

## 二粒径混合砂礫による流砂量に及ぼす砂礫の混合効果の検討

### Study on Mixing Effects on Sediment Discharge of Sand and Gravel with Uniform Grain Size

鈴木幸一\*・栗原崇\*\*・山本裕規\*\*\*

By Koichi SUZUKI, Takashi KURIHARA and Hironori YAMAMOTO

Mixing effects on sediment discharge of sand and gravel are discussed based on experiments with mixtures of sand and gravels with uniform grain size. Gravel discharge in mixtures becomes larger than that in uniform gravels when the volumetric percentage of gravels in mixtures is less than about 50%. This is caused by the reduction of repose angle of gravels on sand as well as their excess exposure to the flow. Sand discharge becomes generally smaller in mixtures, but when the gravel discharge increases largely with the mixing effect, sand discharge increases due to the effect of collision of gravel with sand.

**Keywords:** sediment discharge, sand-gravel mixture, mixing effects

#### 1. はじめに

混合砂の流砂量に関しては従来多くの研究があり、その推定には従来提案されている均一砂の流砂量式を修正して用いることが普通である。その修正方法はEinstein<sup>1)</sup>のように各粒径砂に作用する掃流力を補正する方法と、平野<sup>2)</sup>や芦田・道上<sup>3)</sup>のように限界掃流力を補正する方法とがある。後者ではEgiazaroff<sup>4)</sup>による粒径別限界掃流力を用い、各粒径 $d_i$ と平均粒径 $d_m$ との比 $d_i/d_m$ をパラメーターとして粒径別流砂量の特性をかなりよく説し得ている。しかし、各粒径砂の流砂量に及ぼす砂礫の混合効果は粗砂の移動性を大幅に増加させ、 $d_i/d_m$ が特に大きい場合の流砂量の説明は必ずしも十分でない。<sup>3)</sup> Egiazaroffの理論は、流れへの砂礫の突出度の違いによって掃流力が異なるという考えに基づいており、砂の動き易さに関係する砂礫の安息角は混合砂礫中で不変としている。したがって、Egiazaroff理論に基づく補正はむしろ掃流力の補正の方に用いる方が合理的であり、限界掃流力の変化は各粒子の安息角の変化として考える方がより自然であろう。流砂量に及ぼす混合砂の混合効果を明確にするために池田ら<sup>5), 6)</sup>は二粒径混合砂礫を用いて全流砂量と水理量との関係を実験的に検討し、粗砂礫の流れへの突出効果、より平坦になった細砂床上での粗砂の安息角の減少(減摩効果)、あるいは粗砂の移動に伴う細砂の連行(連行効果)などの現象があることを定性的に説明している。すなわち、突出効果が粗砂にかかる掃流力の増大を、減摩効果は限界掃流力の減少を示している。したがって、混合砂礫の流砂量は礫に対しては掃流力と限界掃流力の両方を補正する必要があると考える。本研究では、このような立場に立って二粒径混合砂礫による実験を行い、従来の均一砂の流砂量式を混合砂用に修正する根拠を検討した。

\* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科(〒790 松山市文京町3)

\*\* 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科(同上)

\*\*\* 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科修士課程 土木海洋工学専攻(同上)

2. 二粒径混合砂礫の流砂量に関する実験

それぞれほぼ均一な礫と砂を混合した二粒径の混合砂礫を用いて流砂量と水理量との関係を明らかにすることを目的として実験を行う。実験に用いた水路は、幅が15cmで全長10m（有効部分7m）の長方形断面水路である。用いた砂および礫は図-1に示す粒度分布をもつ平均粒径  $d_L$  が1.48cmの礫と平均粒径  $d_s$  が0.14cmおよび0.34cmの砂であった。実験シリーズAでは  $d_L=1.48\text{cm}$ の礫と  $d_{sA}=0.14\text{cm}$ の砂（A）を、また実験シリーズBでは  $d_L=1.48\text{cm}$ の礫と  $d_{sB}=0.34\text{cm}$ の砂（B）を所定の体積比で混合して二粒径混合砂礫とした。この二粒径混合砂礫を水路全長にわたって5cm厚に平坦に敷き詰め、所定の水理条件で通水し、水路下流端に設けた捕砂箱によって流出土砂量を測定する。この際、上流から給砂は行っていないため、上流側の河床低下の影響が下流端に及ばない時間内に実験を打ち切り、通水停止直前の約5分間の流出砂を捕捉して流砂量を計算した。なお、河床はほぼ平坦であった。実験条件については、流量  $Q$  を6 l/s（単位幅流量  $q = 400\text{cm}^2/\text{s}$ ）の一定としたが、その他の実験条件は表-1に示す通りである。すなわち、礫・砂の混合比をシリーズA・シリーズBとも7通り変化させ、同一の混合比で河床勾配を4通り変えている。表-2には実測の水深を示している。

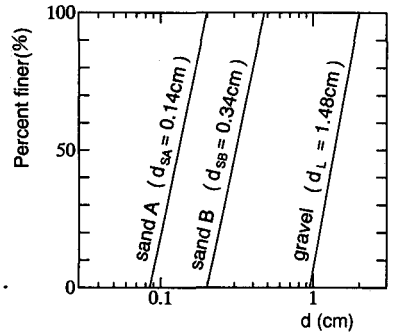


図-1 実験砂礫の粒度

表-1 実験条件

| Series<br>(Run □)                 |                         | A $d_L = 1.48\text{ cm}$ , $d_{sA} = 0.14\text{ cm}$ , $q = 400\text{ cm}^2/\text{sec}$ |         |         |         |         |         |       |       |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
|                                   |                         | B $d_L = 1.48\text{ cm}$ , $d_{sB} = 0.34\text{ cm}$ , $q = 400\text{ cm}^2/\text{sec}$ |         |         |         |         |         |       |       |
| Run No.<br>(Run □ - △)            |                         | A-1,B-1                                                                                 | A-2,B-2 | A-3,B-3 | A-4,B-4 | A-5,B-5 | A-6,B-6 | A-7   | B-7   |
| volumetric ratio<br>gravel : sand |                         | 10:0                                                                                    | 8:2     | 6:4     | 5:5     | 4:6     | 2:8     | 0:10  | 0:10  |
| slope                             | Run No.<br>Run □ - △ -1 | 1/30                                                                                    | 1/40    | 1/45    | 1/55    | 1/80    | 1/200   | 1/500 | 1/130 |
|                                   | Run □ - △ -2            | 1/27                                                                                    | 1/30    | 1/35    | 1/50    | 1/70    | 1/140   | 1/350 | 1/120 |
|                                   | Run □ - △ -3            | 1/24                                                                                    | 1/25    | 1/30    | 1/45    | 1/65    | 1/120   | 1/270 | 1/100 |
|                                   | Run □ - △ -4            | 1/20                                                                                    | 1/20    | 1/27    | 1/35    | 1/60    | 1/100   | 1/200 | 1/90  |

表-2 各Runの実測水深  $h$  (cm)

| Run No. | A-1 | B-1 | A-2 | B-2 | A-3 | B-3 | A-4 | B-4 | A-5 | B-5 | A-6 | B-6 | A-7 | B-7 |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1       | 4.1 | 4.1 | 4.7 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.3 | 5.4 | 5.7 | 5.8 | 6.4 | 7.1 | 7.5 | 6.2 |
| 2       | 4.2 | 4.2 | 4.6 | 4.8 | 4.9 | 4.9 | 5.2 | 5.4 | 5.5 | 5.7 | 5.9 | 6.3 | 7.3 | 5.9 |
| 3       | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.7 | 4.7 | 4.5 | 5.3 | 5.0 | 5.4 | 5.5 | 5.8 | 6.3 | 7.1 | 5.7 |
| 4       | 4.5 | 4.5 | 4.4 | 4.4 | 4.6 | 4.6 | 4.9 | 5.0 | 5.4 | 5.3 | 5.7 | 5.9 | 6.5 | 5.6 |

図-2 (a)および(b)はそれぞれ礫および砂の無次元流砂量  $q_{s*} (= i_{Bq_s} / i_{b\sqrt{s g d_i^3}})$  と無次元掃流力  $\tau_{*i} (= u_*^2 / s g d_i)$  との関係の実験値を示している。なお、河床掃流力に対して側壁の補正は行っていない。図中の太実線は  $d_i = d_m$  とした次式で示す Mayer-Peter&Müller型の流砂量式を表している。

$$q_{s*} = K(\tau_{*i} - \tau_{*c})^m \quad (1)$$

ここに、 $i_B$  : 流出砂中での粒径  $d_i$  砂の混合割合、 $i_b$  : 河床表層砂中での粒径  $d_i$  砂の混合割合、 $i_B \simeq i_b$ 、 $u_*$  : 摩擦速度、 $s$  : 水中比重 ( $= \sigma / \rho - 1$ ,  $\sigma$  : 砂の密度、 $\rho$  : 水の密度)、 $g$  : 重力加速度、 $d$  : 砂粒径 ( $d_L$  あるいは  $d_s$ )、 $q_s$  : 単位幅流砂量、 $K=8$ 、 $m=3/2$ 、 $\tau_{*c}=0.06$  としている。図からわかるように、礫  $d_L$  に対する(a)図では  $d_m$  を平均砂粒径とすると  $d_L/d_m > 1$  であるが、均一砂の(1)式より流砂量がほとんどの場合大きく、逆に細砂  $d_s$  に対する(b)図では  $d_s/d_m < 1$  であり、(1)式より流砂量は小さくな

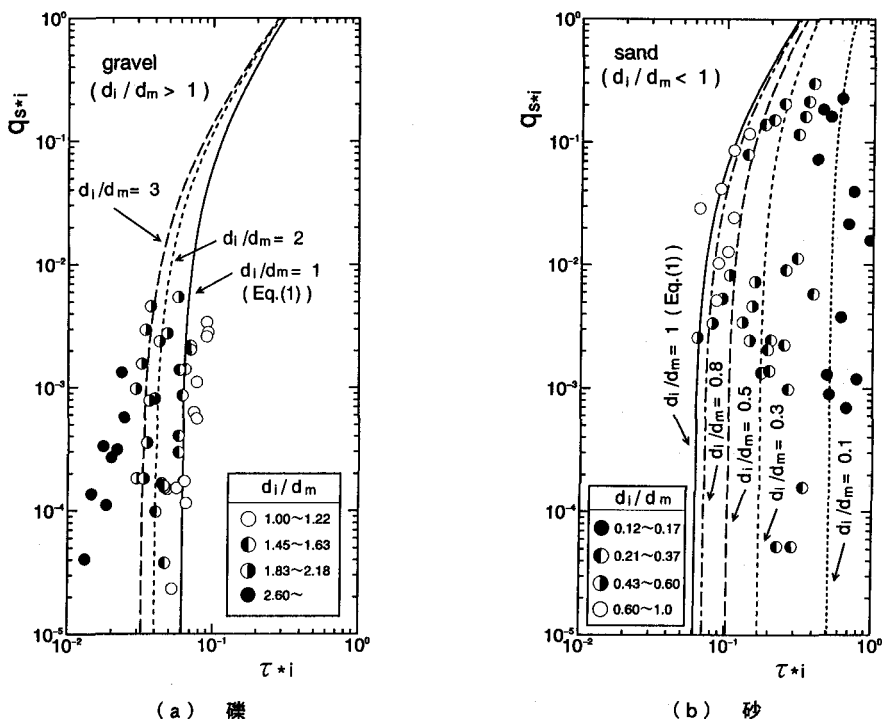


図-2 粒径別無次元流砂量と無次元掃流力の関係

っている。平野<sup>2)</sup>や芦田・道上<sup>3)</sup>などの従来の研究では、無次元限界掃流力 $\tau_{*c}$ が粒径毎に変化するとし、基本的にはEgiazaroff式<sup>4)</sup>に基づいて $\tau_{*c,i}$ を各粒径 $d_i$ と平均粒径 $d_m$ との比 $d_i/d_m$ の関数として

$$\tau_{*c,i} = \{ \log_{10} 19 / \log_{10} (19 d_i / d_m) \}^2 \tau_{*c} \quad (2)$$

で置き換えることによって、均一砂の流砂量式を粒径別流砂量式に修正している。図中に、このようにして求めた粒径別流砂量式を $d_i/d_m$ をパラメータとして示している。実測値と実線とはある程度一致はしているものの詳細に見るとかなり異なっていることがわかる。特に砂の混合割合、すなわち $d_i/d_m$ が大きくなるにつれて礫の流砂量は(2)式による補正曲線より大きく異なることがわかる。ここでは、広範囲の粒度分布を持つ混合砂ではなく、二粒径( $d_s, d_L$ )混合砂礫であり、 $d_s$ 砂と $d_L$ 礫の混合割合が流砂量に大きな効果を与えることが予想され、必ずしも平均粒径 $d_m$ が河床砂の代表粒径としては適当でない。砂の流砂量を表す(b)図でも砂の割合が大きくなると、流砂量が修正式以上に増えることがわかる。これらの原因について以下に検討する。

### 3. 混合効果を考慮した流砂量の補正

#### 3.1 突出効果と遮へい効果の補正

前節で述べたEgiazaroffによる限界掃流力の考え方は、砂に作用する掃流力を求めるに当たって必要な代表流速 $u_{*b}$ が、砂の河床面からの突出高によって異なるという立場から導かれており、砂の安息角は一定としている。<sup>4)</sup> 砂の安息角を一定としている以上、各粒径の無次元限界掃流力が粒径によって変化するのではなく、各粒径に作用する力が局所的に変化するという立場に立っている。すなわち、砂の移動限界状態においては $\tau_* = \tau_{*c}$ であるので $\tau_*$ を補正しても $\tau_{*c}$ を補正したと考えても同じ $\tau_{*c}$ が求まるが、Egiazaroffの補正の考え方では、砂の移動限界状態以外では掃流力 $\tau_*$ を補正すべきであろう。著者ら<sup>7)</sup>は、このような立場から、Egiazaroffの考え方および芦田・道上の修正Egiazaroff式<sup>3)</sup>をもとに次式(3)で示される補

正係数  $\epsilon_1$  を用いて無次元掃流力  $\tau_{*i}$  を  $\epsilon_1 \tau_{*i}$  と補正している。

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= 0.61 \cdot \{\log_{10}(19 \cdot d_i/d_m)\}^2 \quad (d_i/d_m \geq 0.4) \\ &= (1/0.85) \cdot (d_i/d_m) \quad (d_i/d_m < 0.4)\end{aligned} \quad (3)$$

したがって、(1) 式の代わりに

$$q_{s*} = K(\epsilon_1 \tau_{*i} - \tau_{*c})^m \quad (4)$$

として、 $q_{s*}$  と  $\epsilon_1 \tau_{*i}$  との関係を示せば図-3 となる。図-3 では図-2 の実測値のバラツキをかなりよくまとめるようになったが、なおまとめきれないデータがみられる。たとえば、礫および砂の流砂量ともに図中データを○、△の記号以外で区別しているシリーズAの Run5, Run6 の実測値およびシリーズBの Run6 の実測値が補正式の値より特に過大となっている。この原因として以下に述べるように礫の移動に関しては減摩効果が、また砂の移動に対しては連行効果が考えられる。

### 3. 2 礫の減摩効果

減摩効果は池田<sup>5)</sup>が指摘しているように礫(粗砂)が移動しやすくなる現象であるが、ここでは図-4 に示すような流下方向鉛直断面の二次元模式図(実際は水平面も考えると三次元的である)に基づいて減摩効果を考える。まず、(b)図のように混合している二粒径砂礫の河床で小さい粒径砂で形成されている河床に他の大きな粒径礫が単独(各礫間隔が大きく互いに影響を及ぼさない)で存在する場合を考える。いま、流れによる抗力が仮りに礫の中心に作用すると考えて、(a)図のように均一砂における静止摩擦係数を  $\tan \phi_1$  とすると  $\tan \phi_1 (\simeq 1/\sqrt{3})$  はほぼ一定とみなせる。混合二粒径砂礫における摩擦係数  $\tan \phi_2$  は河床面を形成する細砂の粒径  $d_s$  とその上に乗っている粗砂の粒径  $d_L$  の関数として

$$\tan \phi_2 \simeq 1/\sqrt{(d_L/d_s + 1)^2 - 1} \quad (5)$$

のように一義的に決まる。砂の移動限界状態では  $\rho u_{*c}^2 \sim \rho u_{bc}^2 \sim (\sigma - \rho)(2/3)d \tan \phi$  であるから摩擦係数は限界掃流力(=  $\rho u_{*c}^2$ )に対して線形関係があり、 $\tan \phi_2$  が小さくなれば限界掃流力は一次的に小さくなる。したがって、安息角の補正は無次元限界掃流力  $\tau_{*c}$  を  $\epsilon_2 \tau_{*c}$  (=  $\tau_{*ci}$ ) と補正することになり、補正係数  $\epsilon_2$  は  $d_L/d_s > 1$  に対して次式で与えられる。

$$\epsilon_2 = \tan \phi_2 / \tan \phi_1 \simeq \sqrt{3} / \sqrt{(d_L/d_s + 1)^2 - 1} \quad (6)$$

すなわち、 $d_L/d_s$  が大きくなると限界掃流力はかなり小さくなることがわかる。Chinら<sup>8)</sup>も基底砂表面からの突出高  $p$  と粒径  $d_L$  の比  $p/d_L$  と無次元限界掃流力  $\tau_{*c}$  ( $u_{*c}$  は突出礫に作用するものを使用) の関係を検討し  $p/d_L = 0$  で  $\tau_{*c} \simeq 0.1$ ,  $p/d_L = 0.5$  で  $\tau_{*c} \simeq 0.04$ ,  $p/d_L = 0.7$  で  $\tau_{*c} \simeq 0.01$  のように  $p/d_L$  によって  $\tau_{*c}$  は大きく変化することを示している。ただし、この  $\epsilon_2$  は図-5 (a)のように砂河床に乗っている礫の数が少なく礫間の干渉がない場合には正しいと考えられるが、図-5 (b)のように礫の混合割合が大きくなると礫どうしが接触したり、礫による

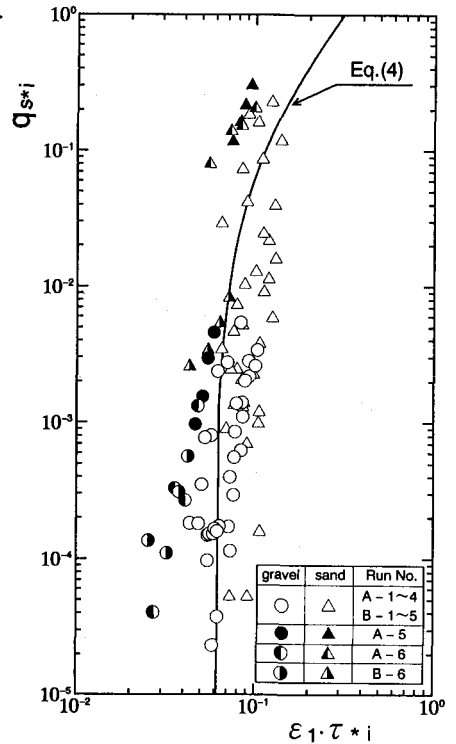


図-3 掃流力補正後の流砂量

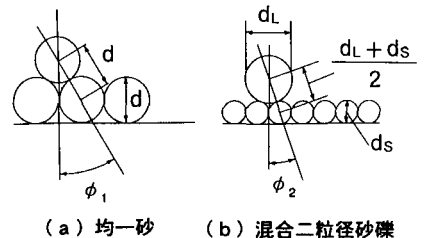


図-4 表層礫の安息角

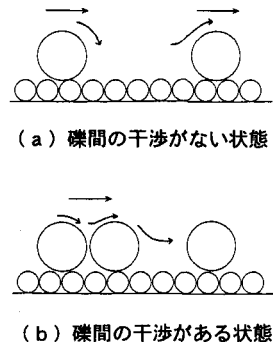


図-5 礫成分の大小による干渉状態

水流の乱れが下流に存在する礫への流体力を変化させていくことにより減摩効果が消滅するといったメカニズムが考えられる。この場合、礫間の干渉を支配するパラメータは礫・砂の混合割合であるとし、この礫間の干渉効果の補正係数を  $f$  とすると、 $f$  は礫・砂の混合割合  $f_L/f_s$  の関数と考える。ここに、 $f_L$ ：礫の混合割合、 $f_s$ ：砂の混合割合である。いま、 $\epsilon_2 = (\tan \phi_2 / \tan \phi_1) \cdot f(f_L/f_s)$  と表されるとき、この補正係数  $f$  の定性的特性を考える。まず、礫・砂の混合割合については礫間の干渉がほとんどみられないほど礫の混合比率  $f_L$  が小さければ、 $\epsilon_2 = \tan \phi_2 / \tan \phi_1$  となるはずであるから  $f = 1$  となる。逆に  $f_L$  がある値より大きくなると礫間の干渉が大きくなり河床表層砂は礫の均一砂に近くなり、減摩効果は消えて  $\epsilon_2 = 1$  となるから、 $f_L/f_s$  がある限界値  $(f_L/f_s)_{\text{limit}}$  で  $f = \tan \phi_1 / \tan \phi_2$  とならなければならない。 $(f_L/f_s)_{\text{limit}}$  を流砂量に関する図-3から推定すると実験シリーズAではRun4であって礫：砂が5：5すなわち  $f_L/f_s = 1$ 、シリーズBではRun5であって礫：砂が4：6すなわち  $f_L/f_s = 0.67$  となっている。このように、これらの限界値は混合している二粒径砂礫の粒径によって異なる。そこで混合二粒径砂礫の粒径と限界混合割合との関係を示すとデータは2つしかないが図-6のようになり、実験式を便宜的に次式のように示す。

$$(f_L/f_s)_{\text{limit}} = 0.3\{(d_L/d_s) - 1\}^{1/2} \quad (7)$$

いま、上述の  $f_L/f_s \rightarrow (f_L/f_s)_{\text{limit}} : \epsilon_2 = 1, f_L/f_s \rightarrow 0 : \epsilon_2 = (\tan \phi_2 / \tan \phi_1)$  の条件を満たすように  $\epsilon_2 = 1$  と  $\epsilon_2 = (\tan \phi_2 / \tan \phi_1)$  の間を線形補完すると、

$$f_L/f_s \leq (f_L/f_s)_{\text{limit}} : \epsilon_2 = \frac{\tan \phi_2}{\tan \phi_1} [1 - \{1 - \frac{\tan \phi_1}{\tan \phi_2}\} \frac{f_L/f_s}{0.3(d_L/d_s - 1)^{1/2}}]$$

$$f_L/f_s > (f_L/f_s)_{\text{limit}} : \epsilon_2 = 1 \quad (8)$$

が得られる。礫の流砂量は  $d_L/d_m > 1$  に対して

$$q_{s*1} = K(\epsilon_1 \tau_{*1} - \epsilon_2 \tau_{*c})^m \quad (9)$$

と表せる。図-7は上記の減摩効果の補正を行った後の掃流力と流砂量の関係を礫について示しているが、実験シリーズAのRun6を除いて両者はよく一致している。シリーズAのRun6では、水脈が礫によって乱され礫の背後には渦ができるが、砂の粒径が小さいので巻き上げられて図-8のように小さなマウントが形成される。減摩効果の補正では細砂河床が平坦であるとして摩擦角を決定したが、このようにマウントが形成されるとこの形成されたマウントと礫とのなす角  $\phi_3$  が粗砂の動きに関して重要となってくるので、マウントが形成される場合には式(6)の  $\tan \phi_2$  は  $\tan \phi_3$  で置きかえられなければならない。 $\phi_3$  はマウントの規模と礫の粒径  $d_L$  との関係で決まると考えられるが、ここではデータ不足のため定量的検討はできない。

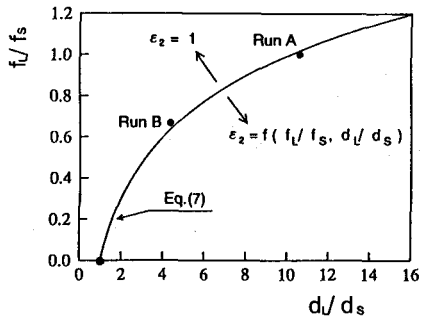


図-6 減摩効果の限界曲線

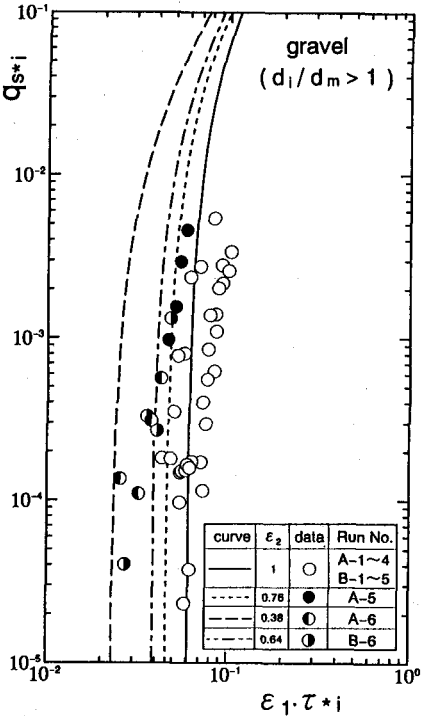


図-7 補正後の礫の流砂量

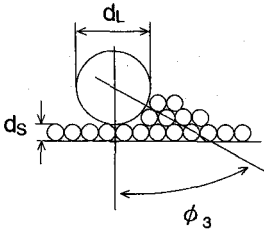


図-8 河床形状による礫の安息角の変化

### 3. 3 粗砂による細砂の連行効果

連行効果は、池田<sup>5)</sup>が指摘しているように大きな運動量を持った粗砂がより低所にある細砂を押し進める効果である。本実験の場合はあまり顕著ではないが、この効果は粗砂の粒径に比して細砂の粒径が極端に小さく礫の割合が少ないシリーズAのRun5およびRun6の場合に認められる。特に図-8のように粗砂の背後で巻き上げられた細砂が形成するマウントが、粗砂の移動によって破壊され流送されることが支配的であるようである。このマウントの形成は、混合二粒径砂の粒径比に強く依存し、また細砂の混合割合にも影響される。細砂の連行効果は細砂に対する流体力や動き易さといったものが変化するのではなく、粗砂の移動が減摩効果のために増えた程度だけ細砂の流砂量が増えると考え、流砂量全体を補正係数 $\epsilon_3$ を用いて

$$q_{s*1} = \epsilon_3 K (\epsilon_1 \tau_{*1} - \tau_{*c})^n \quad (d_s/d_m < 1) \quad (10)$$

と補正したとき、 $\epsilon_3$ は減摩効果による礫の流砂量が増えた割合 $(\epsilon_1 \tau_{*1} - \epsilon_2 \tau_{*c}) / (\epsilon_1 \tau_{*1} - \tau_{*c})$ ( $=R$ )と礫の割合 $f_L$ の関数であると仮定できよう。 $R=1$ で $\epsilon_3=1$ でなければならないことを考慮し、細砂の流砂量について連行効果が顕著に現れていると思われる実験シリーズAのRun5およびRun6について実測値より補正係数 $\epsilon_3$ を推定し、対応する $\epsilon_2$ を(8)式で計算して $\epsilon_3$ の実験式を求めると次式であった。

$$\epsilon_3 = 1 + 5 \cdot f_L \cdot \ln R \quad (11)$$

### 4. おわりに

大・小二粒径の異なる砂礫を混合させた砂を用いて流砂量を測定し、各粒径砂の流砂量に及ぼす混合効果を実験的に評価し、以下の結果を得た。

- 1) 礫の流れへの突出効果は礫の流砂量を増し、砂の礫による遮へい効果は砂の流砂量を減少させるが、粒径別流砂量に及ぼすこれらの効果は砂にかかる掃流力を補正することによって評価できる。
- 2) 礫の河床における安息角減少効果は礫の流砂量を増すが、このことは礫の混合割合がある程度より小さい場合にのみ生じ、流砂量に及ぼすこの減摩効果は、限界掃流力の補正を礫と砂の粒径比および混合比の関数で行うことによって評価できる。
- 3) 礫の移動に伴って、細砂が連行されて流砂量が増える連行効果は、礫の減摩効果による増加分が引き起こすものに相当すると考えて流砂量全体を減摩効果に関係する関数で補正する試みを示した。

### 参考文献

- 1) Einstein, H.A.: The bed-load function for sediment transportation in open channel flows., USDA, Soil Conservation Service, Technical Bulletin, No. 1026, 1-71, 1950.
- 2) 平野宗夫: Armoringをとまう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, pp. 55-65, 1971.
- 3) 芦田和男・道上正規: 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, pp. 59-69, 1972.
- 4) Egiazaroff, I.V.: Calculation of nonuniform sediment concentrations, Proc. ASCE, Vol. 91, No. HY4, pp. 225-247, 1965.
- 5) 池田宏: 二粒径混合砂礫の流送に関する水路実験, 筑波大学水理実験センター報告, No. 8, pp. 1-15, 1984.
- 6) 池田宏・伊勢屋ふじこ: 粗砂の運ばれやすさに及ぼす細砂の影響, 筑波大学水理実験センター報告, No. 9, pp. 43-47, 1985.
- 7) 鈴木幸一・羽野敦之: 平衡流砂場での混合砂河床表層砂の粒度変化と流砂量, 水工学論文集, 第35巻, pp. 411-416, 1991.
- 8) C.O. Chin and Y.M. Chiew: Effect of bed surface structure on spherical particle stability, Proc. ASCE, Jour. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 119, No. 3, pp. 231-242, 1993.