.31	1.36
		u_m	59.1	5	0.70	6.45	6.0	2.70	5.40	u_*	1.88	1.20
		I	1/111	6.5	0.91	4.79	5.0	4.03	8.06	5.36	1.31	0.89
	II $\eta=0.08$ $\lambda=12.5$	z_0	6.48	1	0.16	6.80	4.0	6.01	12.02	$\bar{k}_s$	1.43	1.09
		Q	22.00	3	0.46	7.40	4.7	4.56	9.12	8.40	1.09	1.18
		u_m	58.4	5.5	0.85	4.52	6.2	2.50	5.00	u_*	0.60	0.73
		I	1/111							6.25		0.73
	III $\eta=0.175$ $\lambda=6.25$	z_0	7.18	1	0.15	7.31	4.9	4.22	8.44	$\bar{k}_s$	0.65	0.83
		Q	27.10	3	0.45	14.45	2.1	12.85	25.70	12.64	2.04	1.64
		u_m	65.0	5	0.74	8.96	3.8	6.53	13.06	u_*	1.08	1.02
		I	1/111	6	0.89	4.47	7.2	1.67	3.34	8.80	0.27	0.51
	IV $\eta=0.4$ $\lambda=3.125$	z_0	6.56	1	0.16	9.84	4.1	5.77	11.54	$\bar{k}_s$	1.07	1.11
		Q	25.95	3	0.47	12.80	2.8	9.77	19.54	10.80	1.81	1.45
		u_m	67.8	6	0.94	3.87	9.6	0.64	1.28	u_*	0.12	0.44
		I	1/111							8.85		

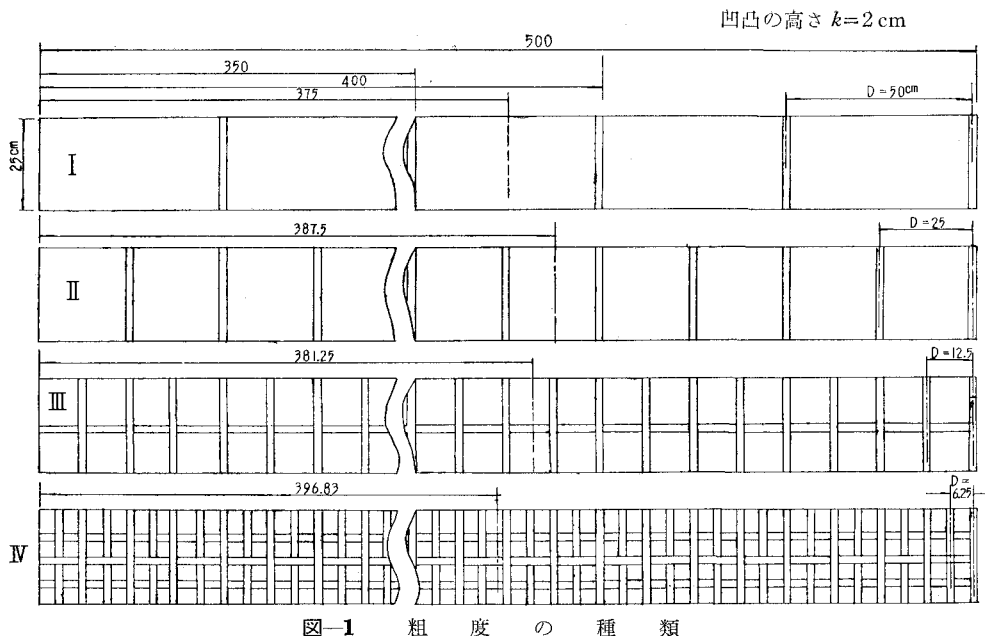


図-1 粗度の種類

することによつて護岸の水理学的粗さと幾何学的粗さとの関係が明らかにされる。

§ 3 実験および実験結果とその考察

3-1 実験の目的

護岸表面の凹凸の高さとその配置を考慮した水理学的粗さ(護岸のニクラーゼの砂相当粗度)を求め、これが流速分布にどのような影響を及ぼしているかを考え、護岸の持つ減速効果を明らかにしてその算定法を提案したい。すなわち、平均流速、水面勾配、流れの断面形、河床の粗さ、護岸の粗さが与えられたとき、護岸の法面付近の流速分布を算定できるようにする。

3-2 実験の装置と方法

水路は幅 58 cm、高さ 28 cm の矩形断面樋で、底勾配を 1/400 とした。この側壁に護岸モデルとして図-1 に示するような 4 種の棧(高さ 2 cm)を打付け、それぞれ水深が 7、10、13 cm になるようにして実験を行なつた。測定は棧粗度の始点より 3.5 m 下流の縦棧の中間で行なつた。流速分布は粗な側壁による影響を考えることになるので、水面より 1、3、6、9、12 cm の位置でピトー管によつて測定した。

3-3 実験結果

4 種の粗度に対する各観測値を 2-2 の方法で取纏めた計算結果は表-2 のとおりである。

但し、 $\bar{k}_s$ は各粗度の平均砂相当粗度

$$\eta = \frac{F_r}{F} = \frac{\text{流れに直角な面積の和}}{\text{粗度の張つてある全面積}}$$

であつて、粗密の度合を示す常数。

$$\lambda = \frac{D}{k} = \frac{\text{棧の間隔}}{\text{棧の高さ}}$$

で棧高による粗密の度合を示す常数

3-4 結果の考察

i 粗度密度による $\bar{k}_s$ と α の変化

全測点における k_s の平均値 $\bar{k}_s$ (平均砂相当粗度) および α は粗度密度によつて異なり、図-2 に示すように $\eta=0.08$ と $\eta=0.2$ の間に極大を有する。これは λ でいえば 6.25 から 12.5 の間であつて Jhonson (ジョンソン) や岩垣、細井(京都大学)などの実験でも同様の結果が示されている。

ii 全水深による $\bar{k}_s$ および α の変化

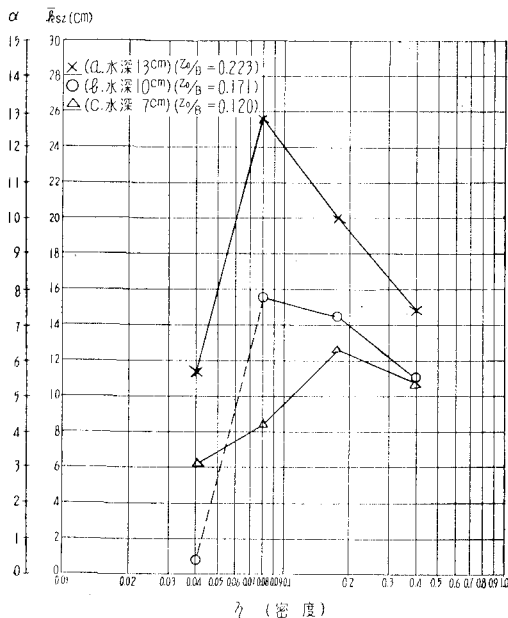


図-2 η と $\bar{k}_s$ および α の関係

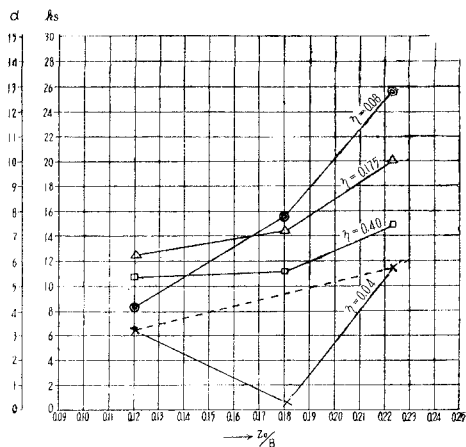


図-3 z_0/B (水深/川幅) による $\bar{k}_s$ と α の変化

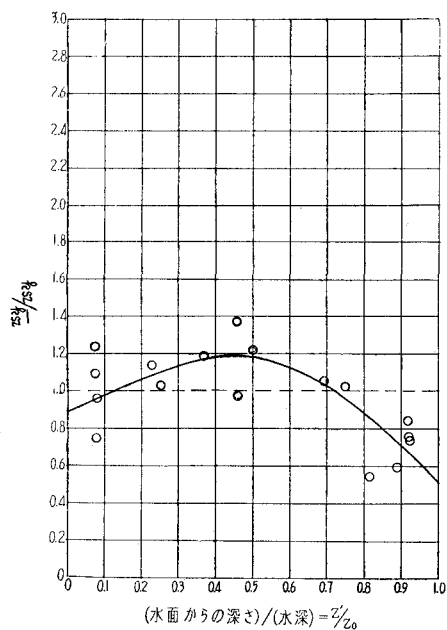


図-4 a 深土による k_s の変化

$$\frac{z}{B} = 0.224$$

$\bar{k}_s$ および α は $\eta=0.04$ の場合を除いて、水深が大になれば増す傾向にある。すなわち $z_0/B = \frac{\text{水深}}{\text{水路幅}}$ が大なる程大きい $\bar{k}_s$ をとる。しかしながら $\eta=0.1$ に近い $\eta=0.08$ がその変化は最も激しく、 η が大きくなると $\bar{k}_s$ は次第に小になり、水深による変化も緩やかになる。また η が 0.08 より小になっても同様のことがいえるようである。また z_0/B が 0.1 より小になると $\bar{k}_s$ や α は η のみによつて変るような傾向を見せている。

iii 深さによる k_s の変化

k_s は水面からの深さによつて異なり、いずれの場合も $z/z_0=0.5$ (水深の 1/2) 付近で k_s は最大となり、水面または

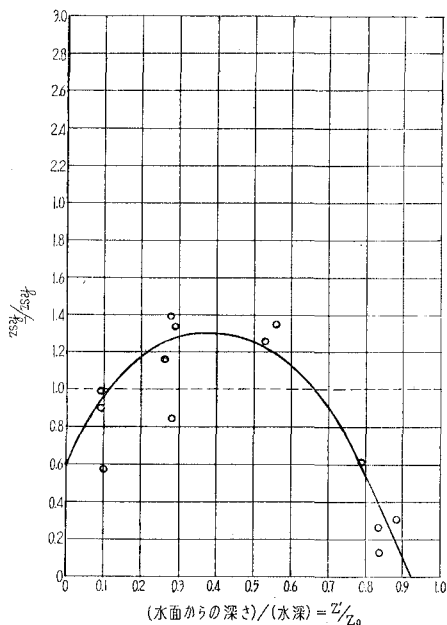


図-4 b $\frac{z_0}{B} = 0.181$

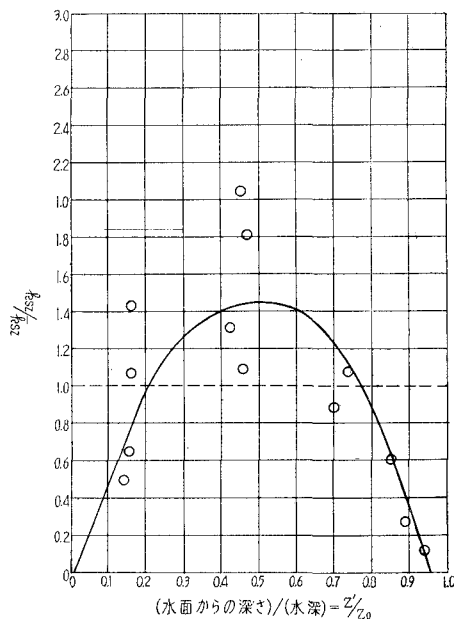


図-4 c $\frac{z_0}{B} = 0.120$ の場合

水底に近くなると減少する。しかし図-4a, 4b, 4c が示すように水深が大となると、 k_s の変化は緩やかで k_s は $\bar{k}_s$ に近いが、水深が小となるとその変化は激しくなる。

iv 深さによる u_{*} の変化

図-5 に示すようにマサツ速度も、水面下の位置によつて変化する。すなわち水面および水底で小さく、水深の中央付近で最大となる。

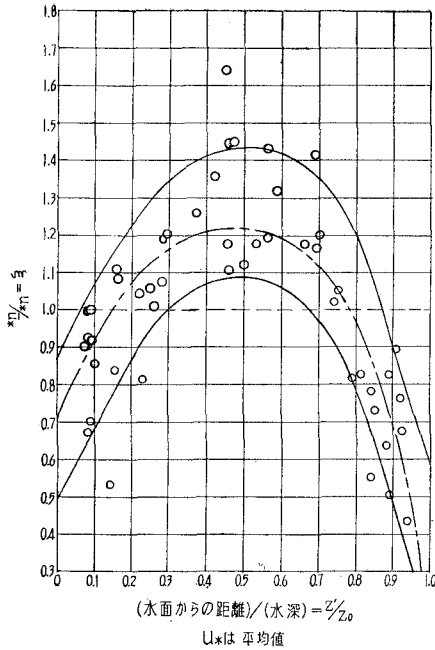


図-5 深さによる u_* の変化

§ 4 護岸による減速効果

§ 3 の結果によれば護岸の表面形状に応じて、その水理的な粗さを推定できる。従つて、護岸表面に沿つてせん断力あるいはマサツ速度を求めることができれば、(2) 式あるいは (4) 式によつて、護岸表面近くの流速を算出することができ、ひいては護岸の減速効果を比較検討することができる。

4-1 断面分割法による護岸のマサツ速度の決定

一般河川の潤辺は、護岸部分と自然河床部分の二つに分けられる。実験では粗な側壁によつて護岸のモデルとしたが、この考察でも問題を簡素化するため断面を矩形と仮定する。また流れは図-6 のように、底面および側壁それぞれの影響範囲に分けられるといえる。なお各水理量の記号は § 2 で示したとおりであるが、添字 1 は底面 (自然河床) に関するものを表わし、添字 2 は粗壁 (護岸) に関するものを表わす。一例として実験 IIIa の流速分布を示すと、図-7 のとおりで、前記の仮定が大体なり立つことが認められる。

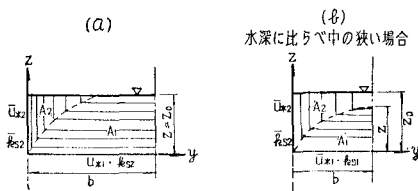


図-6 底面と粗壁の影響範囲

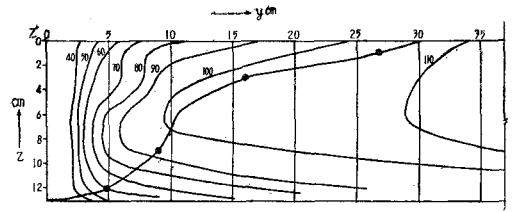


図-7 流速分布と領域の境界線 (IIIa の実測値)

今それぞれの領域を A_1 , A_2 とすると

A_1 の領域では

$$\frac{u_1}{u_{*1}} = 8.5 + 5.75 \log \frac{z}{\bar{k}_{s1}} \quad (9)$$

A_2 の領域では

$$\frac{u_2}{u_{*2}} = 8.5 + 5.75 \log \frac{y}{\bar{k}_{s2}} \quad (10)$$

ここで A_1 と A_2 の境界では両者の流速は等しいから $u_1 = u_2$ とおくと

$$\frac{u_{*1}}{u_{*2}} = \frac{8.5 + 5.75 \log \frac{y}{\bar{k}_{s2}}}{8.5 + 5.75 \log \frac{z}{\bar{k}_{s1}}} = r \quad (11)$$

しかるに u_{*1} は本実験の場合には側壁の一方にのみ粗度をつけたから次式で表わされる。

$$u_{*1} = \sqrt{g A_1 I / (B + z_0)} \quad (12)$$

普通河川では水深に比して幅は非常に大きいから

$$u_{*1} = \sqrt{g \cdot z_0 \cdot I} \quad (12')$$

としてよい。

また広矩形断面では平均流速公式は

$$\frac{u_m}{u_{*1}} = 6.0 + 5.75 \log \frac{R_{0.7} z_0}{\bar{k}_{s1}} \quad (13)$$

で表わされるから、ある断面の形状、水面勾配、流量などが与えられると、(12) または (12') によつて u_{*1} 、(13) によつて $\bar{k}_{s1}$ が求まる。また

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{5.75} (8.5 - 5.75 \log \bar{k}_{s1}) &= \log M_1 \\ \frac{1}{5.75} (8.5 - 5.75 \log \bar{k}_{s2}) &= \log M_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

とおくと

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{30}{\bar{k}_{s1}} \\ M &= \frac{30}{\bar{k}_{s2}} \end{aligned} \right\} \quad (14')$$

よつて (11) 式は

$$\frac{\log M_2 y}{\log M_1 z} = r$$

すなわち、2 領域の境界線の式は

$$\therefore y = \frac{M_1 r}{M_2} z^r$$

ここで $\frac{M_1 r}{M_2} = \beta$ とおくと

$$y = \beta z^r \quad \dots\dots\dots (15)$$

となる。

従つて、図-6 の A_1 , A_2 のマサツ速度はつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_{*1} &= \sqrt{g \frac{A_1}{B}} I \\ &= \sqrt{g \frac{I}{B}} \sqrt{\left(1 - \frac{\beta}{r+1} \cdot \frac{z_0^r}{B}\right) z \cdot B} \\ \bar{u}_{*2} &= \sqrt{g \frac{A_2}{z_0}} I \\ &= \sqrt{g \frac{I}{z_0}} \sqrt{\left(1 - \frac{r}{r+1} \cdot \frac{z_0}{h}\right) \beta z_0^r \cdot h} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

幅の広い水路では $z_0 = h$ であり、(16) と (11) から次式を得る。

$$r^2 = \frac{\bar{u}_{*1}^2}{\bar{u}_{*2}^2} = \frac{(r+1) M_2 z_0}{(M_1 z_0)^r} - \frac{z_0}{B} \quad \dots\dots\dots (17)$$

(17) を満足する r が求まると

$$\bar{u}_{*2} = \frac{\bar{u}_{*1}}{r} \quad \dots\dots\dots (18)$$

で粗壁 (護岸) の影響範囲のマサツ速度が決定される。

4-2 粗壁 (護岸) のマサツ速度の実験値と計算値の比較

次に挙げる 2 つの方法によつて得たマサツ速度を比べこれらの持つ意味を考えよう。

(1) $\bar{u}_{*2}$: 粗壁 (護岸) 近傍の分布から決定したマサツ速度

(2) $\bar{u}'_{*2}$: 4-1 の (17) (18) 式によつて決定したもの

この 2 つの方法で求めた結果は表-3 のとおりであつて、これによると $\bar{u}_{*2}$ は実測値とよく一致している。

表-3 2 方法によつて求めたマサツ速度

群	種類	$\bar{u}_{*2}$	$\bar{u}'_{*2}$	$\bar{u}_{*2}/\bar{u}'_{*2}$	$\bar{u}_{*2}/\bar{u}'_{*2}$ の平均
a $\frac{z_0}{B} = 0.115$	I	17.20	14.20	1.21	1.12
	II	14.00	12.98	1.03	
	III	14.40	12.80	1.12	
	IV				
b $\frac{z_0}{B} = 0.181$	I	12.10	11.50	1.05	1.04
	II	11.90	11.30	1.05	
	III	10.80	10.55	1.02	
	IV				
c $\frac{z_0}{B} = 0.222$	I	5.36	7.65	0.70	0.84
	II	6.25	8.12	0.77	
	III	8.80	9.40	0.94	
	IV	8.85	9.33	0.95	
					平均 1.00

しかし計算で求めた $\bar{u}'_{*2}$ は、粗壁に対する平均値であつて、水深により図-5 のように変化し、同様に $\bar{k}_{s2}$ も図-4 のように変化する。従つて図-5、図-4 から各水深に対する $\bar{u}_{*2}$, $\bar{k}_{s2}$ が求まり、断面の流速分布図が描ける。今一例として粗度 III で水深 $z_0 = 13.00$ cm の場合を、前述の断面分割法によつて $\bar{u}_{*2}$ を決定し、流速分布を求め、実測値と比較しよう。

条件は表-2 から

$$z_0 = 13.00 \text{ cm} \quad u_m = 93.9 \text{ cm/s} \quad I = \frac{1}{105}$$

である。

マサツ速度は

$$\begin{aligned} \bar{u}_{*1} &= \sqrt{gI \frac{A_1}{B+z_0}} = \sqrt{gI \frac{A}{P}} \\ &= \sqrt{980 \times \frac{1}{105} \times \frac{57 \times 13}{57+26}} = \sqrt{82.2} = 9.07 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

平均流速公式から

$$\begin{aligned} \frac{u_m}{\bar{u}_{*1}} &= 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{\bar{k}_{s1}} \\ \log \bar{k}_s &= \frac{1}{5.75} \left\{ 6.0 + 5.75 \log R - \frac{u_m}{\bar{u}_{*1}} \right\} \\ &= \frac{1}{5.75} \{ 6.0 + 5.75 \times 0.951 - 10.35 \} = \frac{1.12}{5.75} = 0.195 \end{aligned}$$

$$\therefore \bar{k}_{s1} = 1.56 \text{ cm}$$

一方 $\bar{k}_{s2} = 20.0$ cm ($\eta = 0.175$ で $\frac{z_0}{B} = 0.223$ のものに対して与えられる)

$$\therefore M_1 = \frac{30}{1.56} = 19.2 \quad M_2 = \frac{30}{20.00} = 1.5$$

$$\therefore y = \frac{M_1 r}{M_2} z^r = \frac{(19.2 \times z)^r}{1.5}$$

で A_1 と A_2 の領域が決められる。

(17) 式に $M_2 = 1.5$ $M_1 = 19.2$ $z_0 = 13.0$ を入れると

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{(1-r) M_2 z_0}{(M_1 z_0)^r} - \frac{z_0}{B} = \frac{(1+r) 1.5 \times 13.0}{(19.2 \times 13.0)^r} - \frac{13}{57} \\ &= \frac{(1+r) 19.5}{249.5^r} - 0.228 \end{aligned}$$

この式から

$$\therefore r = 0.695$$

が得られるから

$$\beta = \frac{M_1^0}{M_2} = \frac{19.5^{0.695}}{1.5} = 5.25$$

従つて A_1 と A_2 の境界線は

$$y = 5.25 z^{0.695} \doteq 5.2 z^{0.7}$$

で示される。また側壁のマサツ速度は

$$\bar{u}_{*2} = \frac{\bar{u}_{*1}}{r} = \frac{9.07}{0.695} = 13.05$$

となる。そこで図-5 より各水深の $\bar{u}_{*2}$ を求めると表-4 のようになる。

表-4 深さによる u_{*2}

z'	z'/z_0	$\xi u_{*2}/\bar{u}_{*2}$	u_{*2}
1	0.077	0.88	11.5
3	0.23	1.12	14.6
6	0.46	1.22	15.9
9	0.69	1.12	14.6
12	0.92	0.63	8.2

また図-4aによつて $\bar{k}_{s2}$ から各水深の u_{*2} を求めると表-5 のようになる。

表-5 深さによる k_{s2}

z'	z'/z_0	$k_{s2}/\bar{k}_{s2}$	k_{s2}
1	0.08	0.95	19.0
3	0.23	1.09	21.8
6	0.46	1.18	23.6
9	0.69	1.04	20.8
12	0.92	0.70	14.0

従つて各水深ごとの流速分布は

$$u_1 = 11.5 \left(8.5 + 5.75 \log \frac{y}{19.0} \right) = 12.5 + 66.1 \log y \quad y < 30$$

$$u_3 = 14.6 \left(8.5 + 5.75 \log \frac{y}{21.8} \right) = 11.7 + 83.9 \log y \quad y < 26$$

$$u_6 = 15.9 \left(8.5 + 5.75 \log \frac{y}{23.6} \right) = 9.7 + 91.5 \log y \quad y < 20$$

$$u_9 = 14.6 \left(8.5 + 5.75 \log \frac{y}{20.8} \right) = 13.6 + 83.9 \log y \quad y < 14$$

$$u_{12} = 8.2 \left(8.5 + 5.75 \log \frac{y}{14} \right) = 15.6 + 47.2 \log y \quad y < 5$$

であり、底面に対する流速分布は

$$u = 9.07 (8.5 - 5.75 \times 0.195 + 5.75 \log z) = 67 + 52 \log z \quad z < 13$$

となる。

図-7 は実測の III_a (粗度が III で水深 13 cm) の流速分布図であり、曲線は y 方向の流速分布図の折れ曲り点から決定した A_1 と A_2 の境界を示している。また図-8 は §4 で述べた計算法と、実験結果から得た水深と、 u_{*2} 、 k_{s2} の関係図 (図-4a, b, c, 図-5) によつて求めた流速分布図で、実測図と計算図の境界線に多少のずれがあるのは、流れが二次元流ではなく、断面内に二次流があることが影響しているのではないかと考えられる。図-9 は深さによる流速分布を比較したもので、両者の適合は、断面分割法による流速分布の推定方法が、非常に有効であることを示している (あるいは正しいことを示している)。

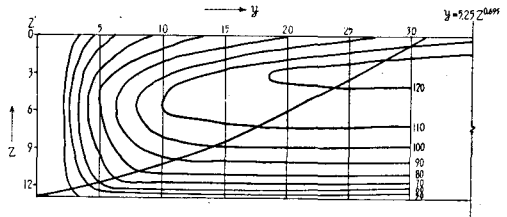


図-8 計算による流速分布と領域の境界線 (III_a の計算値)

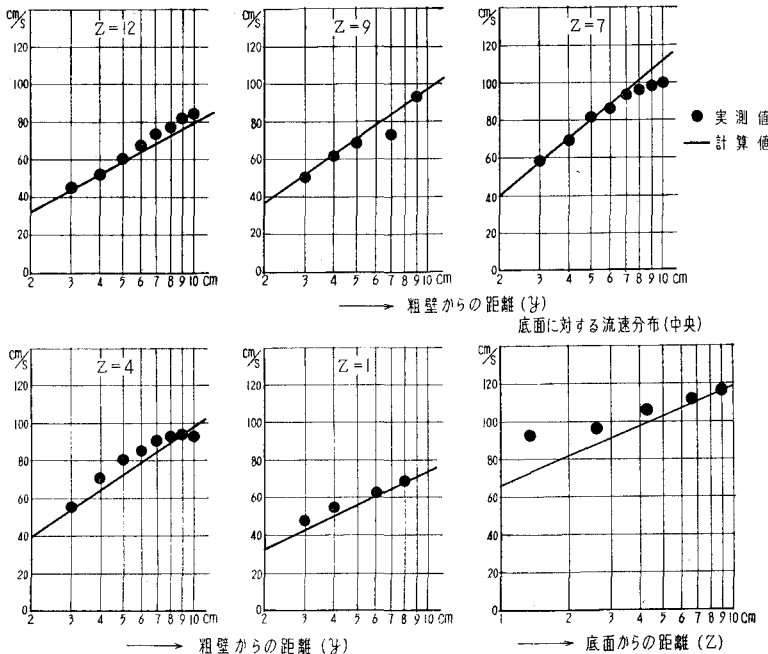


図-9 冬水深における実測値と計算値の y 方向の流速分布

§ 5 種々の護岸についての考察

次のような条件の河川に護岸を施工したときの流速分布を計算し、それぞれの減速効果を考えてみよう。このためには水深ごとの流速を算出して比較すべきだが、紙面の都合上、法面平均の流速分布によつて考察を進めることにする。なお図-10は図-11のように側壁に半球、球、山形鋼で粗度をつけて実験を行なつた Schlichting の結果と、本実験の結果であるが、§ 4 と同じように適用できると仮定する。

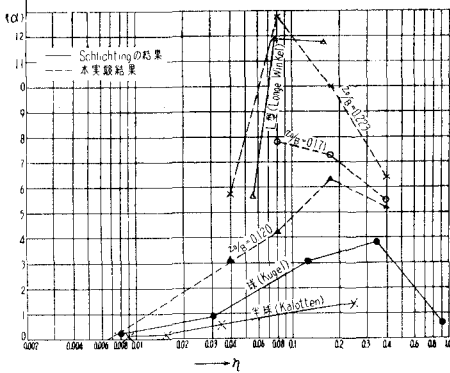


図-10 α と η の関係

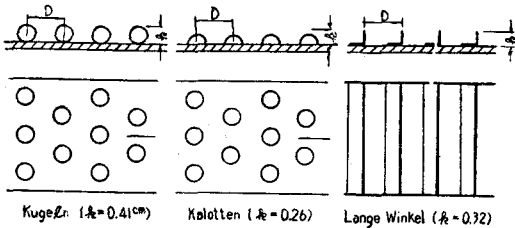


図-11 Schlichting の粗度

条件 流量 $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 水路幅 200 m 水深 2.0 m
水面勾配 $I = \frac{1}{1000}$ 断面は長矩形とする。

i 底面の流速分布

$$\text{マサツ速度 } \bar{u}_{*1} = \sqrt{gRI} = \sqrt{9.8 \frac{200 \times 2}{(200+4)} \times \frac{1}{1000}} = 0.139 \text{ m/s}$$

$$\text{平均流速 } u_m = \frac{Q}{A} = \frac{1000}{200 \times 2} = 2.5 \text{ m/s}$$

$$\text{砂相当粗度 } \log \bar{k}_{s1} = \frac{1}{5.71} \left(6.0 + 5.75 \log R - \frac{u_m}{\bar{u}_{*1}} \right) = -1.79 = -2.21 \quad \bar{k}_{s1} = 0.0162 \text{ m}$$

従つて

$$\begin{aligned} u &= \bar{u}_{*1} (8.5 - 5.75 \log \bar{k}_{s1} + 5.75 \log z) \\ &= 0.139 (8.5 - 5.75 \log 0.0162 + 5.75 \log z) \\ &= 2.61 + 0.785 \log z \end{aligned}$$

ii 護岸のない場合の流速分布

法面の粗度は河床と同じであるから、 $\bar{k}_{s1} = \bar{k}_{s2}$ 従つて

$$M_1 = M_2 = \frac{30}{0.0162} = 1850$$

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{(r+1) M_2 z_0}{(M_1 z_0)^r} - \frac{z_0}{B} = \frac{(r+1)}{3700(r-1)} - \frac{2}{200} \\ &= \frac{(r+1)}{3700(r-1)} - 0.01 \end{aligned}$$

上式から

$$r = 1.07 \quad \beta = \frac{1850r}{1850} = 1850(r-1) = 1.69$$

境界線は

$$y = 1.69 z^{1.07}$$

で表わされる。またマサツ速度 $\bar{u}_{*2}$ は

$$\bar{u}_{*2} = \frac{0.139}{1.07} = 0.130 \text{ m/s}$$

で、流速分布は

$$\begin{aligned} u &= \bar{u}_{*2} (8.5 - 5.75 \log \bar{k}_{s2} + 5.75 \log y) \\ &= 2.44 + 0.746 \log y \end{aligned}$$

となる。

iii 豆板工で法覆した場合の流速分布

図-12 のようにちどりに玉石を埋め、突起は半径 10 cm の半球であると仮定すると、密度は

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

となるから、相当粗度は図-10 の Schlichting の半球の場合を適用して $\alpha = 0.8$ が与えられる。相当粗度は

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

となる。従つて

$$M_2 = \frac{30}{0.08} = 375$$

$$r^2 = \frac{(r+1) 375 \times 2}{3700 r} - 0.01$$

から $r = 0.907$ を得る。境界線は

$$y = 2.43 z^{0.907}$$

で表わされ、マサツ速度は

$$\bar{u}_{*2} = \frac{0.139}{0.907} = 0.153$$

流速分布は

$$u = \bar{u}_{*2} (8.5 - 5.75 \log \bar{k}_{s2} + 5.75 \log y) = 2.46 + 0.88 \log y$$

となる。

iv $\phi 50 \text{ cm}$ の蛇籠で法覆した場合の流速分布

図-13 のように幅 1 割の余裕をみて法覆した場合、密度は $\eta = \frac{0.25}{0.5 \times 1.1} = 0.455$ であつて、図-10 の半球と $z_0/B = 0.120$ の中間の場合を適用すると $\alpha = 2.9$ となる。

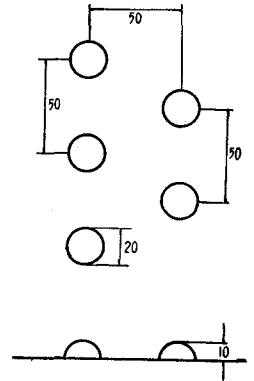


図-12 豆板工法覆の場合 (単位 cm)

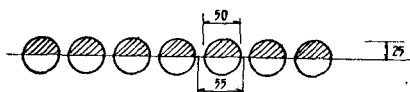


図-13 均一径の蛇籠工
(単位 cm) $\phi = 50$ cm

相当粗度は $\bar{k}_{s2} = 0.25 \times 2.9 = 0.725$ m となるから

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

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

から $r = 0.69$ を得る。

そこで境界線は

$$y = 4.24 z^{0.69}$$

で表わされ、マサツ速度は

$$u_{*2} = \frac{0.139}{0.69} = 0.202 \text{ m/s}$$

流速分布は

$$u = u_{*2} (8.5 - 5.75 \log \bar{k}_{s2} + 5.75 \log y) = 1.88 + 1.16 \log y$$

となる。

v 橋本式 G 型両撓式法覆工を用いた場合

図-14 のような法覆工を施工したとき、粗度の密度は枠の部分に対し

$$\eta_1 = \frac{0.7 \times 0.1}{1.00} = 0.07$$

割栗石部分に対し

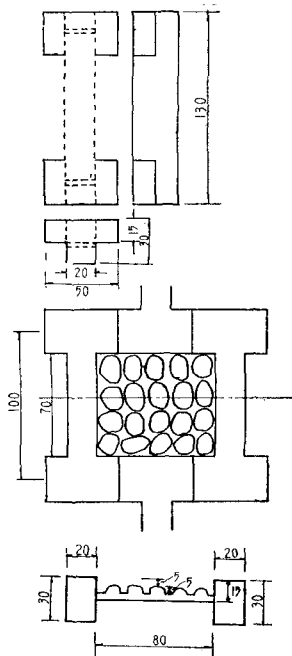


図-14 橋本式 G 型 (単位 cm)
両撓式法覆工 (G) 寸法図

$$\eta_2 = \frac{0.05 \times 0.08 \times 20 \text{ ケ}}{1.00} = 0.08$$

この η_2 に対し、図-10 の半球の場合を適用して、 $\alpha_2 = 0.9$ となるから

$$\bar{k}_{s2.2} = 0.05 \times 0.9 = 0.045$$

これを $k = 0.1$ のものに換算すると

$$\alpha'_2 = \frac{0.045}{0.1} = 0.45$$

となり、これの枠に対する密度は 0.0085 となる。従つて合成された密度は

$$\eta = 0.0085 + 0.07 = 0.0785$$

となる。

ここで 3-4 の ii で述べたように、 $z_0/B = 0.12$ を適用してよいから図-10 より $\alpha = 4.15$ を得る。また粗度は $\bar{k}_{s2} = 0.1 \times 4.15 = 0.415$ となる。

$$\therefore M_1 = 1850 \quad M_2 = \frac{30}{0.415} = 72.3$$

$$r^2 = \frac{(r+1) 72.3 \times 2}{3700r} - 0.01 = \frac{(r+1) 144.6}{3700r} - 0.01$$

から $r = 0.745$ を得る。

従つて境界線は

$$y = \frac{1850^{0.745}}{72.3} z^{0.745} = \frac{272}{72.3} z^{0.745} = 3.76 z^{0.745}$$

で表わされ、マサツ速度は

$$u_{*2} = \frac{0.139}{0.745} = 0.188 \text{ m/s}$$

となり、流速分布は

$$u = u_{*2} (8.5 - 5.75 \log \bar{k}_{s2} + 5.75 \log y) = 2.01 + 1.08 \log y$$

となる。

vi 改良橋本式 G 型両撓式法覆工を用いた場合

蛇籠工は径を増すことにより、豆板工は玉石を大にし密に埋めることによつて、それぞれ相当粗度を増すことができるが限度がある。しかし、橋本式はわずか大きさを変えるだけで相当粗度を大にできる。すなわち図-15 のように枠の内法を 100 cm $\times$ 80 cm とし、枠の上面と割栗石目潰し面との差が 20 cm になるようにすると、密度は

$$\eta_1 = \frac{0.2 \times 1}{1.3 \times 1} = 0.154 \quad \dots\dots\dots (\text{枠の密度})$$

$$\eta_2 = \frac{0.05 \times 0.08 \times 30}{1.3 \times 1.0} = 0.092 \quad \dots\dots\dots (\text{石の密度})$$

$$\alpha_2 = 0.95 \quad \bar{k}_{s2} = 0.05 \times 0.95 = 0.0475$$

これを枠のものに換算すると、 $\alpha = \frac{0.0475}{0.20} = 0.2375$ で $\eta' = 0.008$ になる。従つて合成された密度は

$$\eta = \eta_1 + \eta' = 0.154 + 0.008 = 0.162$$

となるから、v の場合と同様に図-10 から $\alpha = 6.1$ を得る。

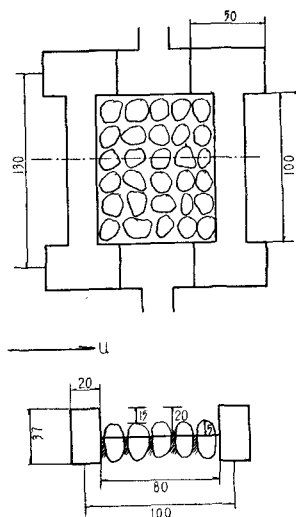


図-15 改良橋本式 G 型 (単位 cm)

これはほとんど極大値である。それ故相当粗度は $\bar{k}_{s2}=6.1 \times 0.2=1.22$ m となる。

そこで

$$M_2 = \frac{30}{1.22} = 24.8 \quad r^2 = \frac{(r+1) 24.8 \times 2}{3700r} - 0.01$$

から $r=0.64$ を得る。

すなわち境界線は

$$y = 2.50 z^{0.64}$$

で表わされ、マサツ速度は

$$u_{*2} = \frac{0.139}{0.64} = 0.217 \text{ m/s}$$

流速分布は

$$u = u_{*2}(8.5 - 5.75 \log \bar{k}_{s2} + 5.75 \log y) = 1.74 + 1.25 \log y$$

となる。

このようにして求めた流速分布を図示したものが、図-16であつて、改良橋本式 G 型の減速効果が最も大きい。蛇籠工も減速効果はかなりのあるが、改良橋本式 G 型と同じ効果を挙げるには径を 85 cm にしなければならない。また豆板工はほとんど減速効果がないから、粗度をつけるため

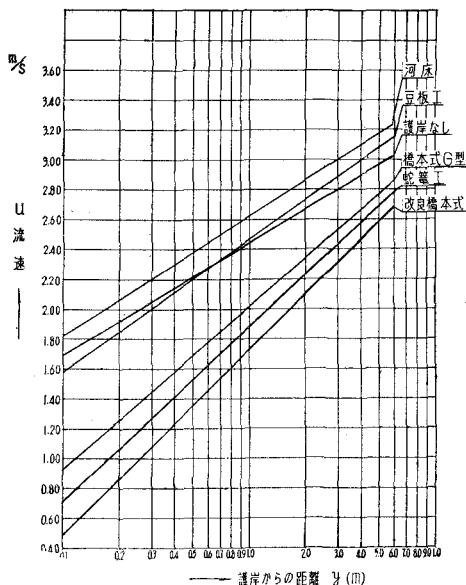


図-16 各種護岸の流速分布

玉石を法面に埋め込むことは水理学的にはあまり意味がないといえる。

参考文献

- 1) Schlichting: Boundary theory Chap. 20.
- 2) Schlichting: Ingenieur-Archiv "Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeits Problem".
- 3) R. Seiferth u. W. Krüger: Hohe Reibungsziffer einer Fernwasserleitung.
- 4) 土木技術資料 1-7: 河道設計法 (4) 一河川の粗度について一
- 5) 土木学会講演集 足立昭平: 開水路における側壁の効果について
- 6) 佐藤清一: 水理学
- 7) 土木学会: 水理公式集
- 8) 本間 仁: 河川工学
- 9) 久宝雅史: 河川工学
- 10) 久宝雅史: 河川工学便覧
- 11) 橋本規明: 新河川工法