

大粒径砂礫の掃流砂量に関する研究

東京工業大学工学部 正会員 吉川秀夫
東京工業大学工学部 正会員 ○福岡捷二
建設省土木研究所 正会員 馬場 享
琉球大学理工学部 正会員 河野二夫

まえがき

実際河川の河床砂および掃流土砂は広い粒度分布をもつ¹⁾。これらのうち比較的小粒径の掃流土砂の流砂量に関する研究は多く、かなりの精度で流砂量の算定が可能である。しかし大粒径砂礫の流砂量の資料は少なく既存の流砂量式の適用性についての検討は筆者らの知る限り存在しないようである。

本文で取扱っている実験は昭和31年から33年までの3年間土木研究所赤羽支所にて行なわれたもので、佐藤一吉川一芦田の研究^{2),3)}の延長上にあるものであった。実験資料は未整理のまま放置されていたが、ここに資料の一部を公開し、若干の検討をくわえた結果を報告する。

研究の目的は

- (1) 大粒径砂礫からなる固定床と移動床上の流れの相当粗度
- (2) 均一大粒径砂礫の掃流砂量
- (3) 混合大粒径砂礫の掃流砂量

を実験的に調べ、本実験より小粒径の河床材料を用いて見出された従来の結果と比較検討することにある。

1. 実験装置

実験水路は、全長114m、水路巾1.76mの滑らかなモルタル仕上げである。河床上に砂礫を所定の勾配に敷き均した。流量測定は上流端の溢流堰によった。流路の70m～90m区間を5m間隔に5断面で水深を測定し、水面勾配、エネルギー勾配を算定した。使用砂礫は粒径1.0cm、3.0cm、5.0cmの3種類の均一粒径砂礫と平均粒径 $d_m = 1.81\text{cm}$ 、標準偏差 $\sigma_g = 1.83$ の混合砂礫の4種類を用いた。混合砂礫の粒度曲線を図-1に示す。

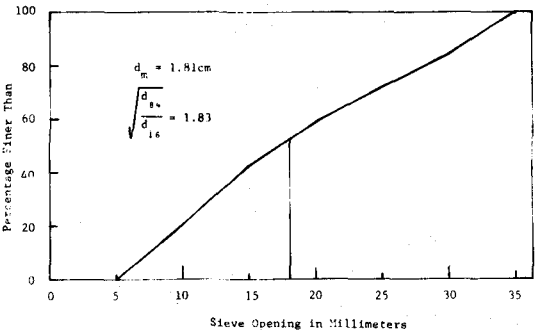


図-1 使用混合粒径砂礫の粒度分布

す。流砂量測定は佐藤一吉川一芦田²⁾が用いたと同じタイプの掃流砂採砂器によった。流砂量は通水中8回測定し、それらの平均値を流砂量とした。

表-1 固定床，移動床上の流れの水力条件

	Fixed Bed				Movable Bed			
d_m (cm)	1.0	3.0	5.0	Non-Uniform Mixture $d_m=1.81$	1.0	3.0	5.0	Non-Uniform Mixture $d_m=1.81$
Number of Data	104	37	31	52	34	17	7	14
Q (m ³ /sec)	0.017~1.63	0.063~1.28	0.068~1.52	0.020~1.62	0.24~1.44	0.46~1.26	1.17~1.50	0.54~1.63
$\bar{u}/u_{*c}$	5.09~13.3	5.62~13.0	3.78~10.6	8.7~13.5	10.4~13.1	8.06~10.0	7.41~9.41	8.37~11.5
R (cm)	2.5~44.4	5.1~31.7	6.1~35.3	3.4~44.7	12.4~44.7	17.8~31.4	29.5~35.3	21.6~44.7
$I_e \times 10^3$	3.6~10.3	7.9~22.2	9.5~25.3	4.0~7.4	4.1~9.5	15.0~19.7	18.2~20.5	5.8~7.3
q_B (gr/cm.sec)	0	0	0	0	0.012~2.90	0.21~13.6	1.69~11.2	0.023~4.37

2. 相当粗度

水流の速度分布が対数分布で表わされる時、相当粗度 k_s は次式で定義される。

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log \frac{R}{k_s} \quad (1)$$

均一砂粒を壁面にはりつけた Nikuradse による管内粗面乱流での実験は周知の $k_s = d$ の関係が見出されている。一方移動床上の流れでは一般には砂粒自身による摩擦抵抗のほかに砂連による形状抵抗の影響がくわり、 k_s の値は粒径よりもはるかに大きな値をとる⁴⁾。

芦田⁵⁾は、移動床平坦河床に関する従来の実験結果を整理して、相当粗度と平均粒径の間に次式の関係を見出した。

$$k_s = (0.5 \sim 4.0) d_m \quad (2)$$

ここに d_m は河床砂礫の平均粒径である。河床が平らな固定床と平坦河床状態にある移動床の相当粗度の大きさを見積る目的で表-1に示されている範囲の水理量の実験を行なった。水流の流速分布は固定床、移動床とも対数分布則に従がい、混合粒径砂礫に関する実験の一部を除き、認め得る砂連は発生しなかった。図-2, 3, 4は実測水理量を用いて(1)式から相当粗度と平均粒径の比の度数分布を図示したものである。資料数が粒径ごとに異なるために分布図の信頼度は一律ではないが、次のことがいえるであろう。砂礫が均一、不均一、河床が固定床、移動床に関わらず実験データは

$$k_s = (1.0 \sim 4.0) d_m \quad (3)$$

の範囲にあり、均一粒径砂では最大頻度を示す k_s/d_m の値は固定床では2.0、移動床では2.5である。一方混合粒径砂ではともに $k_s/d_m = 2.5$ で最大頻度を示す。しかし移動床では k_s/d_m のとる範囲は砂礫移動のために固定床に比してやや広くなる。

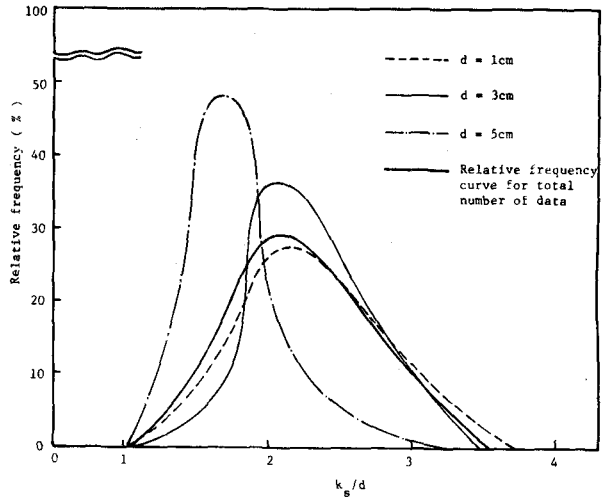


図-2 均一砂礫固定床上の流れの相当粗度の度数分布

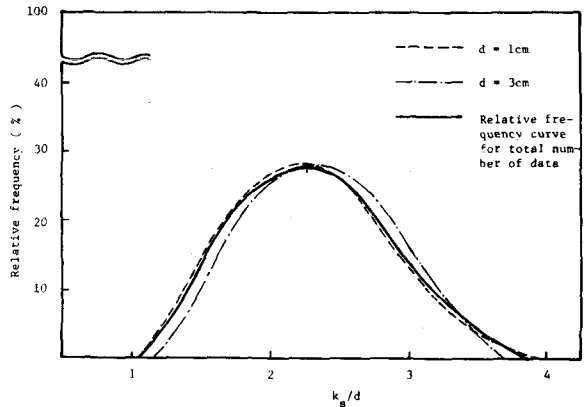


図-3 均一砂礫移動床上の流れの相当粗度の度数分布

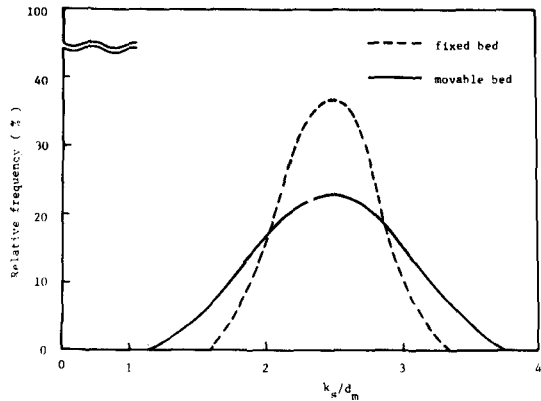


図-4 混合砂礫河床上の流れの相当粗度の度数分布

表-2 大粒径砂礫の掃流実験資料のまとめ

	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7	8
No	d (cm)	Q (m ³ /sec)	h (m)	R (m)	I _e (gr/cm.sec)	q _B (gr/cm.sec)	τ_c/τ	n	No	d (cm)	Q (m ³ /sec)	h (m)	R (m)	I _e (gr/cm.sec)	q _B (gr/cm.sec)	τ_c/τ	n
1	1.0	0.313	0.151	0.144	0.00899	0.403	0.637	0.0222	37	1.81	0.550	0.270	0.251	0.00545	0.054	1.092	0.0254
2	1.0	0.346	0.159	0.150	0.00887	0.621	0.621	0.0216	38	1.81	0.610	0.277	0.263	0.00550	0.059	1.132	0.0244
3	1.0	0.274	0.139	0.132	0.00894	0.204	0.695	0.0220	39	1.81	0.540	0.231	0.216	0.00700	0.023	0.988	0.0232
4	1.0	0.286	0.143	0.136	0.00876	0.252	0.689	0.0220	40	1.81	1.080	0.378	0.342	0.00670	0.032	0.652	0.0250
5	1.0	0.242	0.129	0.123	0.00865	0.103	0.770	0.0218	41	1.81	1.046	0.381	0.345	0.00731	1.689	0.686	0.0250
6	1.0	0.407	0.178	0.167	0.00833	0.868	0.591	0.0214	42	1.81	1.039	0.361	0.360	0.00640	1.741	0.643	0.0252
7	1.0	0.294	0.144	0.137	0.00953	0.555	0.629	0.0226	43	1.81	0.627	0.316	0.296	0.00585	0.212	0.860	0.0303
8	1.0	0.626	0.248	0.230	0.00812	1.428	0.440	0.0238	44	1.81	0.528	0.238	0.223	0.00699	0.079	0.957	0.0245
9	1.0	0.303	0.141	0.133	0.00859	0.498	0.718	0.0200	45	1.81	0.616	0.278	0.258	0.00610	0.414	0.947	0.0253
10	1.0	0.383	0.173	0.162	0.00848	1.131	0.597	0.0218	46	1.81	0.908	0.324	0.282	0.00750	2.034	0.706	0.0234
11	1.0	0.356	0.158	0.149	0.00900	1.071	0.616	0.0207	47	1.81	1.350	0.453	0.407	0.00720	2.544	0.510	0.0276
12	1.0	0.241	0.123	0.117	0.00954	0.121	0.735	0.0211	48	1.81	1.633	0.502	0.447	0.00746	4.070	0.448	0.0271
13	1.0	0.285	0.137	0.131	0.00953	0.342	0.660	0.0214	49	3.0	0.549	0.193	0.185	0.0196	0.902	0.683	0.0282
14	1.0	0.395	0.220	0.205	0.00499	0.050	0.801	0.0242	50	3.0	0.515	0.186	0.178	0.0173	0.786	0.802	0.0266
15	1.0	0.484	0.230	0.212	0.00520	0.068	0.747	0.0215	51	3.0	0.457	0.170	0.163	0.0183	0.210	0.726	0.0247
16	1.0	0.629	0.273	0.236	0.00440	0.193	0.794	0.0194	52	3.0	0.572	0.198	0.189	0.0190	0.943	0.688	0.0278
17	1.0	0.569	0.261	0.238	0.00470	0.135	0.735	0.0214	53	3.0	0.614	0.206	0.196	0.0181	1.226	0.696	0.0270
18	1.0	0.635	0.387	0.257	0.00410	0.150	0.782	0.0206	54	3.0	0.635	0.216	0.205	0.0160	1.447	0.753	0.0265
19	1.0	0.779	0.320	0.284	0.00418	0.615	0.694	0.0203	55	3.0	0.718	0.228	0.214	0.0159	1.835	0.727	0.0272
20	1.0	0.889	0.351	0.309	0.00413	0.711	0.642	0.0205	56	3.0	0.745	0.244	0.230	0.0165	2.014	0.651	0.0279
21	1.0	1.057	0.393	0.341	0.00408	0.997	0.592	0.0206	57	3.0	0.842	0.266	0.250	0.0163	3.344	0.607	0.0282
22	1.0	1.087	0.400	0.344	0.00412	1.075	0.582	0.0203	58	3.0	1.119	0.331	0.310	0.0153	6.456	0.521	0.0296
23	1.0	1.202	0.444	0.388	0.00445	1.632	0.478	0.0230	59	3.0	1.136	0.340	0.312	0.0150	8.889	0.546	0.0290
24	1.0	1.221	0.447	0.389	0.00425	1.742	0.499	0.0224	60	3.0	1.199	0.328	0.302	0.0159	13.594	0.516	0.0292
25	1.0	1.443	0.505	0.453	0.00453	2.903	0.402	0.0245	61	3.0	0.754	0.245	0.228	0.0162	3.895	0.515	0.0271
26	1.0	0.997	0.382	0.345	0.00440	0.776	0.543	0.0221	62	3.0	1.015	0.302	0.282	0.0158	5.415	0.554	0.0285
27	1.0	0.400	0.210	0.193	0.00460	0.012	0.926	0.0212	63	3.0	1.265	0.357	0.314	0.0160	9.960	0.492	0.0290
28	1.0	0.499	0.236	0.215	0.00500	0.088	0.764	0.0208	64	3.0	1.113	0.308	0.289	0.0158	6.720	0.540	0.0269
29	1.0	0.422	0.221	0.205	0.00465	0.030	0.865	0.0220	65	3.0	1.260	0.335	0.308	0.0151	8.476	0.531	0.0263
30	1.0	0.621	0.274	0.248	0.00450	0.124	0.738	0.0207	66	5.0	1.172	0.348	0.332	0.0204	4.020	0.608	0.0358
31	1.0	0.666	0.305	0.278	0.00425	0.386	0.697	0.0225	67	5.0	1.406	0.376	0.353	0.0195	5.917	0.599	0.0328
32	1.0	0.762	0.323	0.289	0.00420	0.438	0.678	0.0212	68	5.0	1.421	0.366	0.344	0.0237	11.175	0.505	0.0345
33	1.0	0.896	0.369	0.325	0.00440	0.700	0.667	0.0225	69	5.0	1.520	0.361	0.333	0.0200	6.610	0.619	0.0285
34	1.0	0.473	0.223	0.205	0.00490	0.088	0.821	0.0203	70	5.0	1.378	0.353	0.329	0.0200	4.590	0.627	0.0305
35	1.81	0.800	0.320	0.293	0.00649	0.141	0.785	0.0251	71	5.0	1.231	0.319	0.295	0.0187	1.685	0.746	0.0276
36	1.81	0.800	0.316	0.287	0.00602	0.076	0.864	0.0235	72	5.0	1.235	0.332	0.309	0.0182	4.119	0.732	0.0294

注 1. 実験水路の水路巾は 1.76 m である。

注 2. 径深 R は Einstein の方法で側壁の影響を補正したものである。

注 3. I_e は水流のエネルギー勾配である。

注 4. 限界掃流力 τ_c は岩垣公式⁶⁾によって求めた。

注 5. 実験番号 No. 35~No. 48 は混合粒径砂礫 ($d_m = 1.81$ cm) の掃流砂実験である。

3. 均一大粒径砂礫の掃流砂量

表-2は掃流砂量実験の結果のまとめである。大きな流量と掃流力にもかかわらず、掃流砂の粒径が大きいために掃流力は最大でも限界掃流力の2倍程度で実験は従来の流砂実験より無次元掃流力の小さいところで行なわれた。砂粒運動をモデル化する時砂粒に作用する流体力が揚力であるか抗力であるかによって定式化に違いがあるが提案されている流砂量式の大部分は

$$q_B = \alpha \tau_0 u_* \quad (4)$$

の形で表現できる。ここに q_B は単位巾、単位時間あたり重量単位の掃流砂量 (gr/cm, sec) である。本実験のように掃流砂が大礫の場合には砂礫の運動を起す流体力は抗力であり、しかも掃流力は最大でも限界掃流力の2倍付近で起っているため流砂量は無次元形で

$$\frac{q_B}{\sigma u_* d} = \alpha' \tau_* \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \quad (5)$$

の形で表わし得ることが期待できる。ここに σ は砂礫の密度、

$$\tau_* = u_*^2 / (\sigma / \rho - 1) g d, \tau_{*c} = u_{*c}^2 / (\sigma / \rho - 1) g d.$$

佐藤-吉川-芦田によれば²⁾ α' は河床粗度に関するパラメーターである。図-5は均一粒径の実験データを(5)式の関係でプロットしたものである。限界掃流力付近では流砂量測定に誤差が入りやすいことを考慮に入れると実測値はほぼ一本の直線で近似でき、この場合 α' は定数と考えても良いであろう。これは本実験の場合には図-3から明らかなように k_s/d が2.5付近に集中しており、流砂量が砂連によって影響を受けなかったためである。図-6は水理公式集(1971年版)に集録されている掃流砂量式のうち本実験データに最も近い傾向を示す佐藤-吉川-芦田式との比較を示す。同式は揚圧力の変動により粒子に効果的に与える力積は重力が鉛直下方に与える力積に等しいとして導かれた。大礫の場合には揚圧力よりもセン断力的な力によって輸送されると考えるのが適切であるが、揚圧力とセン断力はともに河床付近の流速分布に関係し、両者の間に関係があることから同式を大礫の輸送まで拡張することは問題なからう。実際、佐藤-吉川-芦田式は(4)式に類似の形で与えられている。大粒径砂礫河床の場合には、掃流力が限界掃流力の数倍にまで達することは河川の上流部を除いて比較的まれであり、したがって図-5と図-6の比較からも明らかなように大礫の掃流輸送に対しては(5)式のように掃流力を有効掃流力 ($\tau - \tau_c$) に置き換えたほうが掃流力の変化にともなう流砂量の変化を明確に表現し得るようである。

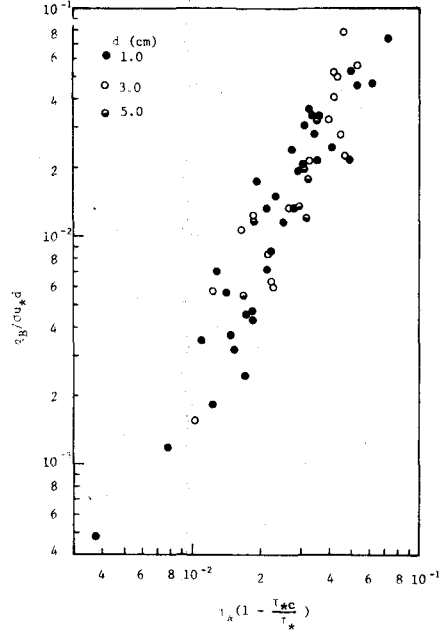


図-5 均一大粒径砂礫の掃流砂量

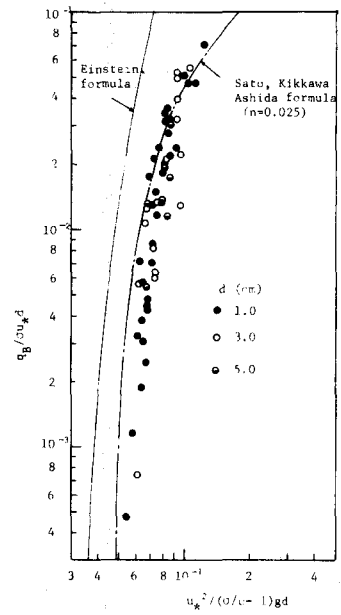


図-6 佐藤-吉川-芦田式と実測流砂量の比較

4. 混合大粒径砂礫の掃流砂量

混合粒径砂の流砂量に関してEgiazaroff⁷⁾, 浅田, 石川⁸⁾, 平野⁹⁾, 芦田, 道上¹⁰⁾らの研究がある。平野は粒径別に適切な限界掃流力を与えることができれば均一粒径砂に対する流砂量式から粒径別流砂量が計算可能であることを実験によって示した。芦田, 道上はEgiazaroffの粒径別限界掃流力式を一部修正して, 粒径別流砂量の算定式を提案し実験値とかなり良い一致をみている。ここでは図-1に示されているような大礫からなる混合粒径砂についても従来の研究と同様な結果が得られるかどうかを調べてみる。図-7は(4)式の関係が粒径別流砂量についても成立する

$$\frac{q_{B_i}}{f_0(d_i) \sigma u_* d_i} \propto \tau_{*i} \quad (6)$$

と仮定して粒径別流砂量と掃流力の関係を調べたものである。

ここに

- d_i : 与えられた粒径範囲の平均粒径,
- q_{B_i} : 粒径 d_i の砂礫の単位巾あたりの掃流砂量,
- $f_0(d_i)$: 粒径 d_i の砂礫の河床中で占める割合,
- $\tau_{*i} = u_*^2 / (\sigma / \rho - 1) g d_i$.

$d_i/d_m \approx 1.0$ の時流砂量と掃流力の関係は, 均一粒径砂に対する佐藤一吉川一芦田式とほぼ一致している。 d_i/d_m が1.0より小さいとき, 均一粒径砂より流砂量は小さくなり, 掃流力と流砂量の関係は平野, 芦田, 道上の実験値とほぼ似た変化を示した。一方 d_i/d_m が1.0より大きいとき, 均一粒径砂の流砂量より大きくなるが, 平野らの実験値より少なめの流砂量を与えた。これは混合砂礫の流砂量が粒度分布に強く影響され, 特に大きな砂礫が河床にどのような割合で存在するかが重要なためである。混合砂礫の流砂に特有な遮蔽効果は平野, 芦田, 道上らが指摘しているように各粒径ごとの限界掃流力が均一砂のそれと異なることによって生じる。

この事を別の表現をすれば, 大礫に働く実質セン断力 τ_e が河床に働く平均セン断力 τ よりも大きく, 小礫に対しては τ_e が τ より小さいことを意味している。原則的には, 各粒径に作用している実質セン断力が推算できれば混合砂礫の流砂量は均一砂礫の場合と同様にとり扱いが可能である。この仮説のもとに, 平均粒径 ($d_i/d_m = 1.0$) の砂礫に及ぼす実質セン断力が河床に働く平均セン断力に等しく, 均一粒径砂と同様な関係が成立する(図-7)ものと仮定して, 図-7から求めた粒径別の実質セン断力(図-8に示す。本実験条件に対しては $d_i/d_m = 1.75$ の砂礫に働く実質セン断力は平均セン断力の50%増し, 一方 $d_i/d_m = 0.4$ に対しては45%減少となる。実験が限界掃流力状態に近い条件で行なわれたこと, 流砂量が粒度分布に強い関係があることなどから図-8の関係は実質セン断力の概略値を与えるにすぎない。混合砂礫の実質セン断力に関して土屋, 山本¹¹⁾は大小2粒径からなる単純な河床を想定し, 実質セン断力を礫の相対密度, 相当粗度, 突出高の関数として求める試みをしており, 1つの方向を示すものとして興味深い。

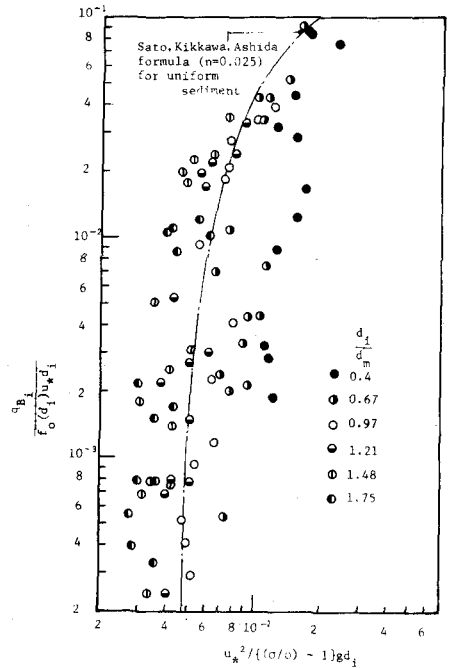


図-7 混合粒径砂礫の粒径別流砂量

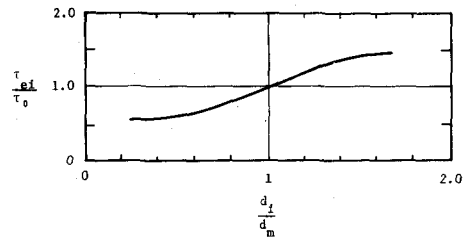


図-8 混合砂礫の粒径別実質セン断力

5. 混合砂礫上の流れの粗度係数

表-2中に移動床上の流れのマニングの粗度係数が与えられている。混合砂礫床のごく一部を除き砂礫の形成は存在しなかったために抵抗の大部分は砂礫自身の抵抗に起因している。したがって当然のことながら均一粒径砂礫上の流れでは粒径が大きくなるにつれて粗度係数も増加しており粗度係数の平均値は粒径の小さいほうからそれぞれ $n=0.0216, 0.0277, 0.0313$ である。一方、平均粒径 1.81cm、最大粒径 3.2 cm の混合砂礫上の流れの粗度係数の平均値は $n=0.0255$ である。この値は粒径 3.0 cm の単一粒径上の流れの粗度係数に近いところから混合砂礫上の流れの粗度係数は平均粒径より大きな砂礫の抵抗で決っており、平均粒径より大きい粒度分布が重要な役割を果たしていることが知られる。河床砂礫が移動しない固定床上の流れでも、同様な結論が見出された。

6. 結 語

大粒径砂礫からなる移動床上の流れの抵抗および土砂輸送に焦点をあて検討した結果、大礫上の流れの特性がかなり明確化し、今回の実験に用いた粒径より小さい範囲の流送土砂について見出されていた知識が大粒径砂礫の輸送にも適用可能であることが明らかになった。

終りに膨大な実験データの収集にあたられた建設省土木研究所、赤羽支所の方々、資料整理に多大な労を提供された東京工業大学土木工学科技官 佐藤郁太郎氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所 (1971), 建設省流砂観測資料集, 土木研究所資料, 第 625 号
- 2) 佐藤清一, 吉川秀夫, 芦田和男 (1957), 河床砂礫の掃流運搬に関する研究(I), 建設省土木研究所報告, 第 98 号
- 3) 佐藤清一, 吉川秀夫, 芦田和男 (1959), 河川の土砂流送に関する研究, 建設省土木研究所報告, 第 101 号
- 4) 吉川秀夫 (1966), 河川工学, 浅倉書店
- 5) 芦田和男 (1959), 河道の設計法 (4) - 河川の粗度について - 土木技術資料
- 6) 岩垣雄一 (1956), 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 41 号
- 7) Egiazaroff, I. V. (1965), Calculation of Nonuniform Sediment Concentrations, Jour. of Hydraulics Div. Proc. ASCE. Hy. 4.
- 8) 浅田 宏, 石川晴雄 (1966), 混合砂礫の掃流限界と掃流砂量式, 電力中央研究所技術報告, No. 68045
- 9) 平野宗夫 (1970), 貯水池下流の河床低下と Armouring 現象について, 第 14 回水理講演会講演集
- 10) 芦田和男, 道上正規 (1972), 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 206 号
- 11) 土屋昭彦, 山本晃一 (1971), 混合粒径河床の土砂移動 (二礫混合の場合), 第 15 回水理講演会講演集