

二粒径混合砂礫の流砂特性に関する研究

愛媛大学工学部 正員 鈴木 幸一
 鹿島建設(株) 正員 岩月 章浩
 愛媛大学大学院 学生員 山本 裕規

1.はじめに 河床が混合砂礫からなる場合には、その流送過程において砂礫の様々な混合効果が現れることが報告されている¹⁾。本研究では砂礫を大小二粒径に単純化して水路実験を行い、混合効果のメカニズムを明らかにするとともに、これらの効果を考慮した粒径別流砂量式の検討を行った。

2.実験の概要 実験は粗砂の粒径を一定にして、細砂の粒径を2通り変化させることでシリーズA, Bに分けて行った。なお、粗砂として代表粒径 $d_L=1.48\text{cm}$ 、細砂はシリーズAでは代表粒径 $d_{sA}=0.14\text{cm}$ 、シリーズBでは $d_{sB}=0.34\text{cm}$ のものを用いている。この粗砂と細砂をシリーズA, B共に表-1に示す混合比率で混合し、全長7m、幅0.15mの矩形断面水路で下流端より水路全長にわたって厚さ5cmで平坦に敷き詰めて、無給砂の状態各Run共に6ℓ/secの流量で通水して行った。なお通水は等流状態にして行い、無給砂による河床低下の影響が下流端に及ばない時間内に通水を打ち切り、下流端において採砂を行った。

3.混合効果を考慮した流砂量式の検討 従来、均一砂の流砂量式を修正して混合砂の流砂量式を導いているが、均一砂の流砂量式としてMeyer-Peter&Müller型の式を用いると混合砂の粒径別の流砂量式は

$$q_{s,i} = K \cdot (\varepsilon_1 \tau_{*i} - \varepsilon_2 \tau_{*c})^m \quad (1)$$

となる。ここに、 $q_{s,i} \doteq (i_B / i_b) \cdot q_s / \sqrt{sgd_i^3}$ 、 τ_{*i} :粒径別無次元掃流力、 τ_{*c} :限界掃流力、 i_B :流出砂に占める粒径 d_i 砂の割合、 i_b :河床表面層砂に占める粒径 d_i 砂の割合、 q_s :全流砂量、 s :砂の水中比重、 g :重力加速度、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$:掃流力および限界掃流力の補正係数、 $K=8, m=3/2, \tau_{*c}=0.06$ である。なお、本実験では $i_B \doteq i_b$ としている。混合砂礫の流送における砂礫の混合効果には、粗砂の突出・減摩効果、細砂の遮蔽・連行効果があり、突出・遮蔽効果に関しては、鈴木ら²⁾は各粒径砂に作用する掃流力を粒子の河床面からの突出高の違いで補正することにより均一砂の流砂量として取り扱えることを示している。この考え方に基づき、突出・遮蔽効果に関して補正した粒径別無次元掃流力 $\varepsilon_1 \cdot \tau_{*i}$ と無次元流砂量 q_{s*} の関係を粗砂および細砂についてそれぞれ図-1(a)と(b)に示す。ここで補正係数 ε_1 は

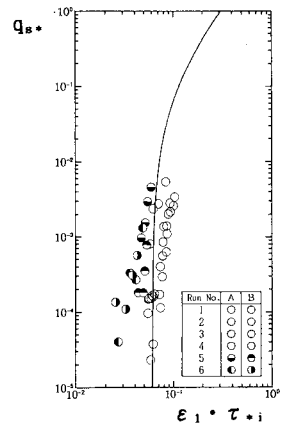
$$d_i/d_m \geq 0.4 \text{ のとき } \varepsilon_1 = 0.61 \cdot \{\log_{10}(19 \cdot d_i/d_m)\}^2 \quad (2)$$

$$d_i/d_m < 0.4 \text{ のとき } \varepsilon_1 = 1 / 0.85 \cdot (d_i/d_m)^{-1} \quad (3)$$

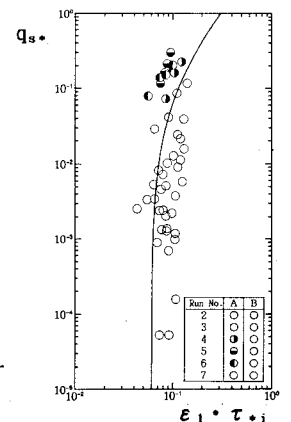
である。ここに、 d_m :混合砂の平均粒径である。なお、図中の実線は均一砂の場合の(1)式であり、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ である。図中に○で示したデータはほぼ均一砂の場合の(1)式に追従しているが、粗砂・細砂共に細砂の混合割合が多いRunにおいて追従しないデータが存在している。これについては細砂の混合割合が増すことで粗砂に関しては減摩効果が、細砂には連行効果が現れたものと考えられるため、これらの混合効果に対する補正を行う必要がある。まず減摩効果について検討する。減摩効果の発生は主に混合する粗砂と細砂の

表-1 実験条件

Run No. (A, B)	混合比率 粗砂:細砂
1	10:0
2	8:2
3	6:4
4	5:5
5	4:6
6	2:8
7	0:10



(a) 粗砂



(b) 細砂

図-1 $\varepsilon_1 \cdot \tau_{*i}$ と q_{s*} の関係

間の摩擦角の相違による粗砂の移動限界の変化と、粗砂と細砂の混合割合の変化に大きく依存しているが、減摩効果の現れる限界の粗砂・細砂の混合割合については、実験データをもとに推定した結果シリーズAで粗砂：細砂=5:5、シリーズBで4:6であった。このデータをもとに限界混合割合線を推定すると図-2の様になり次式で定式化される。この線を越えて粗砂の多くなる混合割合では減摩効果は起こらないということになる。

$$(f_L/f_S)_{\text{limit}} = 0.3 (d_L/d_S - 1)^{1/2} \quad (4)$$

ここに、 f_L/f_S :粗砂と細砂の混合割合の比、 d_L/d_S :粗砂と細砂の粒径の比である。これらの条件をもとに減摩効果の補正係数 ε_2 を定めると次式のようなになる。

$f_L/f_S \leq (f_L/f_S)_{\text{limit}}$ のとき

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\tan \phi_2}{\tan \phi_1} \right) \left[1 - \left\{ 1 - \left(\frac{\tan \phi_1}{\tan \phi_2} \right) \right\} \frac{f_L/f_S}{0.3 (d_L/d_S - 1)^{1/2}} \right] \quad (5)$$

$f_L/f_S > (f_L/f_S)_{\text{limit}}$ のとき

$$\varepsilon_2 = 1 \quad (6)$$

ここに、 ϕ_1 :均一砂の摩擦角(一定)、 ϕ_2 :混合二粒径における摩擦角であり、 $\tan \phi_1 = 1/\sqrt{3}$ 、 $\tan \phi_2 = 1/\sqrt{(d_L/d_S + 1)^2 - 1}$ と表される。また、混合する細砂の粒径が小さく、その混合割合がかなり大きいときは粗砂の背後に細砂のマウントが形成されると考えられるので、このような場合には(5)式における ϕ_2 の代わりに、粗砂と細砂のマウントとの摩擦角 ϕ_s を用いて補正を行う。なお減摩効果の補正では粗砂の移動限界の変化に関して論じているので、無次元限界掃流力 τ_{*c} に対して $\varepsilon_2 \cdot \tau_{*c}$ と補正を行い、突出効果の補正とあわせて(1)式によって減摩効果を補正した流砂量式を表すことができる。減摩効果の補正をRun A-5、A-6とRun B-6に対して行い、(1)式をそれぞれ示すと図-3のようになり、かなり実験データと追随している。ここでRun A-6では細砂のマウントが形成されるものとして補正を行っている。マウントの形成・発達に関する条件はここでは明らかではないため、 $\tan \phi_s$ を推定するのは困難であるが、Run A-6の場合マウントは細砂の粒径の約2倍程度に発達しているものと思われる。細砂の連行効果に関しては、細砂のマウントが粗砂の移動の際に破壊されて起こるものと考え、補正係数 ε_3 は次の様なパラメータを持つ関数と仮定される。

$$\varepsilon_3 = f(d_L/d_S, f_L/f_S, \tau_*) \quad (7)$$

また、本研究で考える連行効果では、細砂の移動限界や細砂に作用する流体力には依存せず、細砂のマウントの形成・発達の程度により流砂量に変化するため、流砂量式全体に対して ε_3 による補正を加えるのがよいと思われる。今後細砂のマウントの形成・発達の条件を実験的に求めることで具体的な ε_3 の検討を進める必要がある。

4. おわりに 二粒径混合砂礫の粒径比、混合割合を検討することで粗砂の減摩効果を補正した流砂量式を推定することができたが、細砂の連行効果に関しては今後具体的な補正式を推定する必要がある。

参考文献：

- 1) 池田宏:筑波大学水理実験センター報告, No. 8, pp. 1~15, 1984.
- 2) 鈴木, 羽野:水工学論文集, 第35巻, pp. 411~416, 1991.

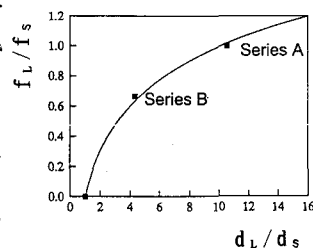


図-2
限界混合割合線

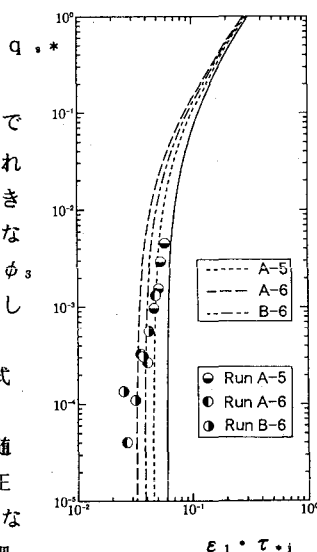


図-3
減摩効果の補正後の
(1)式