

# 局所洗掘に及ぼす混合砂礫の効果について

中川 博次・鈴木 幸一

## ARMOURING EFFECT ON LOCAL SCOUR AROUND BRIDGE PIERS

By *Hiroji* NAKAGAWA, and *Koichi* SUZUKI

### Synopsis

In this paper, effects of sand mixture on local scour around a circular cylindrical pier are investigated. By making up a simple model for calculating the bed shear stress on the side of the pier and by using the critical shear stress of mixture given by Gessler, the final scour depth and grain size distribution curve on the armour coat formed on a stabilized bed are calculated. And it is shown that its results are in good agreement with the experimental results.

### 1. 緒 言

河川において、土砂輸送能力が上流からの土砂流入量を上回る場合河床低下が生じる。ダム下流域や橋脚周辺部における局所的河床変動がその代表的なものである。このような局所的河床低下に関する解析的研究は、個々の水理構造物について流れと流砂との相互関係を考慮して数多くなされているが、主に均一砂に対するものであり、混合砂については一次元的に扱えるダムの下流での河床低下の問題を想定した若干の研究<sup>1),2),3)</sup>があるにすぎず、流れが三次元的である河川構造物周辺での局所洗掘に対する混合砂礫の効果等についてはほとんど研究されていない。

一般に、上流からの土砂供給がない場合、掃流力が大きく混合砂礫の最大のものまでが動かされるような状態では、砂礫の混合効果は認められず、河床は掃流力が減少する方向にその形態を変化させる (*rotational degradation*)。一方、掃流力が小さく最大粒径の砂礫が動かないような状態では、細砂のみが流送され、河床低下は高々粒径程度で停止する (*parallel degradation*)。橋脚周辺部における局所洗掘について考えるならば、河床全体の砂礫が移動しているいわゆる *scour with continuous sediment motion* の状態や、上流から土砂供給のないいわゆる *clear water scour* の初期の状態では、混合砂の場合でも掃流力に対して河床は形状を変化させて対抗する *rotational degradation* が生じる。しかし、*clear water scour* では洗掘が進行してゆき、最大粒径の砂礫が移動しないほどの掃流力になると、掃流力に対しては形状の変化ではなく砂礫の粒度構成の変化 (粗粒化) によって対抗する *parallel degradation* となる。

本研究では、この橋脚周辺部における *clear water scour* に及ぼす混合砂礫の効果について考察するが、円柱側面での掃流力を流れに関する単純なモデルによって求め、Gessler によって提案された混合砂礫の限界掃流力を用いて最終的な洗掘深および橋脚周辺部での砂の粒度構成について考察を加えるとともに実験によって検証する。

### 2. 実験結果とその考察

#### 2.1 実験装置、方法および実験条件

実験は Fig. 1 に示すように、全長約20mで、幅1.5m、深さ0.45m の長方形断面をもつ鋼製水路で行なわ

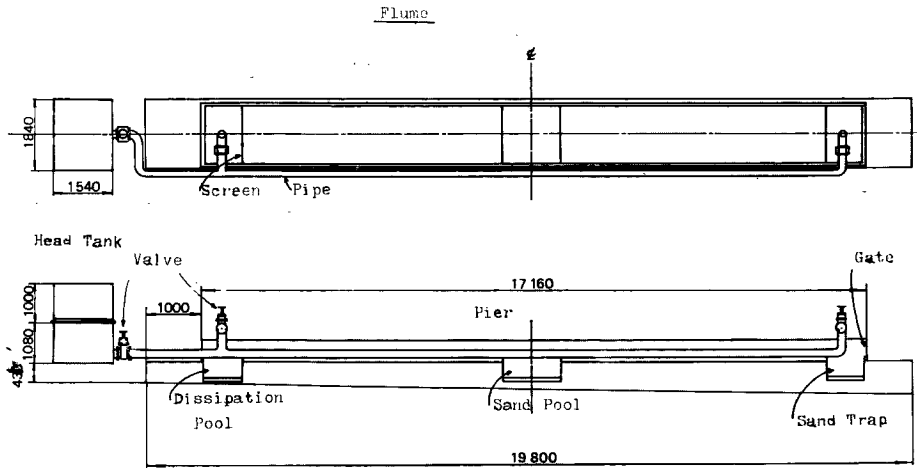


Fig. 1 Schematic figure of experimental flume.

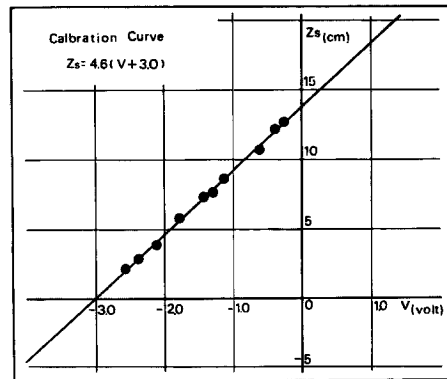


Fig. 2 Calibration curve of a supersonic profile indicator.

れた。水路中央部に  $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 0.5\text{m}$  の橋脚設置場所としての砂箱が設けてある。clear water scour の実験では全河床を移動床にする必要はなく、この砂箱部のみが移動床となっており、それより上下流 3m の区間では水路床に砂をニス付けし、粗度の変化に対応した流れの遷移区間を設けた。河床高測定は小型超音波測深器を用いて行なわれたが、測深器は前後左右に自由に移動可能な台車に取り付けてあり、ごく短時間に任意点の河床高が測定できる。この超音波測深器は、ロッド下端から超音波を発振し、ロッド下端と砂面との距離を一定に保つようにサーボモータの作動によりロッドが上下する。このサーボ機構によって分解能が  $0.1\text{mm}$  と高精度となっている。この上下した量は電圧で表示され、電圧と洗掘深との関係は Fig. 2 に示すように、本実験で測定する洗掘深の範囲内では非常によい線型関係が認められた。

実験条件は、Table 1 に示すとおりである。直径  $D$  が  $20\text{cm}$  の円柱を用い、水深  $h_0$  を  $12.0\text{cm}$ ,  $10.0\text{cm}$ ,  $8.0\text{cm}$  の 3 通り変化させ、それぞれに対して Fig. 3 に示すような粒径加積曲線を有する 4 種類の砂を用いた実験が行なわれた。これらの砂は中央粒径をほぼ等しくし、粒度分布が異なるよう、予めふるい分けした砂を適

Table 1. Extent of experiment (mixture).

Run No.	D(cm)	i	ho(cm)	uo(cm/s)		Sand	
						d50(cm)	d84/d16
1	20	1/1000	12.0	40.1	A	0.10	1.43
2					B	0.12	1.54
3					C	0.12	2.77
4			10.0	33.3	A	0.10	1.43
5					B	0.12	1.54
6					C	0.12	2.77
7			8.0	26.7	A	0.10	1.43
8					B	0.12	1.54
9					C	0.12	2.77
10			10.0	33.3	D	0.10	1.61
11			8.0	26.7	D	0.10	1.61

Table 2. Extent of experiment (uniform sand).

Run No.	D(cm)	ho(cm)	uo(cm/s)	d50(cm)
1	14.0	9.6	37.0	0.193
2		11.6	28.3	
3	8.9	8.7	40.2	
4		5.8	28.3	
5	5.9	10.1	32.5	
6		6.5	24.7	

当な重量比で混ぜ合わせて作られた。

実験方法としては、移動床の部分が通水直後の大きな水面勾配によって洗掘されないように、通水後定常状態が得られるまで押え板で押え、定常状態になると河床を乱さないように押え板を取りはずし、この時の時間を  $t=0$  とした。Run 1~11の全ての実験について、橋脚側面の部分の洗掘深の時間的変化を測定し、Run 1, 4, 7を除く他の実験は洗掘が停止した後の粒度分布を測定するため Fig. 6 の領域(A), (B)および(C)で採砂した。Run 5 および 6 については粒度分布の時間的変化をみるため、通水後 5 分、10分、20分、30分、60分 および 120分 (ただし、Run 6 の場合は90分) に流れを止めて採砂した。採砂の際には、できるだけ河床表層から粒径程度の厚さの砂を採るように心掛けた。採砂は乾燥器によって乾燥した後、十分時間をかけてふるいわけしたが、ふるう前とふるった後での重量の誤差が5%以内となるよう注意した。なお、均一砂に関する実験条件は Table 2 に示すとおりである。

### 2.2 洗掘深の時間的変化特性

Fig. 4 (a), (b), (c) および (d)は、均一砂に近い砂と混合特性の大きい砂とで洗掘深の時間変化特性がどのように異なるかに注目して、円柱側面での洗掘深の時間的変化を測定した結果である。図から認められるように、洗掘初期の掃流力が円柱側面で限界掃流力より十分大きければ、洗掘深  $z_s$  は初期において時間  $t$  と、ほぼ  $z_s \sim t^n$  ( $n$ :定数)

の関係がある。しかし、均一砂に近い砂 A (Fig. 4 (a)) と混合度の高い砂 C (Fig. 4 (c)) の場合とを比較すると、砂の中央粒径  $d_{50}$  がほとんど等しいにもかかわらず、砂 A ではいつまでも洗掘が進行するのに対し、

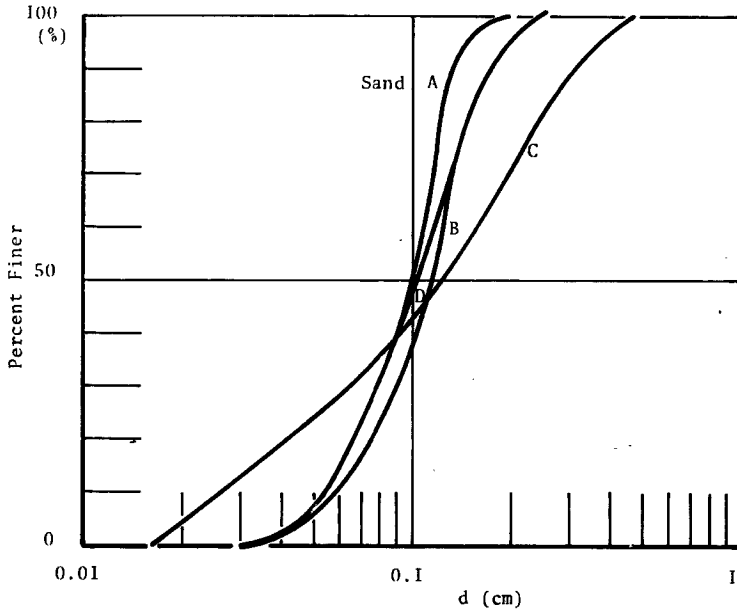


Fig. 3 Particle-size accumulation curves of bed material.

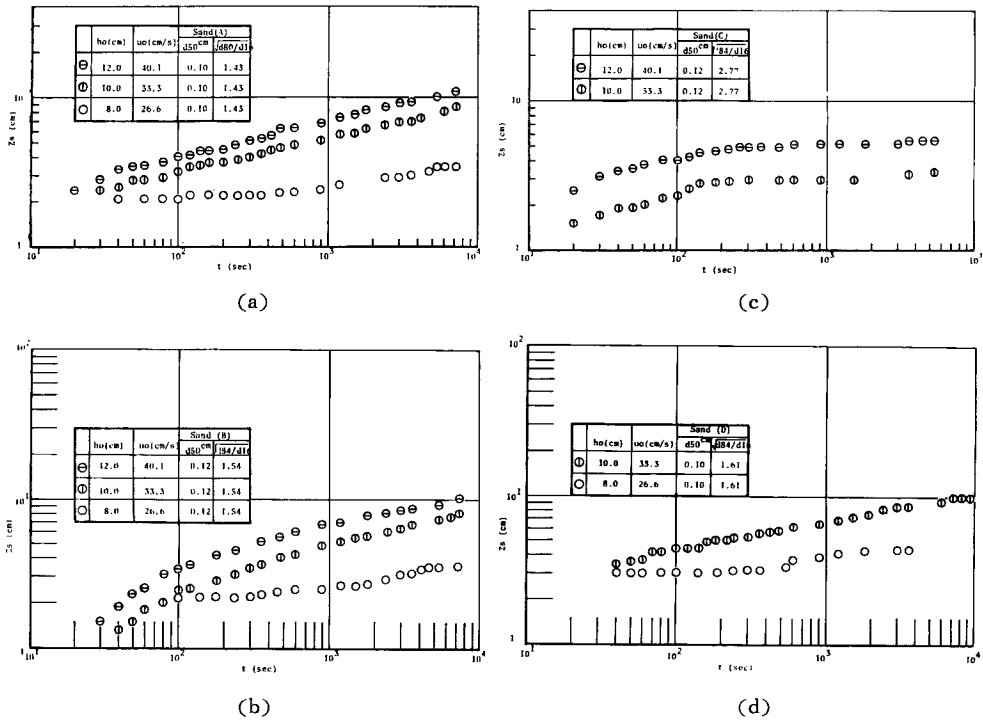
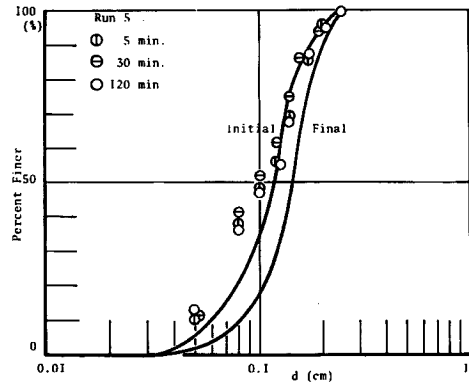


Fig. 4 Variation of scour depth  $z_s$  with time  $t$ .

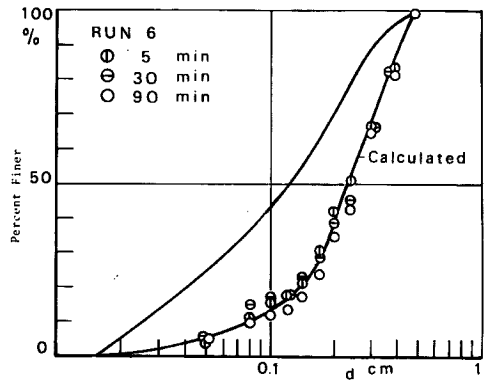
砂Cでは途中で突然洗掘が停止してしまう。しかも、洗掘が停止する直前までは砂Aの場合とほぼ同じ洗掘特性を示している。すなわち、混合砂においては、最大粒径程度の砂が移動しなくなる掃流力になるまでは混合効果はなく均一砂の洗掘特性とほぼ同一であるが、それ以後は河床材の粒度構成の変化によって流れに対抗し、河床低下が停止するものと予想される。

2.3 河床材の粒度分布

Fig. 5 (a) および(b)は、それぞれ Fig. 4 (b) および (c) に対応する円柱側面の砂の粒度分布の時間的変化を求めたものである。Fig. 4 (b) と Fig. 5 (a) とからわかるように、洗掘が依然進行している段階では、砂の粒度構成は洗掘初期のものと全く変化していない。一方、Run 6 の結果である Fig. 4 (c) と Fig. 5 (b) とをみると、洗掘が停止した状態では砂の粒度構成が大きく変化(粗粒化)していることが認められる。河床材が混合砂の場合の洗掘後の円柱周辺部における砂の粒度構成を模式的に描けば Fig. 6 のようである。洗掘孔形状の詳細については前報<sup>4)</sup>で既に述べたように、円柱ごく近傍が平坦な洗掘域(領域A)となっており、その外側がほぼ砂の水中安息角に等しい傾きをもつ斜面を形成している。Fig. 5 (b) における砂の粒度分布は領域(A)での砂についてのものである。領域(A)を除いて円柱上流側の砂の粒度構成はほとんど変化しないが、下流側堆積域(領域(B), (C))においては、大きな変化が認めら



(a)



(d)

Fig. 5 Variation of particle-size accumulation curves of bed material (Run 5, Run 6).

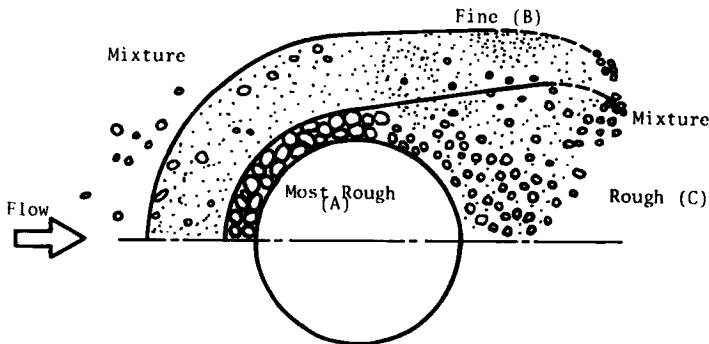


Fig. 6 Schematic figure of sorting of bed material around a circular cylindrical pier.

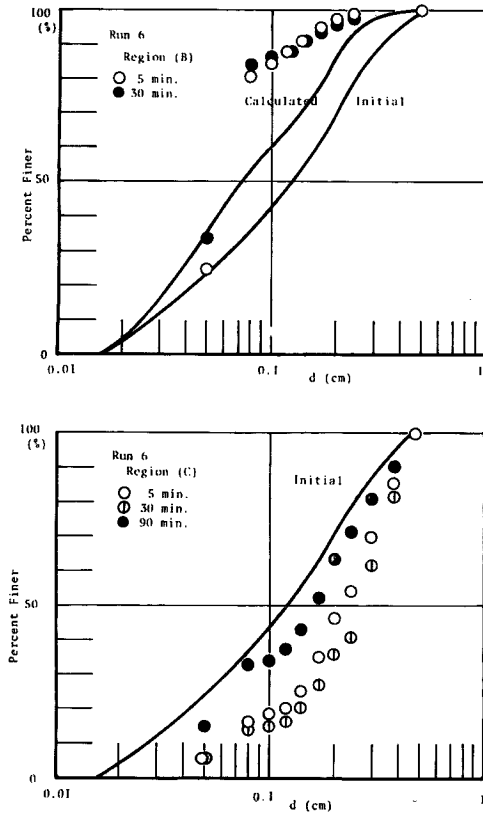


Fig. 7 Particle-size accumulation curves of eroded material at the regions (B) and (C) (Run 6).

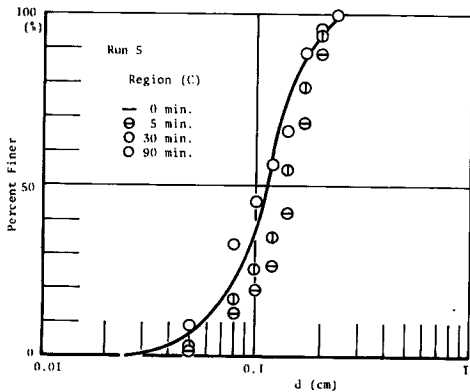


Fig. 8 Particle-size accumulation curves of eroded material at the region (C) (Run 5).

れる。すなわち、領域(B)、(C)の砂は領域(A)からの流出砂であるが、領域(B)では非常に細かく、領域(C)では比較的粗くなるように領域(A)からの移動中に sorting されている。Fig. 7 (a) および (b) は、それぞれ Run 6 での領域(B)および(C)での河床砂の粒度分布を示したものである。領域(B)への堆積砂は非常に細かく、領域(C)の堆積砂は最初の粒度分布から細かいものと特に大きい砂とがなくなったような分布を示している。しかし、領域(C)の砂の粒度分布の時間的変化をみると、長時間経つと細かい砂も増してきている。このような sorting 現象の原因としては、円柱周辺部における二次流が考えられる。すなわち、円柱側面付近の流れは、河床面ごく近傍では円柱に沿う方向に流れているが、鉛直方向に上がるほど流速が大きく遠心力が大きくなるため流れは外向きになっている。一方、洗掘域からの流出砂については、非常に細かい砂は円柱側面での大きな掃流力によって比較的高く舞い上がるためその位置での外向きの流れによって領域(B)の方へ運ばれるが、比較的大きな流出砂は河床面を転動するため河床近傍の流れの方向に移動し領域(C)に堆積する。しかし、洗掘が進行し円柱側面での掃流力が小さくなると細砂も舞い上がりにくくなるため領域(C)に運ばれるものと考えられる。なお、Fig. 8 は、Run 5 の場合の領域(C)への流出砂の粒度分布であるが、洗掘がなお進行している間は、流出砂の粒度構成もほとんど変化しないことがわかる。

### 3. 最終洗掘深に関する考察

#### 3.1 掃流力のモデル化

円柱周辺部における洗掘は先に述べたように、その周辺底部における掃流力の増加によって Fig. 9 の斜線で示す部分でまず生じる。この掃流力の増加は、流れの集中、剥離渦等の作用によるものであるが、この斜線部の河床低下のためその外側の領域は砂の水中安息角  $\phi$  で規定されるような斜面を形成する。実験観察の結果から Fig. 9 の  $k_1 D$  は円周に沿って一定であり、しかも  $k_1$  は流れの状態によってはほとんど左右されないことがわかった。clear water scour ではこの斜面の外縁からの砂の供給は洗掘孔に対して無い。また、洗掘孔からの流出砂量は円柱側面で捉えられるから、この洗掘孔の体積  $V$  の時間的変化は OS 断面での流砂量  $q_s$  の合計とな

る。すなわち、Fig. 9 の記号を用いて、

$$\frac{dV}{dt} = \int_{D/2}^{(k_1+1/2)D+z_s/\tan\phi} q_s dy$$

であるから、 $dV/dt=0$  という条件から最終洗掘深が求まることになる。しかし、 $q_s$  の評価に当って、 $(k_1+1/2)D < y < (k_1+1/2)D+z_s/\tan\phi$  つまり円柱側面での斜面は主に砂の安息角に支配されており、流下方向の掃流力に対応した斜面であるとは言い難い、またそこでの掃流力の評価は困難である。したがって、ここでは最終的な洗掘深を求めるという意味で、平坦である洗掘域、 $D/2 \leq y \leq (k_1+1/2)D$  での平均流速を求め、この流れに対して砂の移動が停止するという条件から最終洗掘深を求める。すなわち、OS 断面上の幅  $k_1D$  の平均掃流力を評価するにあたって、この  $k_1D$  での流量がポテンシャル流よりの計算から求められるものとし、しかも洗掘が進行してもこの流量は変化しないものと仮定する。Fig. 9 の断面 I、II 間で流量の連続式をたてると、 $z_s=0$  のときは、

$$u_0 y_0 = \int_{D/2}^{(k_1+1/2)D} u_0 \left(1 + \frac{(D/2)^2}{y^2}\right) dy$$

が成立するから、

$$y_0 = D \left( k_1 + \frac{1}{2} - \frac{1}{4(k_1 + \frac{1}{2})} \right) \dots \dots \dots (1)$$

であり、洗掘が進行した状態（洗掘深= $z_s$ ）では、

$$y_0 u_0 h_0 = \int_{D/2}^{(k_1+1/2)D} h u dy = \int_{D/2}^{(k_1+1/2)D} (h_0 + z_s) u dy \dots \dots \dots (2)$$

である。ここで、 $u = u_0(1 + (D/2)^2/y^2)$  であるが、 $u$  の  $k_1D$  での平均を  $\bar{u}$  とすると、(2)式より、

$$\bar{u} = \frac{1}{k_1D} \int_{D/2}^{(k_1+1/2)D} u dy = \frac{y_0 u_0 h_0}{k_1D(h_0 + z_s)} \dots \dots \dots (3)$$

となる。ここで、 $u_*$  を摩擦速度とし、流量係数を  $\phi_v (= \bar{u}/u_*)$  とすると、 $\tau = \rho(\bar{u}/\phi_v)^2$  より(1)および(3)式を用いて掃流力  $\tau$  が計算される。流速係数  $\phi_v$  については、一般的には河床形態によって大きく変化することが知られているが、円柱側面の洗掘孔内でどのような値をとるかは、洗掘深  $z_s$  などによっても変化し、明らかではない。しかし、斎藤ら<sup>5)</sup>によると、洗掘がある程度進行した後では、 $\phi_v = 8 \sim 10$  であることが報告されている。なお、 $k_1$  は実験的に決定され、約0.25であった。

3.2 混合砂礫の限界掃流力

混合砂礫の限界掃流力に関しては、古くは均等比  $M$  を用いて混合特性を表わす Kramer<sup>6)</sup>、境<sup>7)</sup>らの式が提案されており、一般に  $M$  の減少と共に同じ平均粒径の砂に対する限界掃流力は大きくなるようである。ただし、

$$M = \int_{d_{min}}^{d_{50}} P(d) \cdot dd / \int_{d_{50}}^{d_{max}} P(d) \cdot dd$$

であって、 $d_{min}$ : 最小粒径、 $d_{50}$ : 中央粒径、 $P(d)$ : 粒径  $d$  の分布関数である。また、土屋<sup>8)</sup>、Garde & Hasan<sup>9)</sup>らは、それぞれ  $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ 、 $d_{84}/d_{50}$  などで混合特性を表わしており、特に土屋は詳細な実験に基づき代表砂礫が0.5%/sの割合で移動する時の掃流力を限界掃流力と定義し、標準偏差  $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$  が大きくなるにつれ

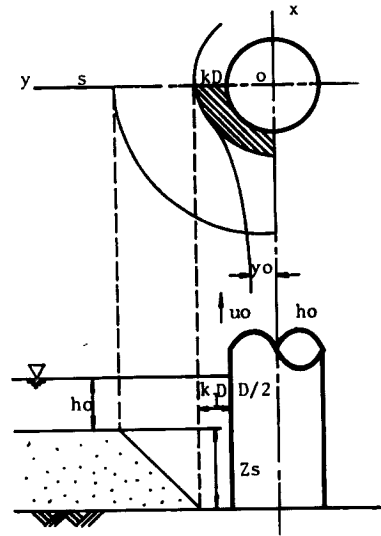


Fig. 9 Definition sketch of scour hole shape.

て、代表粒径の均一砂の限界掃流力より大きくなることを見出した。そして、砂礫床面における砂礫分布の一様性を仮定し、砂礫からの後流を考慮してその代表砂礫に及ぼす遮蔽効果を解析するという方法によって、この現象の説明を試みている。一方、Egiazaroff<sup>10)</sup>は均一砂に対して、無次元限界掃流力  $\tau_{*c}$  が、砂粒子に作用する力の簡単な力学関係から、

$$\tau_{*c} \left( = \frac{u_{*c}^2}{sgd} \right) = \frac{2}{3} \frac{\lambda_c}{C_x \zeta_c^2}$$

であることを導き、 $\lambda = 2(u_{*c}/\bar{u})^2$ 、 $\zeta_c^2 = u^2/\bar{u}d^2$  および  $u$  の分布に対数則を用いることによって、 $\tau_{*c}$  を求めた。ただし、 $u_{*c}$ : 限界摩擦速度、 $s = (\sigma/\rho) - 1$ 、 $g$ : 重力加速度、 $C_x$ : 抗力係数、 $\lambda$ : 抵抗係数、 $\zeta (= u/\bar{u}d)$ : 砂の位置での流速  $u$  と平均流速との比である。また、 $ud$  については河床面から  $0.63d (= a \cdot d)$  での流速を用いている。混合砂についても同様に考えて、流速の対数分布式における相当粗度を平均粒径  $d_m$  で与え、個々の砂粒子に対する  $ud$  として、

$$\frac{ud}{u_*} = 5.75 \log_{10} \frac{30.2 \times ad_i}{d_m}$$

を得、均一砂の時と同様  $a = 0.63$ 、完全乱流に対して  $C_x = 0.4$  を用い、各粒径  $d_i$  の砂粒子に対する無次元限界掃流力  $\tau_{*ci}$  として、

$$\tau_{*ci} = \frac{0.1}{\left( \log_{10} 19 \cdot \frac{d_i}{d_m} \right)^2} \dots \dots \dots (4)$$

を導いている。(4)式は、混合砂礫中の各粒径  $d_i$  の限界掃流力を示しており、 $d_m = d_i$  のとき、 $\tau_{*ci} = 0.06$  となり Shields 曲線と一致する。また、 $d_i < d_m$  のとき  $\tau_{*ci}$  は 0.06 より大きくなり、 $d_i > d_m$  のときは小さくなる。すなわち、均一砂のときと比較して、平均粒径より小さい砂粒子は動きにくく、大きい粒子は動きやすくなることを示している。なお、芦田、道上是<sup>9)</sup>、 $d_i/d_m < 0.4$  では(4)式は逆に  $d_i/d_m$  の減少と共に  $u_{*ci}^2$  は増加するので実際現象に合わないとして、 $d_i/d_m < 0.4$  の範囲では  $d_i/d_m = 0.4$  のときの  $\tau_{*ci}$  で一定であると補正している。また、混合砂全体としての限界掃流力としては、Egiazaroff は  $d_i = d_{50}$  を用いて(4)式で与えられるものと定義している。また、Gessler<sup>11)</sup>は次節で述べるように armour coat として残る砂粒子の平均残留確率  $\bar{q}$  が 0.5 のときの掃流力を混合砂の限界掃流力としている。以上、混合砂の限界掃流力を与える提案式として代表的なもののみをまとめてみると、

- Kramer :  $\tau_c = \rho u_{*c}^2 = (100/6) d_m (\sigma - \rho) g / M$   
 $\tau_c$ :  $gr/m^2$ ,  $d_m$ : 平均砂粒径 mm,  $og, \rho g$ :  $gr/cm^3$
- 境 :  $\tau_c = (100/3) (\sigma/\rho - 1) \beta d_m^{6/5}$   
 $\tau_c$ :  $gr/m^2$ ,  $d_m$ : mm,  $\beta = (2 + M)/(1 + 2M)$
- 土屋 :  $d_{50} G_4 \geq 0.03(\text{cm})$  :  $u_{*c}^2 = 80.9 G_1 d_{50}$   
 $0.118 \leq d_{50} G_4 \leq 0.303$  :  $= 134.6 G_2 d_{50}^{31/22}$   
 $0.0565 \leq d_{50} G_4 \leq 0.118$  :  $= 55.0 G_1 d_{50}$   
 $0.0065 \leq d_{50} G_4 \leq 0.0565$  :  $= 8.41 G_3 d_{50}^{11/32}$   
 $d_{50} G_4 \leq 0.0065$  :  $= 226 G_1 d_{50}$   
 $\sigma/\rho = 2.65$ ,  $\nu = 0.01 \text{cm}^2/\text{s} (20.3^\circ\text{C})$ ,  $g = 980 \text{cm/s}^2$   
 $G_2, G_1, G_3$  および  $G_4$  は Fig. 10 で与えられる
- Gessler :  $\bar{q} = 0.5$
- Egiazaroff :  $\tau_{*c} = 0.1 / \left( \log_{10} 19 \frac{d_{50}}{d_m} \right)^2$



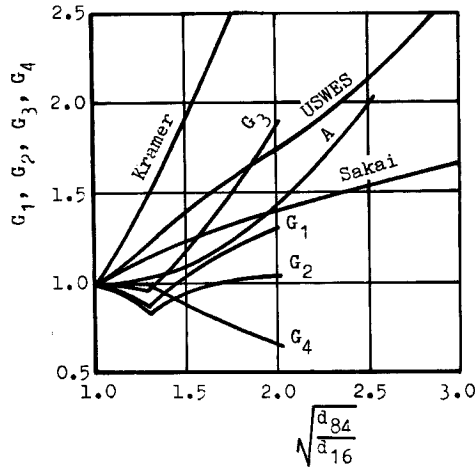


Fig. 10 Variations of  $G_1, G_2, G_3$  and  $G_4$  with  $(d_{84}/d_{16})^{1/2}$  (Tsuchiya)<sup>8)</sup>.

Table 3. Critical shear stress of sand mixture.

Sand	d50(cm)	dm (cm)	M	d84/d16	$\tau_c$ (dyne/cm <sup>2</sup> )				
					Kramer	Sakai	Tsuchiya	Egiazaroff	Gessler
B	0.120	0.117	0.502	1.54	6.28	8.12	6.86	7.78	9.00
C	0.120	0.147	0.242	2.77	16.37	12.93		10.95	19.07
D	0.100	0.106	0.456	1.61	6.26	7.42	6.05	6.86	8.42

である。これらの提案式では、限界掃流力を規定する要素がそれぞれ同一ではないので各式を比較することができないため、具体的に Fig. 3 に示すような粒径加積曲線を有する混合 B, C および D に対して限界掃流力  $\tau_c$  を計算すると Table 3 のようになる。なお、土屋の式は  $\sqrt{d_{84}/d_{16}} < 2$  のみ定義されているので、砂 C については計算できない。表からわかるように、特に  $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$  が大きいほどすなわち M が小さいほど（混合度が大きいほど）各式で与えられる  $\tau_c$  間の差異が大きい。そもそも、限界掃流力を評価する場合の判定基準がほとんどの場合、各々の研究者の直観に委ねられていることを考えると、砂 B および D に対する  $\tau_c$  についてこの程度の差異が生じることは十分考えられる。しかし、肝心の混合特性が顕著である砂 C に対して大きな差異があることは、上に挙げた各式が混合砂の限界掃流力について論じている以上問題がある。これは、混合砂での代表粒径の選び方や、上流側からの給砂のない場合の armour coat の影響などによってこのような差異が出ているものと考えられる。Gessler による値が他のものに比して特に大きめになっているのは、彼が特に armour coat の概念を入れているためである。すなわち、他の研究者がある代表粒径の砂が動かない時の掃流力を  $\tau_c$  としたのに対し、Gessler は砂の移動はあるが、上流からの土砂流入がなければ河床がほとんど低下しないで粗粒化が始まる時の掃流力を  $\tau_c$  の基準としたためである。

### 3.3 最終洗掘深および粒度分布

3・1で求められる掃流力が、混合砂の限界掃流力と等しくなる時の洗掘深が clear water scour における最終洗掘深であると考えられる。混合砂の限界掃流力については、ここで扱っている問題の場合は有為な河床変動が停止するという意味で Gessler による  $\bar{q}=0.5$  のときの掃流力を用いるのが適当である。すなわち、Gessler によると、せん断応力変動が正規分布をしていると仮定すると、与えられた流れにおける個々の砂粒子に作用する局所せん断応力が砂粒子の限界掃流力より小さい確率は、

$$q\left(\frac{\tau}{\tau_c} < 1\right) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(\tau_c/\tau)-1} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx$$

で与えられる。ここで、 $\tau$ は局所せん断応力、 $\tau_c$ は考えている個々の砂粒子の限界掃流力でShields 曲線から与えられる。また、 $\sigma$ は $\tau$ の標準偏差であって粗面に対し実験的に  $\sigma = 0.57\bar{\tau}$ 、 $\bar{\tau}$ は $\tau$ の平均である。この  $q$  を用いて、 $p_0$ を河床低下が生じる前の河床砂の密度関数 ( $=dP_0/dd$ ,  $P_0$  は分布関数) とすると、armour coat として残る砂粒子の平均残留確率  $\bar{q}$  は、

$$\bar{q} = \frac{\int_{d_{min}}^{d_{max}} q^2 \cdot p_0 \cdot d \cdot d}{\int_{d_{min}}^{d_{max}} q \cdot p_0 \cdot d \cdot d} \dots\dots\dots (5)$$

で与えられることを理論的に導びき、河床は  $\bar{q} > 0.5$  で安定、 $\bar{q} < 0.5$  で不安定であることを実験的に求めている。なお、armour coat の粒度分布  $P_A$  は、

$$P_A(d) = \int_{d_{min}}^d q \cdot p_0 \cdot d \cdot d / \int_{d_{min}}^{d_{max}} q \cdot p_0 \cdot d \cdot d \dots\dots\dots (6)$$

で与えられ、流出砂のそれは、

$$P_B(d) = \int_{d_{min}}^d (1-q)p_0 \cdot d \cdot d / \int_{d_{min}}^{d_{max}} (1-q)p_0 \cdot d \cdot d \dots\dots\dots (7)$$

で与えられることを導びいている。

いま、先に述べたように、ある時点までは洗掘孔での砂の粒度構成は変化せず、突然河床低下が止まり粗粒化が始まるとすると、(1)式および(3)式から求める掃流力 $\tau$ および各砂粒径 $d_e$ に対する Shields 曲線からの  $\tau_c$  を用いて  $q$  を計算し、与えられた  $p_0$  とから(5)式によって  $\bar{q}$  を計算し、 $\bar{q} = 0.5$  となるように 試行錯誤によって求められる洗掘深  $z_s$  が最終洗掘深である。Fig. 11 はこのようにして求めた計算値と実験結果との対応関係を示したものである (●印)。なお、計算にあたっては、 $\phi_0 = 10$  としている。掃流力に関する単純なモデル化にもかかわらず、計算値と実験値とは比較的良好に一致している。なお、図中○印は均一砂に対してのものであるが、実測値が過大になっている。混合砂においては clear water scour でも最終状態が比較的確確にわかったが、均一砂に対しては最終状態が厳密には得られなかったため、洗掘進行が急激に小さくなった時をもって最終状態とした。洗掘孔内では、実際は渦流等の乱れが平坦河床より大きいので最終状態がなかなか得られない

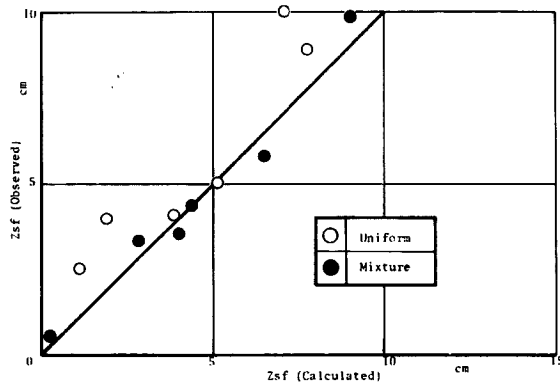


Fig. 11 Relation between observed and calculated values of final scour depth



Fig. 12 Schematic figure of bed surface profile of uniform sand and mixture

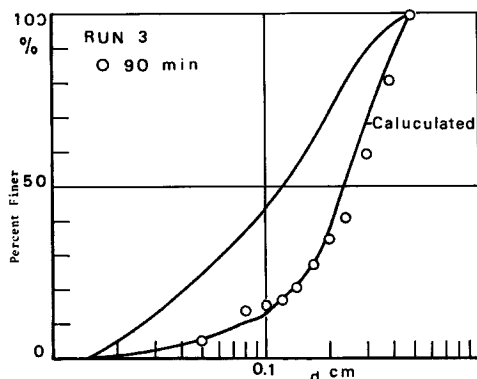


Fig. 13 Particle-size accumulation curves of armour coat.

が、なぜ混合砂においては最終状態がはっきりと現われるのであろうか。Fig. 12 は均一砂と混合砂とで河床表面付近の粒子が最終状態ではどのように組み合っているかを概念的に示したものであるが、混合砂においては armour coat 直下では粗砂が組み合っている空間を細砂が埋めてしまい、粗砂の動揺を阻止し、細砂自体も armour coat の遮蔽のため流送されにくくなっていることが原因の一つとして考えられるが、これらについては今後さらに検討が加えられる必要がある。

なお、最終状態における円柱側面での armour coat の粒度分布については、特に混合特性の顕著である Run 6 に関する Fig. 5 (b), Run 3 に関する Fig. 13 に示されるように、(6)式で与えられる Gessler による計算曲線と実験値とは非常によい一致が得られている。また、流出砂は理論的には(7)式で与えられるが、Run 6 における流出砂についてみると Fig. 7 (a) に計算曲線が示されている。前にも述べたように、流出砂は、流送される間に sorting されるため、実験値の Fig. 7 (a), (b) 両方での砂を混合させたものと計算曲線とが一致する。

#### 4. 結 言

本研究では、混合砂河床における円柱周辺部での洗掘特性および砂の粒度構成について実験的に明らかにするとともに、混合砂礫の限界掃流力として armour coat を考慮した Gessler によるものを用い、掃流力を簡単な洗掘孔モデルにもとづいて求め、最終洗掘深および armour coat の粒度分布特性を明らかにした。掃流力が大きく最大粒径の砂が動かされるような状態では混合効果は顕著ではなかったが、中央粒径が同一でも、均一砂に比して混合砂では最終洗掘深が極度に減少することを示し、洗掘深の大きさの推定を行ない実験によってその妥当性を示した。このことは、clear water scour においては、河床材が混合砂であれば粗粒化するため、洗掘防止対策上、捨て石の効果が期待でき、またその定量的評価もある程度可能であることを示している。

## 参 考 文 献

- 1) 平野宗夫: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, 1970, pp. 77—82.
- 2) 河村三郎: *Armour Coat* の生成に関する研究, 第15回水理講演会講演集, 1971, pp. 37—42.
- 3) 芦田和男・道上正規:混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第14号 B, 1971, pp. 259—273.
- 4) 中川博次・鈴木幸一:橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第17号 B, 1974, pp. 725—751.
- 5) 斉藤隆, 浦 勝, 柴田幸信:円柱周囲の洗掘について, 山口大学工学部研究報告, 第20巻, 第1号, 1969, pp. 83—90.
- 6) Kramer, H. : *Sand Mixtures and Sand Movement in Fluvial Models*, Trans. ASCE, Vol. 100, 1935, pp. 798—878.
- 7) 境 隆雄:河床砂礫に対する限界掃流力に就いて, 土木学会誌, 第31巻, 第12号, 1946, pp. 1—8.
- 8) 土屋義人:混合砂礫の限界掃流力に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第6号, 1963, pp. 228—253.
- 9) Garde, R. J. and S. M. Hasen : *Discussion of River-Bed Degradation below Dams*, Proc. ASCE, Vol. 94, HY 3, 1968, pp. 757—764.
- 10) Egiazaroff, I. V. : *Calculation of Nonuniform Sediment Concentration*, Proc. ASCE, HY 4, 1965, pp. 225—246.
- 11) Gessler, J. : *Self-Stabilizing Tendencies of Alluvial Channels*, Proc. ASCE, WWHD, May, 1970, pp. 235—248.