

平衡流砂場での混合砂河床表層砂の粒度変化と流砂量

Grain Size Change of Bed Surface Layer and Sediment
Discharge in Rivers with Gravel and Sand Mixture

鈴木幸一*・羽野教之**

By Koichi SUZUKI and Atsushi HANO

Bed load transport and grain size variation of the surface layer of a river bed with gravel and sand mixture are discussed based on flume experiments with equilibrium conditions of sediment discharges. The bed surface layer tends to be coarser than the substrate at low rates of sediment transport, but it becomes finer at higher rates. The bed load transport rate can be calculated based on the availability of each size grains in the surface layer, because the mobility of grains is due to fluid forces acting on the exposed grains. The coarsening and fining mechanism is also discussed qualitatively.

Keywords: sand mixture, mobile armor, sediment transport

1.はじめに

河床表層砂が粗礫で覆われていると流砂量が極端に少なくなることから明らかなように、河床表層砂の粒度組成は流砂量と大きくかかわっている。混合砂河床表層砂の粒度組成変化については、従来論じられてきた静的粗粒化(static armor)の他に、Parkerら¹⁾が pavement とよんだ流砂の動的平衡状態における河床表層砂の粗粒化いわゆる動的粗粒化(mobile armor)現象が最近注目されている^{2),3),4),5)}。また、細砂のみが移動ししかも細砂の流砂が平衡状態でも河床表層砂は粗粒化することを道上ら⁶⁾が指摘している反面、掃流力が大きく粗砂細砂とも活発に移動している場合には流砂より河床表層砂の方が細粒化しているデータも Ikedaら⁷⁾によって示されている。流域の地質特性によって決まる河道への流入砂の粒度は本来河道での掃流力とは無関係のはずであり、動的平衡河道における流砂の粒度は掃流力によらず不変であると考えなければならず、この条件を満たすように掃流力の変化に対応して河床表層砂の粒度組成が変化していることになる。

本研究では、実験水路において母床砂と同一の粒度組成の砂を上流から給砂することによって平衡河床を形成し、掃流力の変化によって動的平衡河床表層砂の粒度組成がどのように変化するかを実験的に明らかにするとともに、河床表層砂の粒度組成変化を考慮した粒径別流砂量の推定方法について検討する。

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

** 学生会員 愛媛大学大学院工学研究科修士課程 土木工学専攻(同上)

2. 河床表層砂の粒度変化と流砂量に関する実験

流砂が動的平衡状態にある河床において、掃流力と流砂量および河床表層砂の粒度組成の関係を找出す目的で実験を行った。用いた水路は幅 15cm で長さが 8m の長方形断面可変勾配水路で、上流のエレベータ式給砂装置によって給砂し、流出砂量は水路下流端の砂溜めによって測定した。水路床を構成する移動床砂および上流からの給砂は、平均粒径 d_{m0} が 0.39cm、最大粒径が 2.0cm、最小粒径が 0.04cm で標準偏差 σ_0 ($=\sqrt{d_{84}/d_{16}}$) が 3.0 の混合砂であってその粒径加積曲線は図-1 の太実線で示されている。

実験の手順は、水路床に厚さ 10cm の移動床を作り所定の給砂量と流量とから予想される平衡河床勾配に近い勾配に水路を固定し、通水と水路の上流端からの給砂を続ける。河床勾配が変化しなくなり、水路下流端からの流出砂量が時間的に一定で上流からの給砂量とほぼ等しくなった状態(通水後約 2 時間)で、河床形状および水面形状を測定する。つぎに河床を乱さないように下流端水位を堰上げて通水を止め徐々に排水した後、河床表層砂を最大突出砂の頂部から最大砂粒径(2cm)の厚さで流下方向に幅 10cm で水路幅全幅の領域で採砂する。採砂地点は水路下流端から 1m 間隔で 6 地点である。

実験条件および実験結果の一部は表-1 および図-1 に示している。表-1 には河床勾配 I 、水深 h 、平均流速 u 、摩擦速度 u_* 、単位幅当たり全流砂量 q_s 、河床表層砂の平均粒径 d_{ms} および流砂の平均粒径 d_{m0} が示されており、図-1 には一例として Run2 および Run8 の流砂と河床表層砂の粒径加積曲線が給砂(母床砂)の粒径加積曲線とともに示してある。動的平衡状態では一致すべき給砂と流砂の粒度組成は必ずしも一致してはいないが、この実験誤差は認められる範囲であるとする。図-1 の Run2 の例では河床表層砂の粗粒化が、また Run8 の例では河床表層砂の細粒化が認められる。なお、全 Run について河床波は形成されておらず、河床は突出砂による凹凸が不規則に認められる場合もあったがほぼ平坦であった。

表-1 実験条件と実験結果

Run No.	I	h (cm)	u (cm/s)	u_* (cm/s)	q_s (cm ² /s)	d_{ms} (cm)	d_{m0} (cm)
1	0.0114	6.18	80.91	8.309	0.516	0.424	0.411
2	0.0123	5.37	74.49	8.045	0.401	0.536	0.381
3	0.0129	5.70	70.18	8.489	0.261	0.545	0.365
4	0.0109	6.70	82.09	8.460	0.488	0.454	0.389
5	0.0117	5.18	70.85	7.707	0.393	0.472	0.370
6	0.0153	4.52	77.43	8.232	0.617	0.523	0.388
7	0.0197	4.68	74.79	9.505	1.758	0.386	0.366
8	0.0189	4.50	88.89	9.130	1.982	0.314	0.420
9	0.0183	5.33	103.19	9.777	3.029	0.274	0.387
10	0.0200	5.65	106.19	10.523	2.578	0.322	0.390

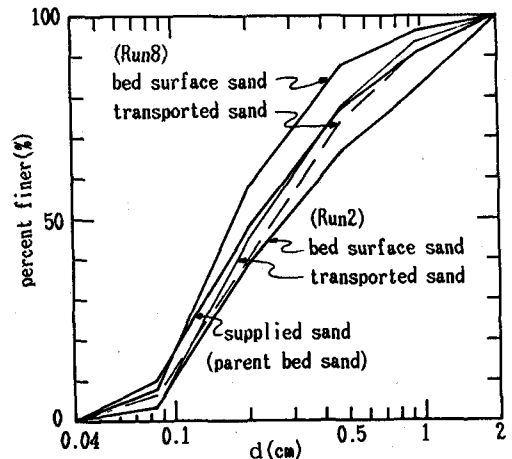


図-1 給砂の粒径加積曲線と河床表層砂および流砂の粒径加積曲線の例

3. 河床表層砂の粒度変化

図-2 は河床表層砂の平均粒径 d_{ms} を給砂(母床砂=流出砂)の平均粒径 d_{m0} で無次元化した d_{ms}/d_{m0} と無次元掃流力 $\psi_0 (=hI/sd_{m0})$ の関係を示したものである。ここに、 h は水深、 I はエネルギー勾配、 $s = \rho_s/\rho - 1$ 、 ρ_s 、 ρ はそれぞれ砂および水の密度である。本実験のデータに加えて著者の一人の他の実験のデータ^{2),5)} も加えている。●で示すデータは主に粗砂はほとんど移動してなくて細砂のみの流砂が平衡な場合の実験データであって、○および●で示すデータは主として粗砂も細砂も移動している平衡流砂状態での実験データである。 ψ_0 が 0.15 程度では粗砂も細砂も活発に移動しているが、 ψ_0 が 0.10 程度では粗砂の移動は緩慢である。 ψ_0 がそれよりさらに小さくなると粗砂の移動がさらに緩慢となり細砂の移動

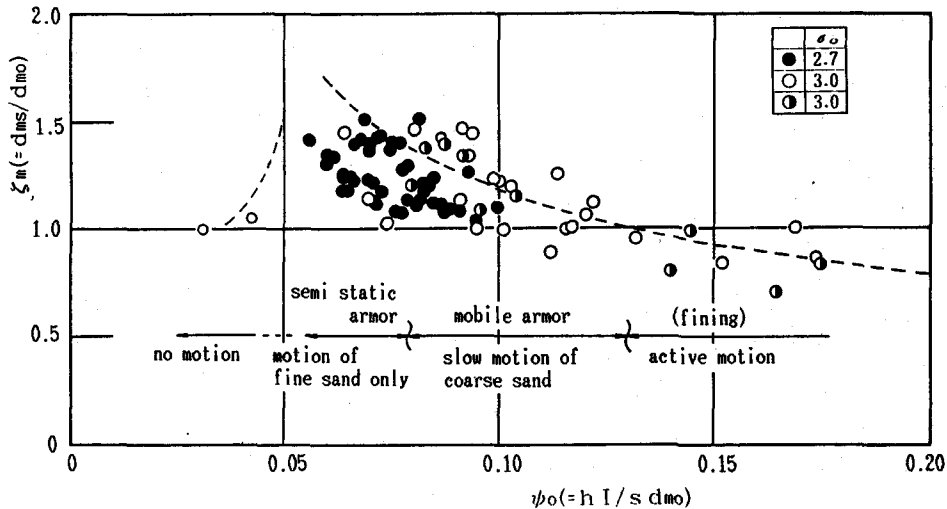


図-2 無次元掃流力 ψ_0 と河床表層砂の無次元平均粒径 ζ_m の関係

が主となる。以下、観察に基づき河床表層砂の粒度組成変化について考察する。

平衡流砂静的粗粒化($\sim 0.05 < \psi_0 < \sim 0.08$)：掃流力が小さく細砂のみが移動している平衡状態で水路下流端からの流出砂を上流端から供給させるように流砂を循環させると流砂量 q_s は最終的にはどのようなであろうか。 q_s が通水初期と最終状態とで変わらない場合は、河床表層砂の粒度組成も変化しないと考えられる。しかし、道上ら⁶⁾は静止し揺動している粗砂が移動している細砂の一部をその下部空間に捕捉してしまう機構により q_s は減少するとしている。すなわち、粗砂の下部空間に沈みこんだ細砂の分だけ河床表層砂は粗粒化することになるし、細砂の流砂量も減少することになる。図-2の●で示すデータは主としてこのような粗粒化現象を示している。

平衡流砂動的粗粒化($\sim 0.08 < \psi_0 < \sim 0.13$)：つぎに、粗砂も移動しているがその移動があまり活発でないような掃流力状態を考える。粗砂は間欠的に移動はするが停止している粗砂も少なくない一方、細砂は比較的活発に移動している状態が想定される。流れが比較的強くなると細砂は停止している粗砂の周りの乱れによって洗掘され、不安定になった粗砂は転動する。すなわち、粗砂は移動はしているものの細砂の洗掘された後に生じる現象が多く見られ、ここでは依然として粗細砂の移動限界の差の影響が残っており、粗砂の方が動きにくい状態である。平衡流砂状態ではみかけ上粗細砂は等移動性を保っていなければならないから、移動速度が違うにもかかわらず等移動性を保つためには河床表層砂の粗砂の存在率 i_s が大きくなっているはずである。すなわち、給砂(流砂)より粗粒化していることになる。この状態の粗粒化のデータが図-2の $\sim 0.08 < \psi_0 < \sim 0.13$ のデータに相当するいわゆる mobile armor 現象である。

平衡流砂動的細粒化($\sim 0.13 < \psi_0$)：掃流力がさらに増して、河床が平坦で細砂と粗砂が混在して活発に移動している場合、粗砂の移動した後の空隙に細砂は入り込めるが、細砂の移動した後の空隙には体積の大きな粗砂は入り込めない。観察によると、結果として一部の粗砂が上方に突出し、細砂が河床の凹凸を埋めるように移動する。この結果河床面は滑らかとなりその上を粗砂がすべるように移動している。すなわち、相対的に流れに突出している割合の多い粗砂の速度の方が下層に多い細砂の速度よりかなり大きくなっている。流砂が平衡状態ではみかけ上の粗細砂の等移動性が成り立ち、しかも粗砂の移動速度が細砂より大きいため移動層全体としてはその中の細砂の存在率が増えていなければならない。すなわち、移動層は細粒化していることになる。図-2のデータでは $\sim 0.13 < \psi_0$ で細粒化の傾向が認められるようであるが、この細粒化現象は Ikedaら⁷⁾の大小2粒径混合砂を用いた実験でも確かめられている。

なお、ここでは平坦河床に限って議論しているが、 ψ_0 がさらに大きく河床波が形成される場合には、たとえ粗砂が細砂より速く移動しても河床波の下流側の後流域に入って谷に落ち込むので河床波の進行とともに細砂によって埋められてしまう。河床波が移動し、次の谷が近づくまではこの埋もれた粗砂は停止しているため、平均的には粗砂と細砂の移動速度は同じとなると考えられ、移動層全体としての粒度組成は流砂の粒度組成と同じであると推測される。図-2 の $\xi_m (= d_{ms}/d_{mo})$ と ψ_0 との関係は、当然流砂の粒度組成によって変わる。いま、給砂(母床砂)の標準偏差 σ_0 を混合度を表す指標と考えると、 $\sigma_0 = 1$ (均一砂)の場合は $d_{ms}/d_{mo} = 1$ であり、 σ_0 が 1 より大きくなるにつれて ξ_m は 1 からのずれが大きくなると考えられる。図中の○印と●印は $\sigma_0 = 3$ に対するデータで●印は $\sigma_0 = 2.74$ のデータである。データにばらつきはあるもの $\sigma_0 = 3$ としてこれらの回帰曲線を、 $\sigma_0 = 1$ で $\xi_m = 1$ を考慮して求めると

$$\xi_m = 1 + 0.3(\sigma_0 - 1)(0.13/\psi_0 - 1) \quad (1)$$

が得られ、これを図示すると図-3 のようである。

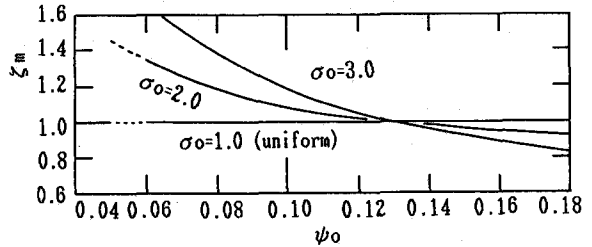


図-3 $\psi_0 \sim \xi_m$ の実験式

4. 混合砂河床の流砂量

全流砂量

混合砂河床においては河床表層砂の平均粒径 d_{ms} が掃流力によって変化することがわかったが、流砂は河床表層の移動砂であるので河床表層砂の粒度組成が流砂量に直接関係している。したがって、全流砂量が d_{ms} を代表砂粒径とする均一砂と考えて計算できるかどうかを検討するが、均一砂の流砂量式として式形が簡単な Meyer-Peter & Müller の式

$$\phi_s = K (\psi_s - C)^m \quad (2)$$

を用いる。ここに、 $\phi_s = q_s / \sqrt{sg d_{ms}^3}$ 、 $\psi_s = hI / s d_{ms}$ ($= u_*^2 / sg d_{ms}$)、 u_* : 摩擦速度、 g : 重力加速度、 $K = 8$ 、 $C = 0.047$ 、 $m = 3/2$ である。いま、流砂(=母床砂)の平均砂粒径 d_{mo} を基準として、 $\phi_0 = q_s / \sqrt{sg d_{mo}^3}$ 、 $\psi_0 = u_*^2 / sg d_{mo}$ 、 $\xi_m = d_{ms}/d_{mo}$ とすると、 $\psi_s = \psi_0 / \xi_m$ 、 $\phi_s = \phi_0 / \xi_m^{3/2}$ であるから、式(2)は

$$\phi_0 = K (\psi_0 / \xi_m - C)^m \cdot \xi_m^{3/2} \quad (3)$$

となる。 ξ_m として式(1)を用いるとすると ϕ_0 は ψ_0 と σ_0 の関数となるが、 $\sigma_0 = 1$ (均一砂)と $\sigma_0 = 3$ に対してこの関係を示すと図-4 のようである。図中の $\sigma_0 = 3$ の混合砂のデータは、 ψ_0 が小さく河床が粗粒化する場合に計算曲線の傾向を比較的良好に説明している。このことは全流砂量は河床表層砂の平均粒径を代表砂粒径として均一砂の流砂量式を用いて便宜的に推定できることを示している⁸⁾。ただ、 d_{ms} の推定は式(1)によっているので、式(1)の精度はさらに検討する必要がある。

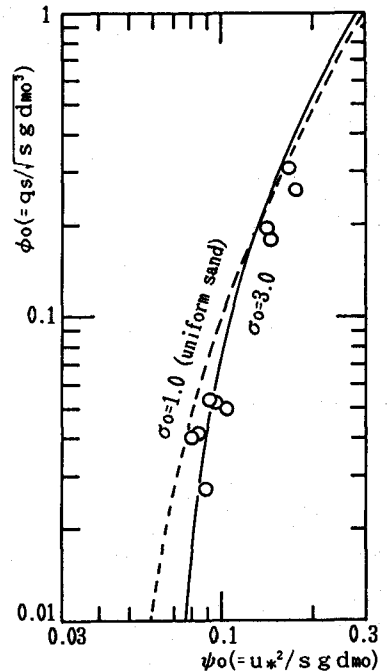


図-4 河床表層砂の平均粒径の均一砂として計算した全流砂 ϕ_0 と掃流力 ψ_0

粒径別流砂量

平衡流砂状態を想定すると、河道における流砂中の粒径 d_i の砂の粒度組成 i_o は流域からの河道へ流入砂の粒度組成と同じでなければならない。一方、河床表層砂の粒径 d_i の砂の粒度組成 i_s は掃流力によって変化する (mobile armor など) ことが明らかになってきたが、流量が種々変化する年間を通してみると河床表層を除いた母床の粒度組成 i_b は河道への流入砂によって決まるので $i_b \approx i_o$ と考えられる⁹⁾。すなわち、混合砂実河川における平衡流砂量を考える場合には i_b を既知とすると i_o が既知として与えられることになるが、掃流力によって変化する i_s は未知量となる。流砂は掃流力にさらされている河床表層砂の移動によるものであるから、 i_s は直接的に流砂量を決定する要因の一つであって、 i_s の推定が必要となる。

従来の均一砂 ($i_s = i_o = 1$) の流砂量は、限界掃流力を考慮する場合には式 (2) のように、 $\phi = f(\psi, C)$ で表されてきた。混合砂の場合、 $i_s = 1$ (均一砂) で式 (2) になり、 $i_s = 0$ で流砂量が 0 となるような最も単純な形は $i_o \cdot \phi_i = i_s \cdot f(\psi_i, C)$ である。ここに、 $\phi_i = q_s / \sqrt{s g d_i^3}$, $\psi_i = u_*^2 / s g d_i$ である。図-5 は実験砂の粒度を 5 分割し、各粒度範囲の中央粒径を各クラスの代表粒径 d_i として $(i_o / i_s) \cdot \phi_i$ と ψ_i との関係を示したものである。流砂 (母床砂と同じ) の平均粒径を d_{m0} とすると、 d_i / d_{m0} によってはっきりと式 (2) の関係は異なっていることがわかる。従来、関数 f 中の無次元限界掃流力 C を粒径別の限界掃流力 C' に置きかえる方法で関数 f を修正しているが、 C' については基本的には Egiazaroff¹⁰⁾ の式 ($C' = 0.1 / \{\log_{10} d_i / d_m\}^2$, d_m : 平均粒径) が用いられている^{8, 11)}。なお、 C を考えない Einstein 流の流砂量式では遮へい効果を考慮して ψ_i の方を修正している。Egiazaroff の式は砂に作用する掃流力が砂の平均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、砂の摩擦角は一定としている¹⁰⁾。このことは各粒径砂の限界掃流力 C が粒径によって変化するものではなく、各粒径に作用する力が変化するという立場であることを意味している。すなわち、 C ではなく ψ_i が粒径の突出高によって $\tilde{\psi}_i$ と修正されるという立場であって、限界状態では $\tilde{\psi}_i = C$ という関係から Egiazaroff の式が求まることになる。 $\tilde{\psi}_i$ が C に近い場合は C の方を補正した場合とほぼ同じであるが、 $\tilde{\psi}_i \gg C$ では ψ_i を補正した場合と C を補正した場合とでかなり異なってくる。いま、

$$i_o \cdot \phi_i = i_s \cdot f(\tilde{\psi}_i, C) \quad (4)$$

のように表す場合の $\tilde{\psi}_i$ については、Egiazaroff と同様に河床の相当粗度 k_s を平均砂粒径 d_m で表し、河床から αd_i の位置での流速 $u_{\alpha i}$ を対数流速分布を仮定して $u_{\alpha i} / u_* = 5.75 \cdot \log_{10}(30.2 \alpha d_i / d_m)$ で表すと、混合砂に作用する掃流力と均一砂に作用する掃流力の比は $u_{\alpha i}^2 / u_{*}^2 = \{\log_{10}(30.2 \alpha d_i / d_m) / \log_{10}(30.2 \alpha d_m / d_m)\}^2$ となる。Egiazaroff に従って $\alpha = 0.63$ とすると、 $u_{\alpha i}^2 \sim u_*^2$ を考慮して

$$\tilde{\psi}_i = 0.61 \{\log(19 d_i / d_m)\}^2 \cdot \psi_i \equiv \varepsilon_i \cdot \psi_i \quad (5)$$

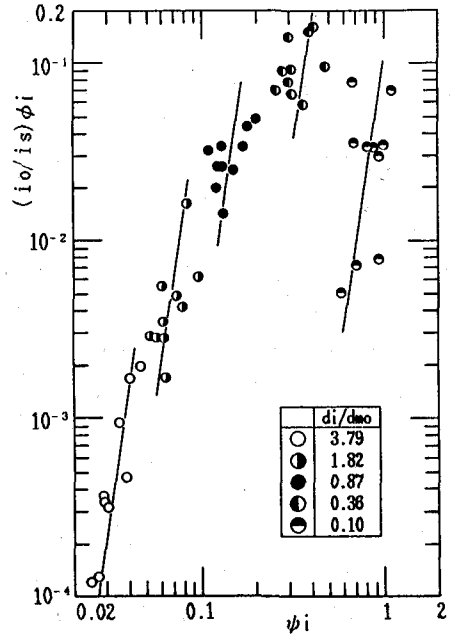


図-5 粒径別無次元掃流力 ψ_i と無次元流砂量 $(i_o / i_s) \phi_i$ の関係

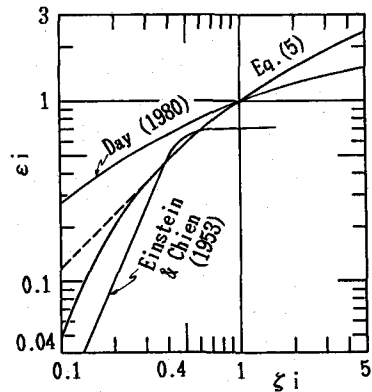


図-6 無次元掃流力の補正係数 ε_i と $\zeta_i (= d_i / d_m)$ の関係

が得られる。掃流力補正係数 ϵ_i は図-6 に示すように d_i/d_m の関数であるが、 d_i/d_m が小さく壁面にごく近い部分では粘性の影響で流速の対数分布則が成立しなくて問題となる。限界掃流力を補正した道上ら¹¹⁾は $d_i/d_m < 0.4$ では Egiazaroff の式を修正しているが、ここでは d_i/d_m が極端に小さい場合は式(3)で補正ができるものとする。考え方は異なるが ψ_i を補正した Einsteinらや Day の補正係数も図中に示している。ただし、その場合の代表粒径はここで用いている平均粒径ではない。いま、 $(i_o/i_s) \cdot \phi_i$ と $\epsilon_i \cdot \psi_i$ の関係を実験データを用いて示せば図-7 のようになる。式(5)で示されるように ψ_i を $\epsilon_i \cdot \psi_i$ と補正すれば、図-5 のように d_i/d_m 毎に全く違っていた $(i_o/i_s) \cdot \phi_i$ と ψ_i との関係がほぼ一つの曲線で表せることが認められる。これらのデータからは式(4)の C が無視され、

$$(i_o/i_s) \phi_i = K' (\epsilon_i \cdot \psi_i)^{m'} \quad (6)$$

のように表せる。ここに $K' = 7 \times 10^5$ 、 $m' = 8$ である。なお、 ϵ_i 中の d_m は河床表層砂の平均粒径を使うべきであるが便宜的に流砂のものを使っている。 i_o が母床砂の i_b と等しく既知であるとして式(5)の補正係数と式(6)から粒径別流砂量が河床表層砂の粒度組成 i_s の関数となり、これと式(3)の全流砂 ϕ_o に i_o をかけて求めた粒径別流砂量とを等置することによって原理的には i_s が求まることになる。しかし、現在のところ式(6)や式(3)の精度は微妙な i_s の変化が議論できるほど高くない。

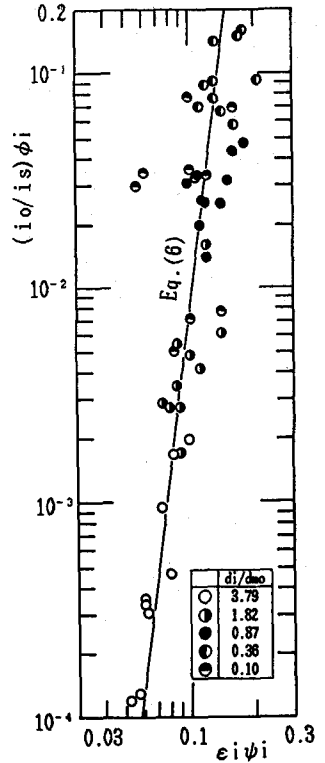


図-7 補正無次元掃流力 $\epsilon_i \psi_i$ と粒径別無次元流砂量 $(i_o/i_s) \phi_i$ の関係

5. おわりに

本研究では、水理量の変化に伴う混合砂礫河床表層砂の粒度組成の変化特性を実験的に明らかにした。また、その河床表層砂の粒度に基づいて混合砂河床における流砂量を検討し、各粒径砂に作用する掃流力を補正する方法によって粒径別流砂量の普遍表示を試みた。

参考文献

- 1) Parker, G., Klingeman, P. C. and Melean, D. G. : Bed load and size distribution in paved gravel-bed streams, Proc. ASCE, Vol. 108, HY4, pp. 544-571, 1982.
- 2) Suzuki, K. and Kato, K. : Mobile armoring of the bed surface in a steep sloped river with gravel and sand mixture, Proc. International Workshop on Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, pp. C. 47-58, 1989.
- 3) 芦田和男・江頭進治・高村裕平 : 移動床のアーミング機構に関する研究, 京大防災研究所年報, 第32号B-2, pp. 517-526, 1989.
- 4) Jain, S. C. : Armor or pavement, Proc. ASCE, Jour. of Hydraulic Engineering, Vol. 116, No. 3, pp. 436-440, 1990.
- 5) 辻本哲郎・本橋健 : 混合砂礫床の粗粒化について, 土木学会論文報告集, No. 417/I-13, pp. 91-98, 1990.
- 6) 道上正規・鈴木幸一 : 混合砂礫河床における増水・減水時の平衡流砂量, 土木学会論文報告集, 第399号/I-10, pp. 95-104, 1988.
- 7) Ikeda, H. and Iseya, F. : Experimental study of heterogeneous sediment transport, Environmental Research Center Papers, the University of Tsukuba, No. 12, pp. 1-50, 1988.
- 8) 平野宗夫 : Armoring をともなう河床変動について, 土木学会論文報告集, 第195号, 55-65, 1971.
- 9) Parker, G. : Surface-based bed load transport relation for gravel rivers, Jour. of Hydraulic Research, Vol. 28, No. 4, pp. 417-436, 1990.
- 10) Egiazaroff, I. V. : Calculation of nonuniform sediment concentrations, Proc. ASCE, Vol. 91, HY4, pp. 225-247, 1965.
- 11) Ashida, K. and Michiue, M. : An investigation of river bed degradation downstream of a dam, Proc. IAHR, 14th Congress, Vol. 3, pp. 247-255, 1971.